

УДК 699.841

## УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ

**Б.О. Гапоненко, В.А. Тарасов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Одним из способов повышения сейсмостойкости зданий и сооружений является устройство сейсмоизоляции. Пружинно-демпферная сейсмоизоляция включает в себя пружинные блоки, обычно моделирующиеся в расчетной схеме в виде линейно-упругих пружин, и демпферы, для учета которых используют конечные элементы с постоянной величиной затухания. В действительности вискодемпферы не являются идеально вязкими и требуют учета зависимости параметров жесткости и демпфирования от частоты колебаний. Динамические расчеты проводятся в программном комплексе SCAD++ методом прямого интегрирования уравнений движения с использованием метода конечных элементов. Для анализа использовалась упрощенная модель общественного здания в виде системы с двумя степенями свободы, а также трехмерная модель здания. Основным исследуемым критерием сравнения приняты величины максимальных сейсмических ускорений. Результаты, полученные в ходе исследования, значительно отличаются для разных вариантов учета вязких демпферов в расчетной схеме и подтверждают необходимость использования частотно-зависимой модели.

**Ключевые слова:** пружинно-демпферная система сейсмоизоляции, вискодемпфер, частотно-зависимые вязкие демпферы, сейсмостойкость, землетрясение, сейсмоизоляция, сейсмический расчет.

**Ссылка для цитирования:** Гапоненко Б.О., Тарасов В.А. Учет характеристик вязких демпферов при сейсмических расчетах многоэтажных железобетонных зданий // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 11-20. EDN: HHDCMM.

## ACCOUNTING THE CHARACTERISTICS OF VISCOUS DAMPERS IN SEISMIC CALCULATIONS OF MULTI-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

**B.O. Gaponenko, V.A. Tarasov**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** One of the ways to increase the seismic resistance of buildings and structures is the seismic isolation. Spring-damper seismic isolation includes spring blocks, usually modeled in the design scheme as linear elastic springs, and dampers, for which finite elements with a constant damping are used. In reality viscodampers are not ideally viscous and require taking into account the dependence of the stiffness and damping parameters on the oscillation frequency. Dynamic calculations were performed in SCAD++ software using time history analysis and the finite element method. For the analysis, a simplified model of a public building in the form of a system with two degrees of freedom, as well as a three-dimensional model of the building, was used for the analysis. The values of maximum seismic accelerations are accepted as the main criterion of comparison. The results obtained during the study differ significantly for different variants of accounting for viscous dampers in the design scheme and confirm the need to use a frequency-dependent model.

**Keywords:** spring-damper system of seismic isolation, visco-damper, frequency-dependent viscous dampers, seismic resistance, earthquake, seismic isolation, seismic calculation.

**For citation:** Gaponenko B.O., Tarasov V.A. Accounting the characteristics of viscous dampers in seismic calculations of multi-storey reinforced concrete buildings // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 11-20. EDN: HHDCMM.

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире происходят тысячи землетрясений, обычно несколько десятков из них достаточно большой интенсивности, чтобы нанести ощутимый ущерб различным зданиям и сооружениям. В этот список попало и сильнейшее за 100 лет землетрясение в Турции и Сирии в 2023 г. В ходе землетрясения магнитудой до 8 в Турции было разрушено около 6 тыс. зданий. Несмотря на известный факт, что территория страны находится в сейсмически опасных зонах, построенные здания оказались недостаточно сейсмостойкими. Данный пример говорит о том, что есть острая необходимость в разработке теорий и практических решений по повышению сейсмостойкости зданий. При этом необходимо обеспечивать доступность методов, возможность их использования без существенного удорожания строительства. В связи с этим помимо консервативных методов повышения сейсмостойкости зданий развиваются различные более эффективные методы, например, применение систем сейсмоизоляции зданий [1, 2].

Сейсмоизоляция (сейсмозащита) – это технология снижения сейсмического воздействия на здания и сооружения, их части и оборудование путём введения в конструкции зданий и сооружений специальных конструктивных элементов, систем сейсмоизоляции.

