

УДК 699.841

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-5-74-90](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-74-90)

## **Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений**

### **Стеновой демпфер «WD CVS» как эффективное средство повышения сейсмостойкости каркасных металлических зданий**

**Бондарев Дмитрий Евгеньевич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ООО «ЦКТИ-Вибросейсм». Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье рассматривается конструкция стенового демпфера, работа которого описывается моделью Максвелла и способного к рассеиванию кинетической энергии в трёх ортогональных направлениях. Такой стеновой демпфер способен значительно снизить сейсмические нагрузки в металлических каркасных зданиях не только от поступательного, но и от возможного ротационного сейсмических воздействий. Представлена математическая модель, описывающая динамику одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером. Конструкция стенового демпфера устанавливается между колоннами каркаса здания посредством упругой металлической связи. Установлено, что жёсткость упругой связи для эффективной работы стенового демпфера должна превышать эквивалентную жёсткость демпфера не менее, чем в пять раз. Показано, как с помощью разработанной математической модели, можно в качестве первого приближения подобрать оптимальное количество демпферов. Представлен критерий оптимизации в виде минимизации суммарного внутреннего усилия в конструкциях здания. Проведён анализ пространственной модели металлического каркасного здания на трёхкомпонентное сейсмическое воздействие с учётом выбранного количества демпферов. Разработанная конструкция стенового демпфера способна снизить внутренние усилия и перемещения верха здания в два раза при расчёте на трёхкомпонентное воздействие, пиковое ускорение грунта которого соответствует девятибалльному землетрясению.

**Ключевые слова:** стеновой демпфер, каркасные здания, сейсмическое воздействие, демпфер, математическая модель, модель Максвелла

**Для цитирования:** Бондарев Д.Е. Стеновой демпфер «WD CVS» как эффективное средство повышения сейсмостойкости каркасных металлических зданий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 5. С. 74–90.

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-5-74-90](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-74-90)

## **Design, building and reconstruction of a seismic constructions**

### **Wall damper “WD CVS” as effective device for increasing of seismic performance of metal frames**

@ Bondarev D.E., 2023

Dmitrii E. Bondarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LLC “CKTI-Vibroseism”. Saint-Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article discusses the design of a wall damper which is able to dissipate kinetic energy in three orthogonal directions. Such a wall damper is able to significantly reduce seismic loads in metal frame buildings not only from translational, but also from possible rotational seismic impacts. A mathematical model is presented describing the dynamics of a one-story building equipped with a wall damper, the work of which is described by the Maxwell model. The developed wall damper is installed by means of an elastic metal brace. It has been considered that the stiffness of the elastic brace for the effective dissipation of the wall damper should exceed the equivalent stiffness of the damper by at least five times. It is shown how, using the developed mathematical model, it is possible to choose the optimal number of dampers as the first approximation. The optimization criterion is developed. Analysis of the spatial model of metal frame was carried out. The spatial model of the metal frame building subjected to a three-component seismic excitation was analyzed taking into account the selected number of dampers. The developed wall damper reduces the internal forces and displacements of the top of the building by half.

**Keywords:** wall damper, frame buildings, seismic impact, damper, mathematical model, maxwell model

**For citation:** Bondarev D.E. Wall damper “WD CVS” as effective device for increasing of seismic performance of metal frames. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2023, no. 5, pp. 74–90. [In Russian]

**DOI:** [10.37153/2618-9283-2023-5-74-90](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-74-90)

## Введение

Вязкие жидкостные (гидравлические) демпферы являются широко распространёнными устройствами для снижения сейсмических нагрузок и обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений. Рассеивание энергии в гидравлических демпферах происходит за счёт сил вязкого сопротивления, пропорциональных скорости и препятствующих перетеканию вязкой жидкости вещества под давлением [1].

Существуют различные способы исполнения гидравлических демпферов: осуществляющие рассеивание энергии в одном (продольном) направлении, вязкоупругие демпферы, осуществляющие рассеивание энергии в горизонтальном и вертикальном направлениях, стеновые демпферы, устанавливаемые между перекрытиями, и многие другие.

Основной характеристикой гидравлических демпферов является возникающая сила сопротивления, в общем виде определяется по следующей формуле:

$$F = -C|V|^{\alpha} \text{sign}V \quad (1)$$

где  $F$  – сила сопротивления демпфера;  $C$  – постоянный коэффициент;  $V$  – скорость перемещения штока (поршня) демпфера;  $\alpha$  – параметр демпфирования, характеризующий конструкцию демпфера.

В некоторых случаях в инженерных расчётах допускается моделировать вязкие демпферы с эквивалентным вязким демпфированием (коэффициент пропорциональности):

$$F = C_{eq}V \quad (2)$$

где  $F$  – сила сопротивления демпфера;  $C_{eq}$  – коэффициент пропорциональности;  $V$  – скорость перемещения штока (поршня) демпфера.

Стеновые демпферы являются широко используемым устройством для сейсмозащиты каркасных зданий. Как правило, они устанавливаются между перекрытиями и крепятся к верхней и нижней точке этажа. При наличии относительной скорости между точками крепления возникает сила сопротивления, позволяющая снизить сейсмическую нагрузку.

Величина силы сопротивления будет зависеть от величины относительной скорости, поэтому такой вид демпферов используют только в каркасных металлических и железобетонных зданиях, где первые собственные формы преимущественно сдвиговые, а не изгибные.