При проектировании и расчете сейсмоизолированных зданий и сооружений необходимо корректно учитывать характер работы изолирующих устройств. В противном случае, в результатах расчетов возможно получение серьезных ошибок не в запас прочности и, как следствие, к катастрофическим разрушениям неграмотно запроектированных зданий и сооружений [3, 4].

В качестве объекта исследования выбрано сейсмоизолированное 9-ти этажное здание бизнес-центра с 1 подземным этажом. Данное здание характеризуется массовым нахождением людей и может быть отнесено к зданиям повышенной ответственности, к которому предъявляются дополнительные требования по сейсмостойкости.

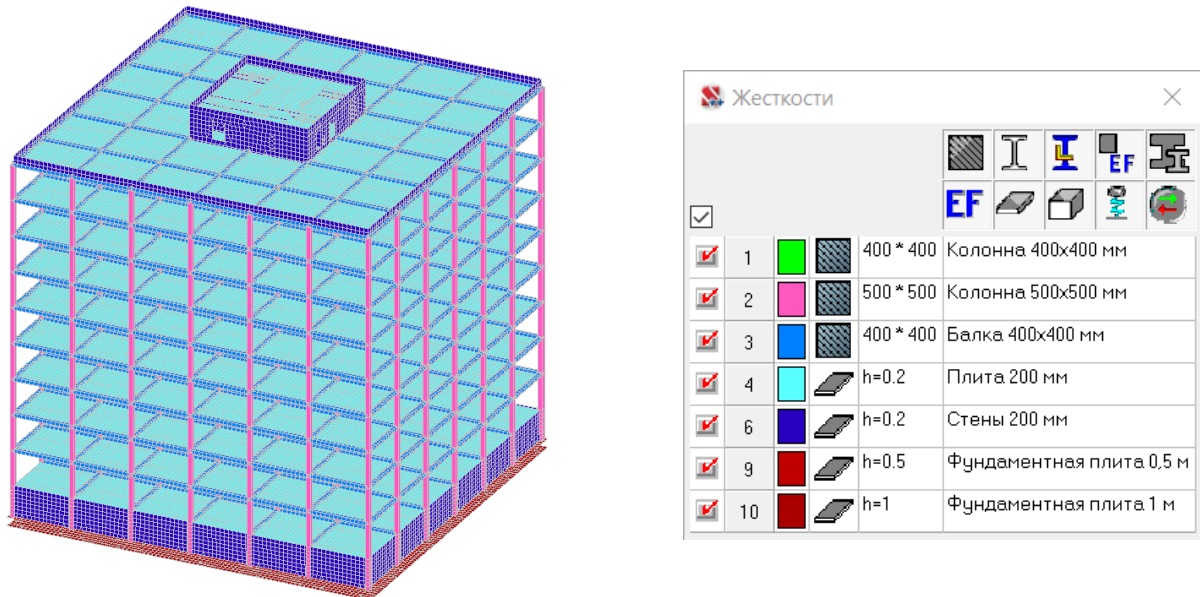
Предметом исследования является влияние на сейсмостойкость здания бизнес-центра с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией учета частотных зависимостей характеристик вязких демпферов.

Вычислительные эксперименты проведены методом прямого интегрирования уравнений движения в программном комплексе SCAD++ с использованием метода конечных элементов. Основным исследуемым критерием сравнения приняты величины максимальных сейсмических ускорений. Функции ускорений однозначно связаны с функциями перемещений, которые в свою очередь связаны с функциями динамических (сейсмических) внутренних усилий в элементах конструкций.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными является конечно-элементная расчетная модель здания в SCAD++ (рис. 1). Здание бизнес-центра с 9 наземным и 1 подземным этажом, размеры в осях 42 x 42 м. Конструктивная система здания – каркасно-ствольная, из монолитного железобетона, с ядром жесткости, расположенными в центре здания. Тип фундамента – плитный с устройством пружинно-демпферной сейсмоизоляции, толщина нижней плиты 1 м, толщина верхней плиты 0,5 м. Колонны сечением 500 x 500, балки сечением 400 x 400, перекрытия толщиной 200 мм. Основной шаг колонн 7 метров. Конструктивные решения симметричные в плане. Класс бетона стен и плит перекрытия В25, колонн – В30, фундаментных плит – В40.