Стеновые демпферы широко используются в мировой практике. Как правило, они представлены в виде бака прямоугольной формы, внутри которого находится вязкая жидкость, в которую помещён поршень, представляющий собой металлическую пластину. Бак крепится снизу к нижнему перекрытию. Поршень крепится к верхним конструкциям перекрытия. Такая конструкция стенового демпфера позволяет снижать сейсмические нагрузки в основном только в одном направлении – вдоль пластины. Как правило, такие демпферы располагают по периметру каркасного здания, чтобы обеспечить его сейсмостойкость по двум взаимно перпендикулярным направлениям, а также снизить возможные эффекты кручения здания.

В качестве примера на рисунке 1 представлен вязкий стеновой демпфер фирмы GERB:



Рисунок 1 – Внешний вид вязкого стенового демпфера

Figure 1 – Appearance of a viscous wall damper

Как правило, такие демпферы учитывают в расчётах в виде силы сопротивления, пропорциональной скорости (формула 2). В инженерной практике часто встречается случай, когда сила с конструкций здания передаётся на демпфер посредством упругого элемента, например, металлического профиля (рисунок 2, слева). В таком случае модель будет иметь следующий вид [5] (Рисунок 3):

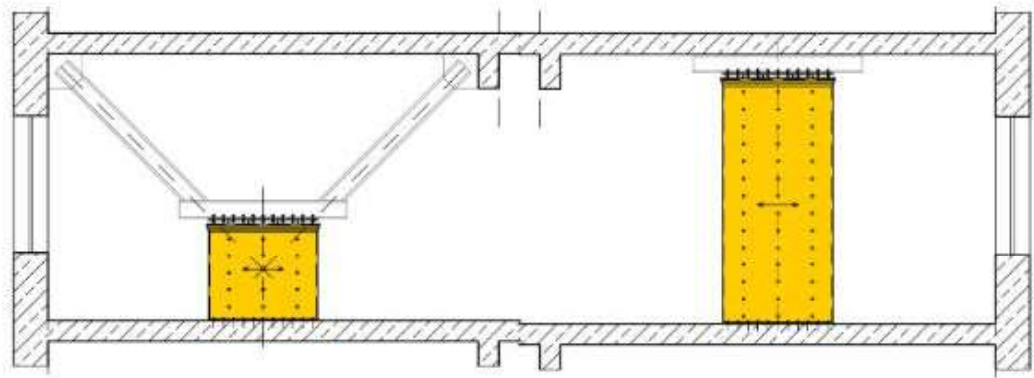


Рисунок 2 – Принципиальная схема крепления вязкого стенового демпфера

Figure 2 – Schematic diagram of the attachment of a viscous wall damper

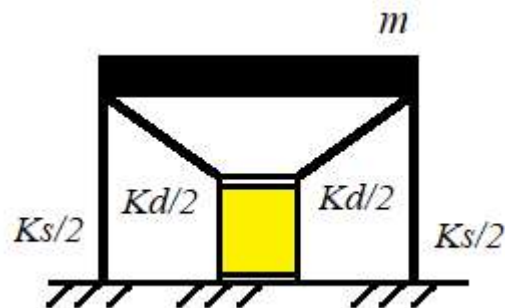


Рисунок 3 – Модель одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером. Демпфер крепится посредством упругого элемента

Figure 33 – A model of a one-story building equipped with a wall damper. The damper is attached by means of an elastic element

Расчётная схема модели, представленной на рисунке 3, будет иметь следующий вид (Рисунок 4):

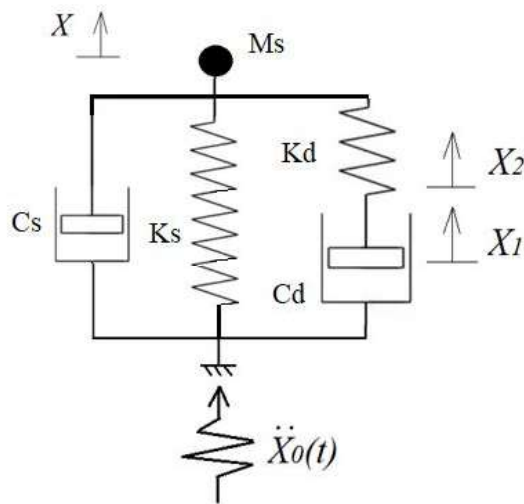


Рисунок 4 – Модель, описывающая динамику одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером, устанавливаемого посредством упругой металлической связи

Figure 4 – A model describing the dynamics of a single-storey building equipped with a wall damper installed by means of an elastic metal bond

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

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x + c_d\dot{x}_1 = -m\ddot{x}_0(t) \\ c_d\dot{x}_1 = k_d x_2 \end{cases} \quad (3)$$

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:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_s\dot{x} + k_s x + c_d\dot{x}_1 = -m\ddot{x}_0(t) \\ c_d\dot{x}_1 = k_d x - k_d x_1 \end{cases} \quad (4)$$

В таких системах с упругим элементом сила, возникающая в металлическом профиле, равна силе сопротивления в демпфере, поэтому в таких системах важно правильно подобрать жёсткость металлического профиля для эффективной работы демпфера. Выбор недостаточно жесткого упругого элемента может значительно снизить эффективность демпфера. Основным минусом таких стеновых демпферов является то, что они рассеивают энергии только в одном горизонтальном направлении.