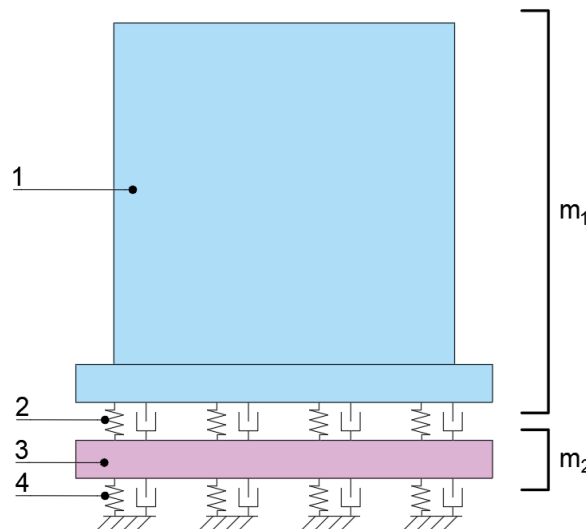
Сбор нагрузок осуществлялся в соответствии с архитектурными и объёмно-планировочными решениями и СП 20.13330.2016.



**Рис. 1.** Конечно-элементная расчетная модель здания в SCAD++ с принятыми толщинами  
**Fig. 1.** Finite element calculation model of a building in SCAD++ with accepted thicknesses

### РАСЧЕТ УПРОЩЕННОЙ СХЕМЫ ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

На первом этапе, для упрощения анализа и сокращения времени расчета сформирована модель с двумя степенями свободы. Использовалась схема сбора масс с разделением здания на 2 массы: выше и ниже слоя сейсмоизоляции (рис. 2).



**Рис. 2.** Упрощенная схема здания: 1 – верхняя часть здания, включая верхнюю плиту фундамента, массой  $m_1$ ; 2 – пружинно-демпферная сейсмоизоляция; 3 – нижняя фундаментная плита, массой  $m_2$ ; 4 – модель грунта в виде упругого основания с линейным демпфированием

**Fig. 2.** Simplified scheme of the building: 1 – the upper part of the building, including the upper foundation, with a mass  $m_1$ ; 2 – spring-damper seismic insulation; 3 – the lower foundation, with a mass  $m_2$ ; 4 – a model of the soil as an elastic base with linear damping

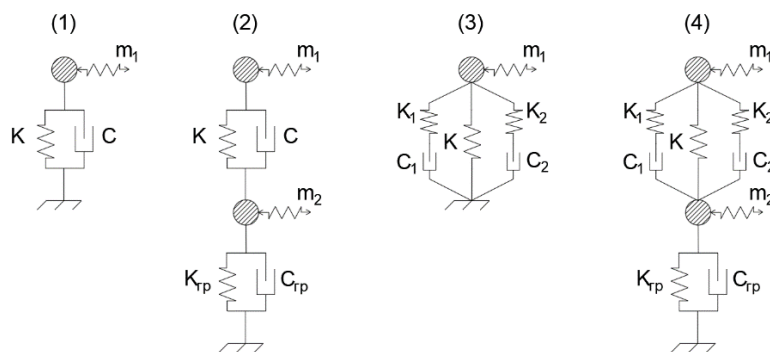
Сбор масс осуществлялся в SCAD++:

$$m_1 = 29834,3 \text{ т};$$

$$m_2 = 4622,5 \text{ т}.$$

В соответствии с несущей способностью пружинных опор и весом здания подобрано необходимое количество опор. Опоры расставлены таким образом, чтобы центр жесткости совпадал с центром тяжести здания, для недопущения кручения в первых собственных формах колебаний.

Численные исследования проводились для 4х упрощенных расчетных схем в зависимости от способа учета параметров вискодемпферов и грунтового основания (рис. 3).



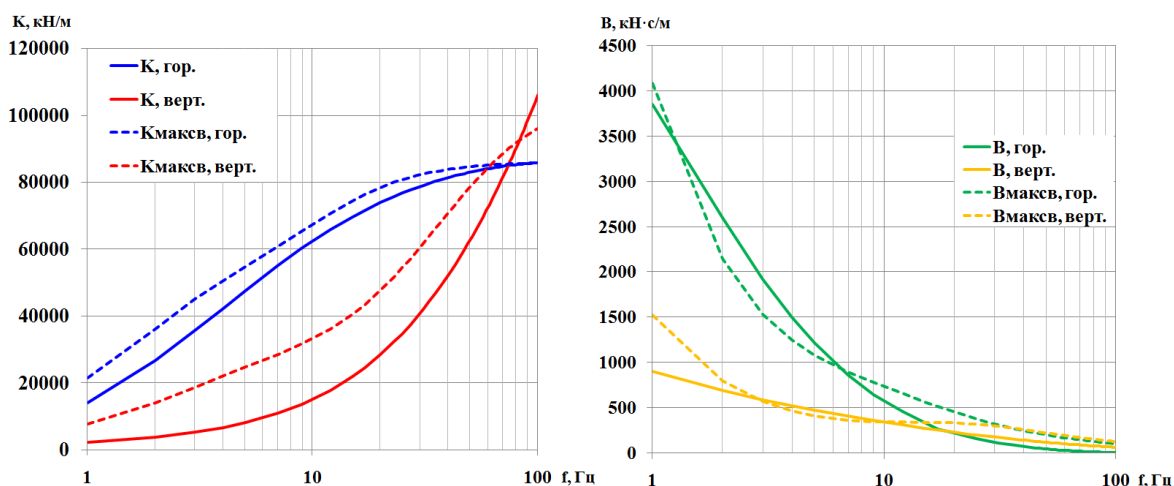
**Рис. 3.** Упрощенные расчетные схемы здания: 1 – модель с идеально вязким демпфером в слое сейсмоизоляции без учета грунтового основания; 2 – модель с идеально вязким демпфером в слое сейсмоизоляции с учетом характеристик грунтового основания; 3 – модель с частотно-зависимым демпфером в слое сейсмоизоляции без учета грунтового основания; 4 – модель с частотно-зависимым демпфером в слое сейсмоизоляции и учетом характеристик грунтового основания

**Fig. 3.** Simplified design schemes of the building: 1 – a model with an ideally viscous damper in the seismic insulation layer without accounting the soil base; 2 – a model with an ideally viscous damper in the seismic insulation layer accounting the characteristics of the soil base; 3 – a model with a frequency-dependent damper in the seismic insulation layer without accounting the soil base; 4 – a model with a frequency-dependent damper in the seismic insulation layer and accounting the characteristics of the soil base

На рис. 3 параметр  $K$  – суммарная жесткость пружинных опор,  $C$  – величина суммарного демпфирования идеально-вязких демпферов.

Частотная зависимость характеристик демпферов обеспечивается использованием в расчетах (для схем 3 и 4) четырех-параметрической модели Максвелла состоящей из двух параллельных цепочек, последовательно соединенных идеально-упругой пружины и идеально-вязкого демпфера со специальным образом подобранными характеристиками: параметры  $K_1, K_2$  – значения динамических жесткостей;  $C_1, C_2$  – параметры демпфирования. Данная методика предложена, апробирована и подтверждена экспериментально специалистами фирмы ООО «ЦКТИ-Вибросейсм»<sup>1</sup> [5].

Экспериментальные графики частотной зависимости жесткостей и демпфирования для используемого демпфера в вертикальном и горизонтальном направлениях представлены сплошными линиями, аппроксимация четырех-параметрической моделью Максвелла представлена пунктирными графиками (рис. 4). Данные графики получены на базе большого количества экспериментальных данных, полученных ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» и немецкой фирмой-производителем изоляторов «GERB» [6-8].



**Рис. 4.** Частотные зависимости динамических жесткостей (слева) и затуханий (справа). Сплошные линии - экспериментальные данные, пунктирные - аппроксимация четырех-параметрической моделью Максвелла

**Fig. 4.** Frequency dependences of dynamic stiffness (left) and damping (right). Solid lines - experimental data, dotted lines - approximation by the four-parametric Maxwell model

<sup>1</sup> Научно-исследовательская инженерная фирма ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://cvs.spb.su/ru> (дата обращения: 20.09.2023)

Все вычисления производились в программе SCAD++ с использованием конечно-элементной модели прямым пошаговым интегрированием уравнений движения. При расчетах использовалась акселерограмма землетрясения в Турции 17 августа 1999 г., заданная в виде сейсмограммы в защемленный узел. Задано направление колебаний вдоль горизонтальной оси [9].