### Стеновой демпфер «WD CVS»

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.

Предлагается использовать вязкоупругий демпфер ВД-630/426-15 (Рисунок 5) по ТУ №4192-001-20503039-01 (ООО «ЦВС»). Такой демпфер не воспринимает статических нагрузок и не препятствует тепловым расширениям. В тоже время демпфер сопротивляется динамическим смещениям, эффективно рассеивая энергию колебаний по 6-ти степеням свободы, в отличие от большинства других аналогичных конструкций [4].



Рисунок 5 – Общий вид высоковязкого демпфера ВД-630/426-15

Figure 5 – General view of the high-viscosity damper VD-630/426-15

Крепление демпфера ВД посредством металлических профилей к конструкциям каркаса здания позволит задействовать рассеивающую способность демпфера по трём степеням свободы: двум горизонтальным и вертикальному направлениям.

На рисунке 6 изображена принципиальной схемой установки демпфера ВД между колоннами металлического каркаса.

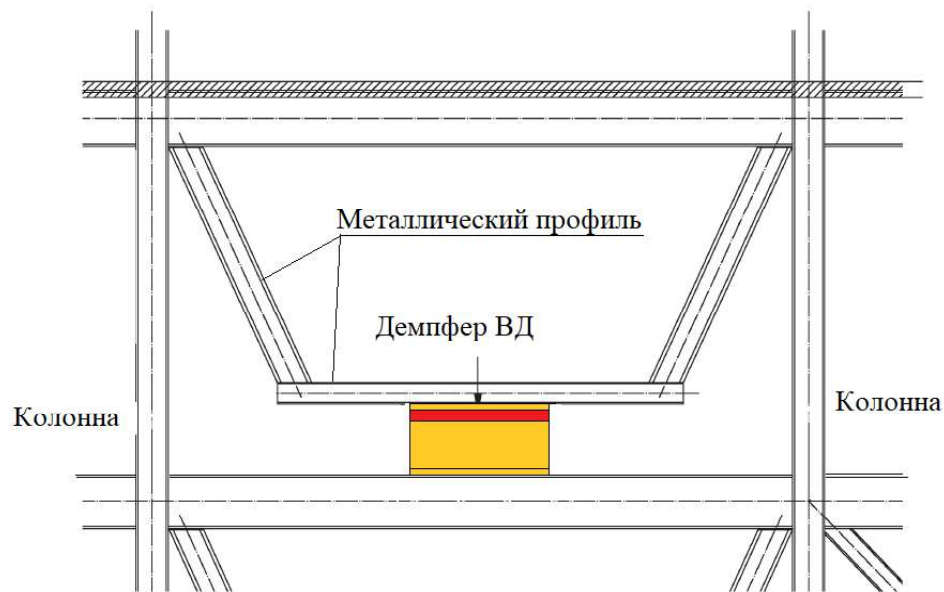


Рисунок 6 – Принципиальная схема установки стенового демпфера «WD CVS» («Wall Damper CVS») между колоннами

Figure 6 – Schematic diagram of the installation of the wall damper "WD CVS" ("Wall Damper CVS") between the columns

Сила сопротивления демпфера частотно-зависима, поэтому по результатам аппроксимирующих расчётов, математическая модель наиболее близко, отражающая работу демпфера при динамическом возбуждении, описывается моделью Максвелла с двумя цепочками [4] (рисунок 7).

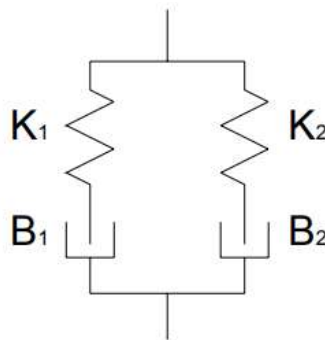


Рисунок 7 – Схема расчётной модели высоковязкого демпфера ( $K$  – жёсткость,  $B$  – вязкость цепей демпфера)

Figure 7 – Diagram of the computational model of a high-viscosity damper ( $K$  - stiffness,  $B$  – viscosity of the damper chains)

На низких, стремящихся к нулю частотах нагружения, реакция демпфера становится вязкой, а на высоких частотах нагружения реакция демпфера становится преимущественно упругой.

#### Учёт колебаний здания в вертикальной плоскости. Плоская задача

Используя расчётную модель вязкоупругого демпфера, составим дифференциальные уравнения, описывающую динамику одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером

«WD CVS» посредством упругой металлической связи. Расчётная схема одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером «WD CVS» («Wall Damper CVS») представлен на рисунке 8.