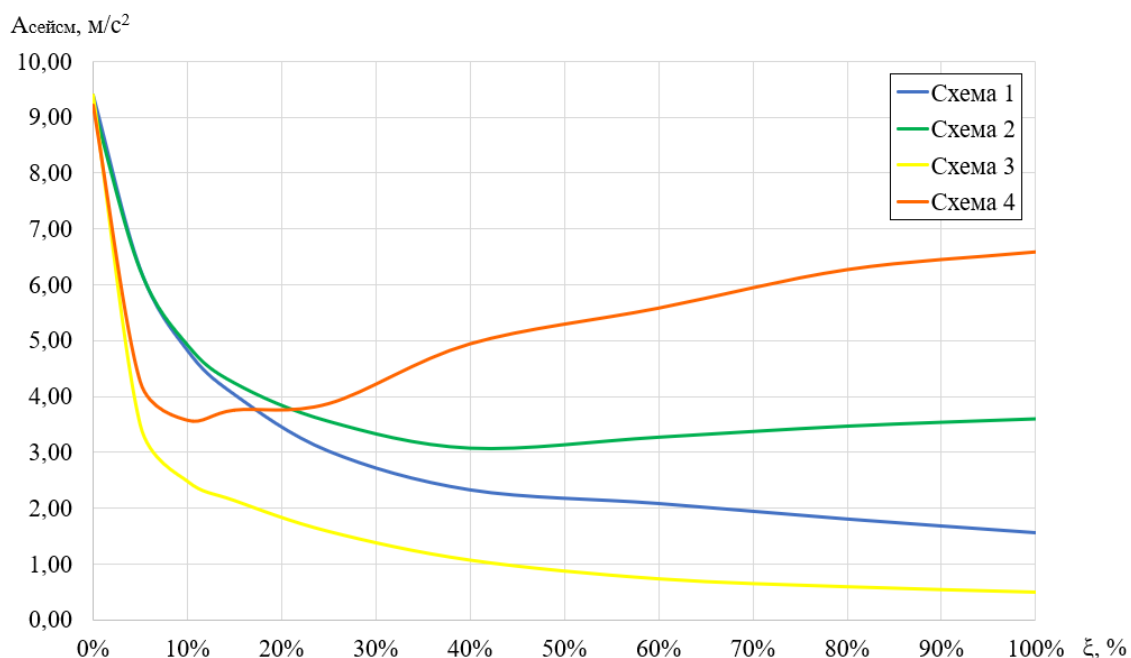
Для схем 2 и 4 моделирование грунтового основания осуществлялось с помощью специальных конечных элементов с линейной жесткостью и линейным затуханием. При расчете на сейсмическое воздействие необходимо использовать динамические характеристики основания: динамические жесткости и демпфирования [10]. Определение данных параметров осуществлялось с помощью методики, изложенной в ASCE 4-16<sup>2</sup>, исходя из среднего значения динамического модуля сдвига и других характеристик для грунтов, попадающих в пределы сжимаемой толщи.

В данной работе используются характеристики реального грунта: суглинка, с динамическим модулем сдвига равным 650 МПа. Определяются суммарные значения жесткостей и затуханий по горизонтальному направлению для фундаментной плиты размером 43 x 43 м. Максимальное значение демпфирования в основании ограничено 15% в долях от критического для горизонтального направления, в соответствии с рекомендациями норм Германии<sup>3</sup>(таблица 1).

**Таблица 1.** Параметры модели грунтового основания для системы с двумя степенями свободы  
**Table 1.** Parameters of the soil foundation model for a system with two degrees of freedom

№	Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
1	Коэффициент динамической жесткости в горизонтальном направлении	$K_{гр}$	7,75E+07	кН/м
2	Демпфирование в горизонтальном направлении (15%)	$C_{гр}$	4,90E+05	кН·с/м

Проводился анализ изменения значений максимальных ускорений вдоль горизонтальной оси в узле с массой  $m_1$  при увеличении количества демпферов и соответственно величины относительного демпфирования в слое сейсмоизоляции (рис. 5).