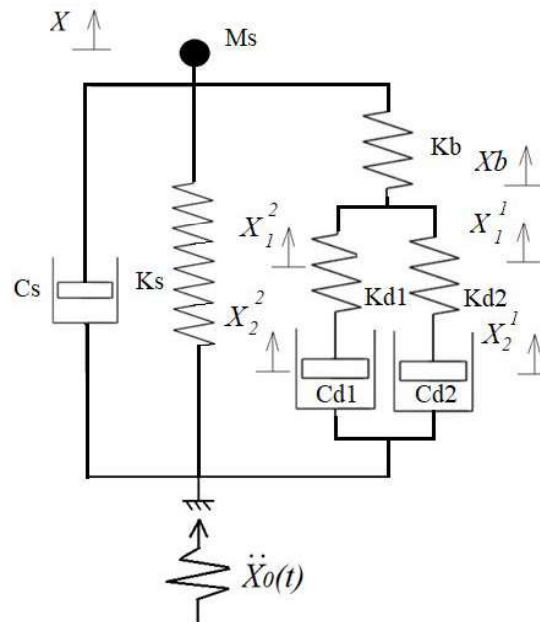


Рисунок 8 – Расчётная схема одноэтажного здания, оснащённого стеновым демпфером «WD CVS» («Wall Damper CVS») посредством упругой металлической связи

Figure 8 – Design diagram of a single-storey building equipped with a wall damper "WD CVS" ("Wall Damper CVS") by means of an elastic metal bond

Необходимо решить систему дифференциальных уравнений вида:

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

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).

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:



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

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.

### Расчёт металлического каркаса на сейсмическое воздействие. Упрощённая модель. Оптимизационный анализ

В качестве примера эффективного применения стеновых демпферов «WD CVS» возьмём отдельно стоящий металлический каркас производственного здания.

Здание имеет следующие габариты: ширина в плане – 30 метров, длина в плане – 48 метров, высота от фундамента до конька кровли – 28 метров.

Масса здания с учётом всех действующих нагрузок – 1230 тонн.

Расчётная схема приведена на рисунке 9.

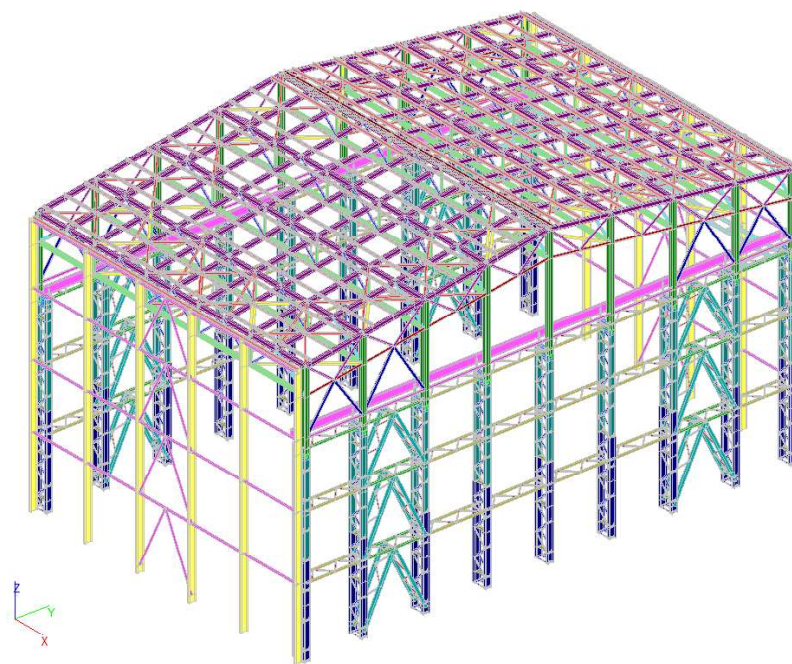


Рисунок 9 – Расчётная схема промышленного отдельно стоящего здания, выполненного из металлических конструкций

Figure 9 – Design scheme of an industrial detached building made of metal structures

Основные три собственных частоты, имеющие наибольший модальный вклад в динамический отклик конструкции, представлены в таблице 1. Первые две собственные формы колебаний представлены на рисунке 10.

Таблица 1 – Собственные частоты здания

Table 1 – Natural frequencies of the building

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

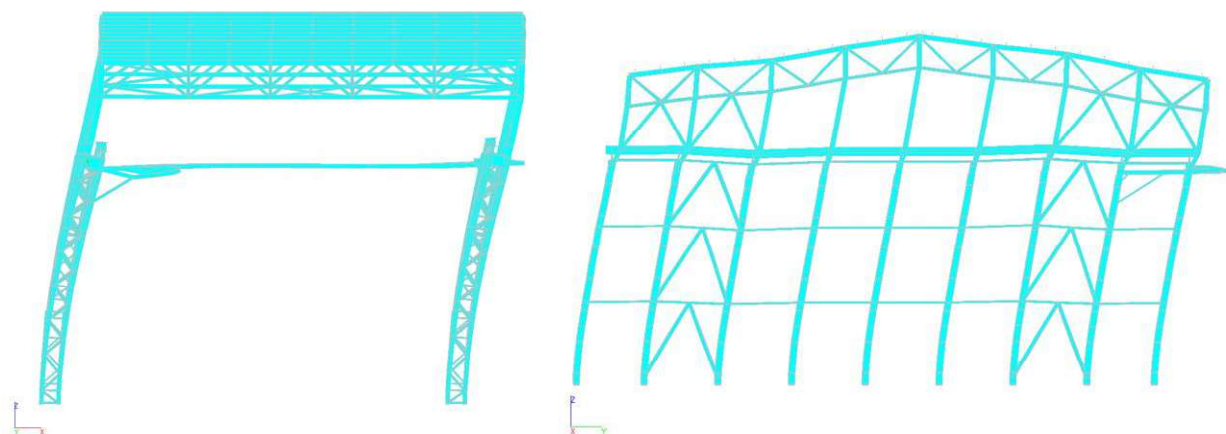


Рисунок 10 – Собственные формы колебаний. Слева: поперечные колебания здания, справа: продольные колебания здания

Figure 10 – Natural forms of vibrations. Left: transverse vibrations of the building, right: longitudinal vibrations of the building

В качестве сейсмического воздействия примем трёхкомпонентную синтезированную акселерограмму, соответствующую землетрясению 9 баллов по критерию максимальных ускорений. На рисунке 11 представлены акселерограмма горизонтальной компоненты сейсмического воздействия и соответствующий ей пятипроцентный спектр ускорений.

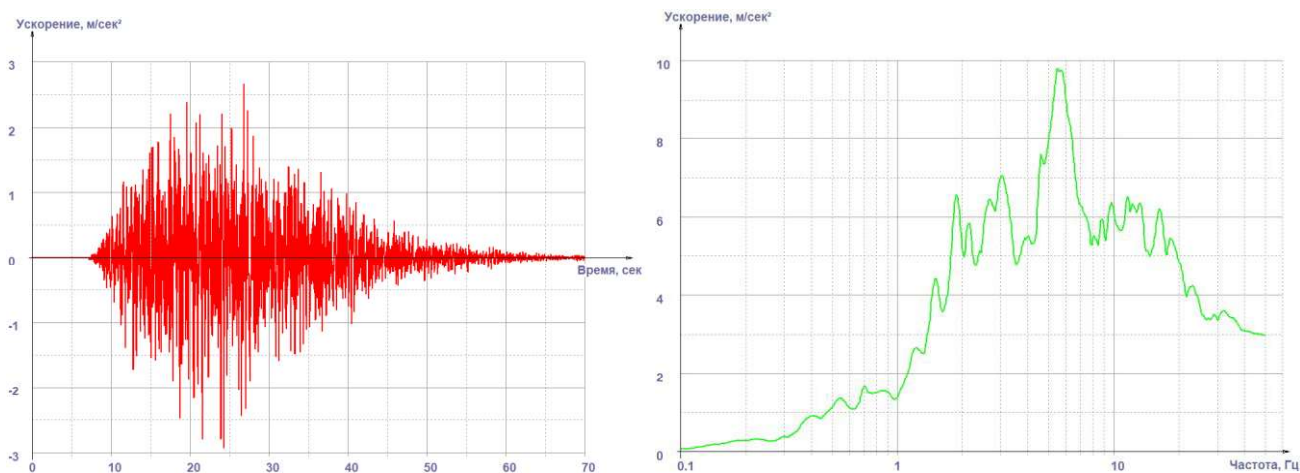


Рисунок 11 – Горизонтальная компонента сейсмического воздействия и пятипроцентный спектр ускорений. PGA=2.93 м/с<sup>2</sup>.

Figure 11 – Horizontal component of seismic impact and five percent acceleration spectrum. PGA=2.93 m/s<sup>2</sup>.

Так как здание имеет преимущественно сдвиговые деформации, то целесообразно установить в качестве системы сейсмогашения стеновые демпферы «WD CVS». Используя упрощённую модель, представленную на рисунке 8, в результате оптимизационного анализа необходимо подобрать количество демпферов и жёсткость металлического профиля, посредством которого будет осуществлён монтаж стенового демпфера к конструкциям каркаса промышленного здания. Для предварительного подбора характеристик элементов сейсмозащиты необходимо выполнить оптимизационный анализ.

В качестве критерия был принят следующий параметр: наименьшие суммарные усилия в конструкциях здания (рисунок 8):

$$C\tau = \min(Ks * x) \quad (8)$$

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

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  $Ks$  (Рисунок 8). Графики снижения суммарного усилия от количества демпферов приведена на рисунке 12.

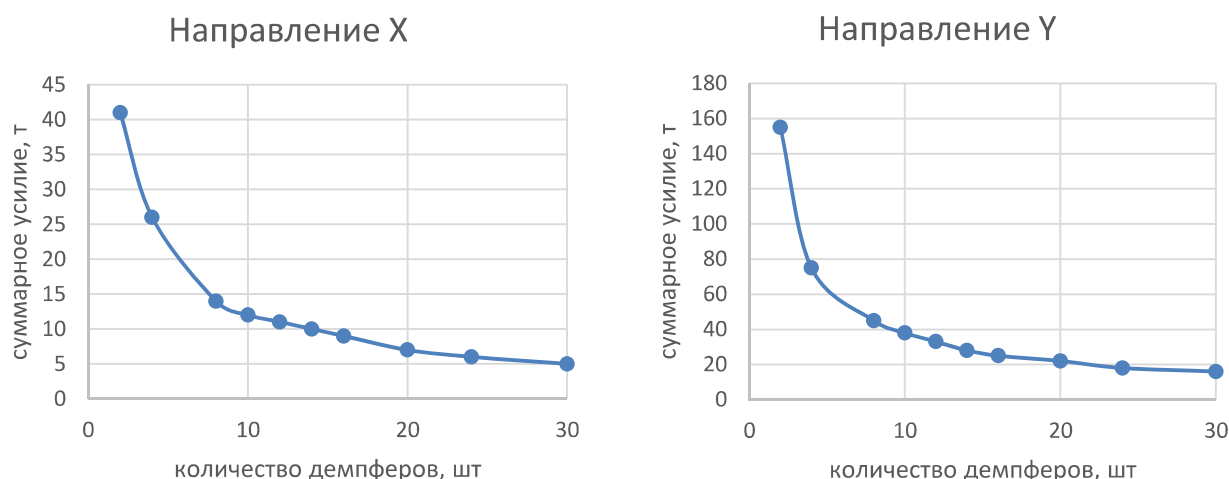


Рисунок 12 – Зависимость снижения суммарного усилия в конструкциях здания от количества демпферов. Направления X и Y

Figure 12 – Dependence of the reduction of the total force in the building structures on the number of dampers. Directions X and Y

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).

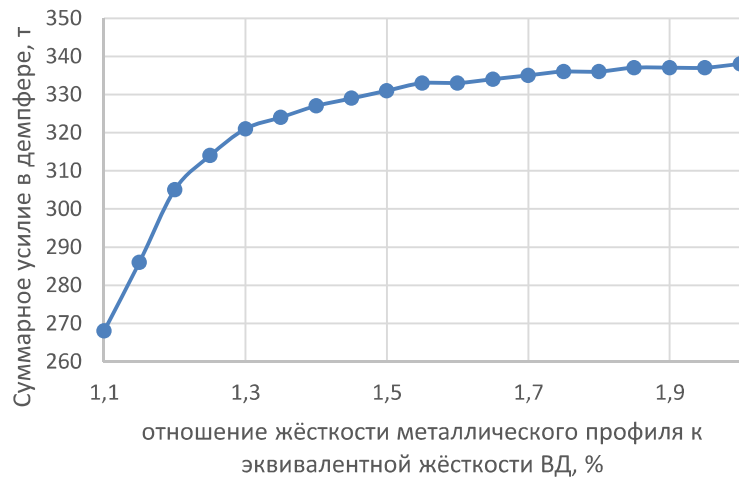


Рисунок 13 – Зависимость суммарного усилия в демпфере от отношения жёсткости металлического профиля к эквивалентной жёсткости вязкоупругого демпфера (ВД)

Figure 13 – The dependence of the total force in the damper on the ratio of the stiffness of the metal profile to the equivalent stiffness of the viscoelastic damper (VD)

На рисунке 14 представлена силовая диаграмма демпфера.

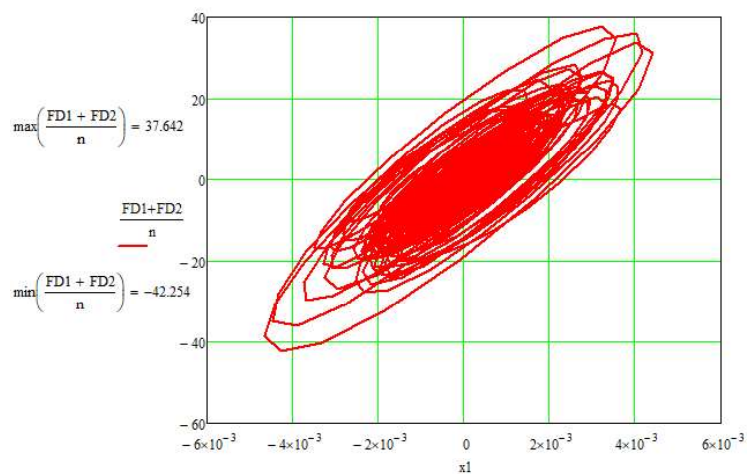


Рисунок 14 – Силовая диаграмма стенового демпфера. Слева указаны максимальные и минимальные значения

Figure 14 – Power diagram of the wall damper. The maximum and minimum values are shown on the left

### Расчёт металлического каркаса на сейсмическое воздействие. Решение пространственной задачи средствами, реализующими МКЭ

Упрощённая модель здания, оснащённая стеновыми демпферами, позволяет в первом приближении задаться жёсткостью металлического профиля, необходимого для крепления демпфера к конструкциям каркаса, а также количеством демпферов по направлению X и Y. В качестве металлического профиля примем квадратную трубу 250x250x12 по ГОСТ Р 54157-2010.

Стеновые демпферы «WD CVS», установленные между металлическими колоннами здания изображены на рисунке 15.

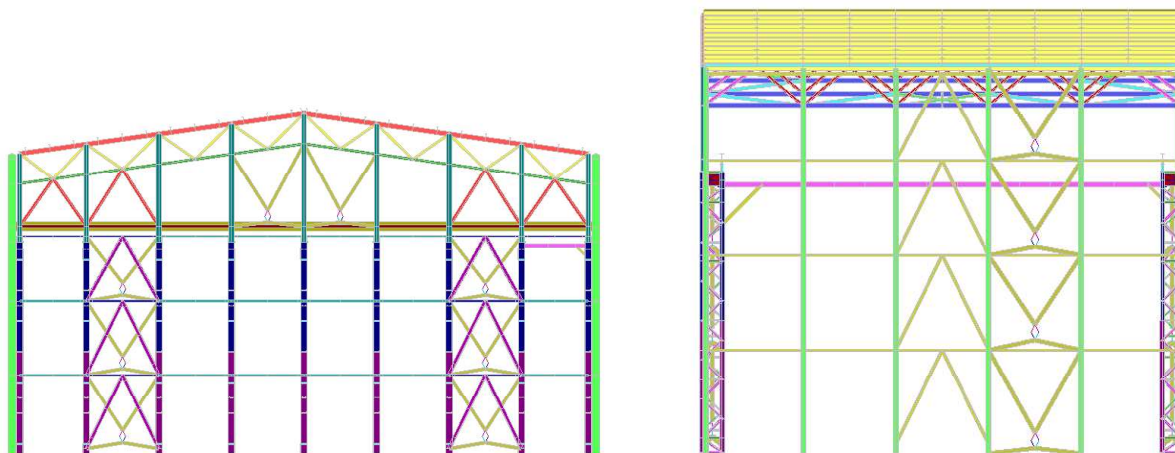


Рисунок 15 – Модель здания, оснащённого стеновыми демпферами. Слева изображены демпферы, устанавливаемые в продольном направлении. Справа изображены демпферы, устанавливаемые в поперечном направлении

Figure 15 – A model of a building equipped with wall dampers. The dampers installed in the longitudinal direction are shown on the left. The dampers installed in the transverse direction are shown on the right

Расчёт выполнялся во временной области методом прямого интегрирования в ПК SCAD Office на сейсмическое трёхкомпонентное воздействие. Оценивались внутренние усилия в конструкциях, а также перемещения верхней точки здания. В таблице 2 приведено сравнение вышеперечисленных параметров в здании со стеновыми демпферами и без них.

Таблица 2 – Сравнение усилий и перемещений

Table 2 – Comparison of efforts and movements

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

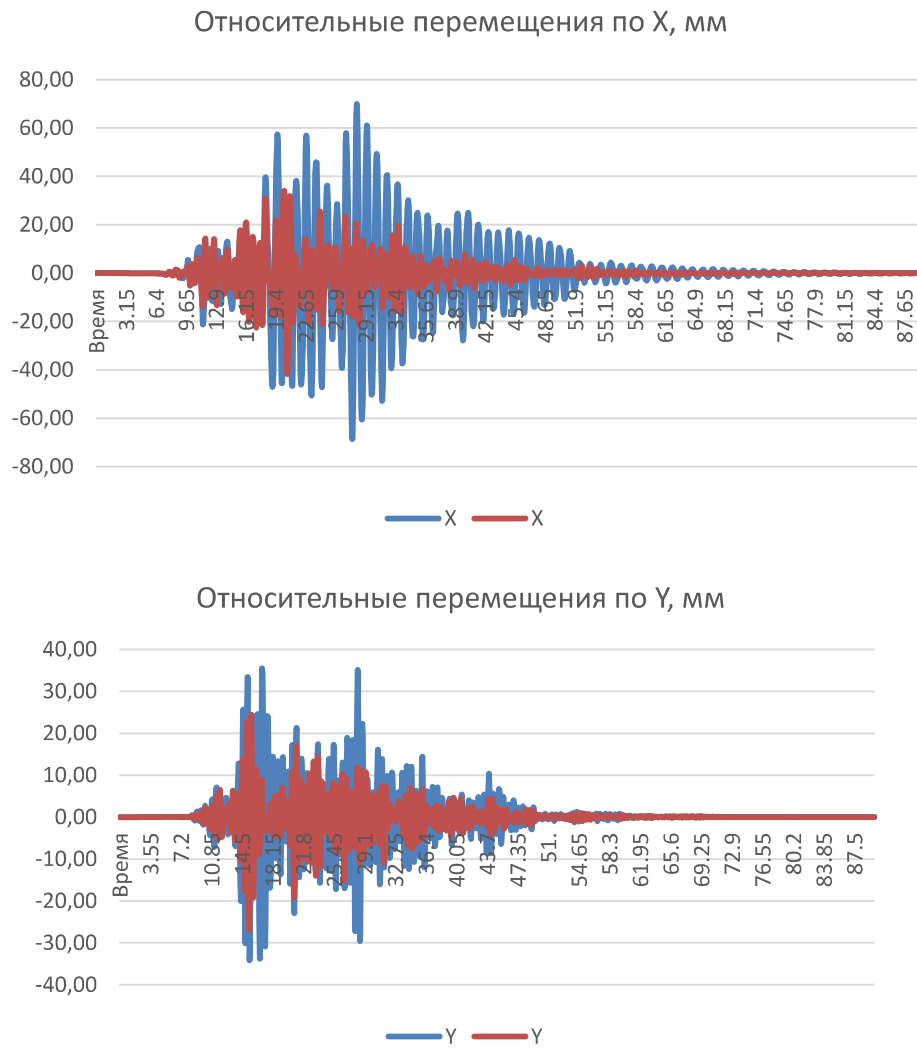


Рисунок 16 – Относительные перемещения верхней точки здания с учётом стеновых демпферов и без. Сверху: по направлению X. Снизу: по направлению Y.

Figure 16 – Relative movements of the top point of the building with and without wall dampers. From above: in the X direction. Bottom: in the Y direction.

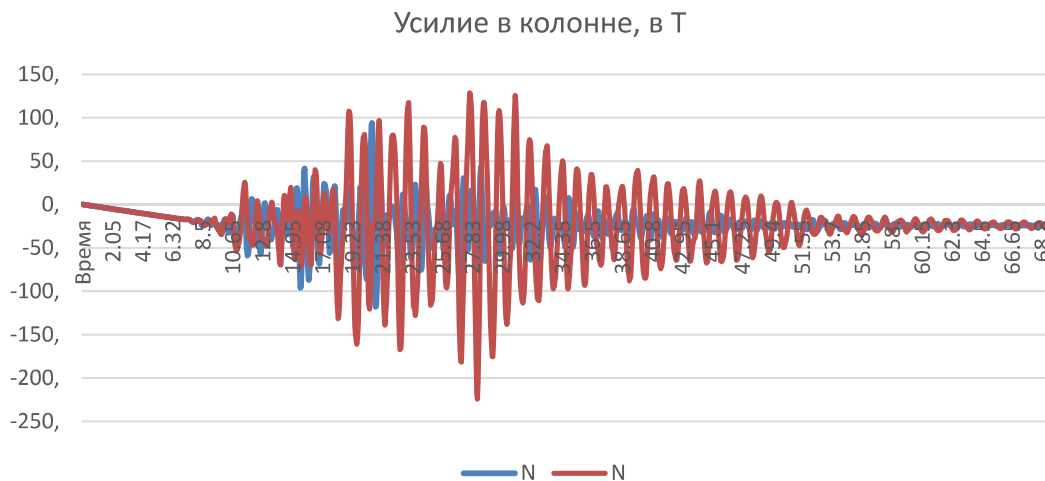


Рисунок 17 – Сравнение усилий в колонне с учётом стеновых демпферов и без.

Figure 17 – Comparison of efforts in a column with and without wall dampers.

### Результаты

1) Разработана математическая модель, позволяющая подобрать оптимальное количество стеновых демпферов для эффективной сейсмозащиты в каркасных металлических зданиях.

2) 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.

3) Установка стеновых демпферов снижает перемещения и усилия в конструктивных элементах, уменьшает риск вероятного повреждения и разрушения конструкций здания, а также минимизирует возможность нарушения технологического процесса во время землетрясения. Снижение усилий в конструкциях в целом повышает общую эксплуатационную надёжность сооружения как при возникновении землетрясений различного уровня, так и при других динамических воздействиях. Решение задачи по снижению сейсмических нагрузок на здание может значительно сократить металлоёмкость, снизить расходы на строительство и ремонт объекта после землетрясения.

### Список литературы

1. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учеб. пособие. Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. 501 с.
2. Kostarev V.V., Nawrotzki P., Vasil'ev P., Vaindrakh M. (2021). Developing and natural scale testing of the 3D BCS base isolation system. World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Proceedings. <https://doi.org/10.37153/2686-7974-2019-16-460-472>
3. Peter Nawrotzki, Victor Kostarev, Daniel Siepe, Frank Barutzki, Victor Salcedo. (2022). 3D Seismic isolation systems for the nuclear industry layout, design & qualification. Transactions, SMiRT-26 Berlin/Potsdam, Germany, July 10–15, 2022, Division V.
4. Алексеев В.Н., Берковский А.М., Васильев П.С., Костарев В.В., Павлов Д.Ю., Щукин А.Ю. Использование технологии высоковязкого демпфера для повышения динамической надёжности



трубопроводов. ООО «ЦКТИ-Вибросейсм». 1996. (Эл. ресурс:  
<https://www.cvs.spb.su/images/abooks/publications//Dampers.pdf>).

5. Christopoulos C., Filiatrault A. (2006). Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. In IUSS Press (Vol. 133, Issue 8).

## References

1. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. Sejsmostojkie konstrukcii transportnyh zdaniy i sooruzhenij: ucheb. posobie. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». 2012. 501 p.

2. Kostarev V.V., Nawrotzki P., Vasil'ev P., Vaindrakh M. (2021). Developing and natural scale testing of the 3D BCS base isolation system. World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures Proceedings. <https://doi.org/10.37153/2686-7974-2019-16-460-472>

3. Peter Nawrotzki, Victor Kostarev, Daniel Siepe, Frank Barutzki, Victor Salcedo. (2022). 3D Seismic isolation systems for the nuclear industry layout, design & qualification. Transactions, SMiRT-26 Berlin/Potsdam, Germany, July 10–15, 2022, Division V.

4. Alekseev V.N., Berkovskij A.M., Vasil'ev P.S., Kostarev V.V., Pavlov D.Yu., A.Yu. Shchukin. Ispol'zovanie tekhnologii vysokovyazkogo dempfera dlya povysheniya dinamicheskoy nadezhnosti truboprovodov. ООО "СКТИ-Вибросейсм", 1996. (Эл. ресурс:  
<https://www.cvs.spb.su/images/abooks/publications//Dampers.pdf>).

5. Christopoulos C., Filiatrault A. (2006). Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. In IUSS Press (Vol. 133, Issue 8).

## Информация об авторе / Information about author

**Бондарев Дмитрий Евгеньевич**, кандидат технических наук, главный специалист, ООО «ЦКТИ-Вибросейсм». Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: [89523684328@mail.ru](mailto:89523684328@mail.ru)

**Dmitrii E. Bondarev**, Cand. Sci. (Eng.), Principal, LLC "СКТИ-Вибросейсм". Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: [89523684328@mail.ru](mailto:89523684328@mail.ru)