**Рис. 5.** Значения максимальных сейсмических ускорений по горизонтали в узле массой  $m_1$  в зависимости от величины относительного затухания

**Fig. 5.** The values of the maximum horizontal seismic accelerations in a node of mass  $m_1$ , depending on the relative damping value

<sup>2</sup>ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016

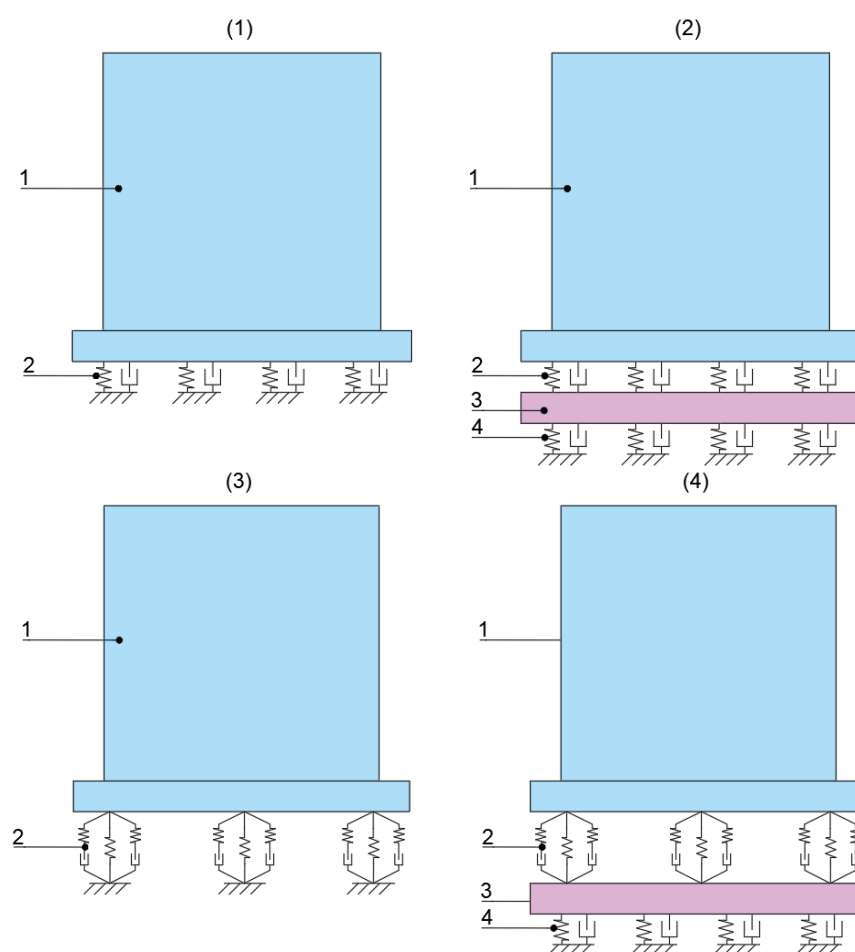
<sup>3</sup>Deutsche norm. DIN 4024 Part 1: Machine foundations; Flexible structures that support machines with rotating elements

Системы с 1 степенью свободы (схемы 1 и 3), не учитывающие параметры грунтового основания, показывают заниженные результаты ускорений по сравнению с аналогичными (схемы 2 и 4) при увеличении количества демпферов и не в полной мере отражают характер поведения реального сооружения, колеблющегося на грунтовом основании.

Графики систем с 2 степенями свободы (схемы 2 и 4) показывают также расхождения в результатах. В случае использования модели идеально-вязкого демпфера (схема 2), минимальные значения ускорений наблюдаются при 40% демпфировании в долях от критического, что не соответствует минимуму графика для системы с учетом частотно-зависимых характеристик демпферов (схема 4) при относительном демпфировании 10%. Также, значения ускорений при относительном демпфировании 40% отличаются в 1,5 раза.

### РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

На втором этапе исследования численные исследования проводились для 4х трехмерных расчетных схем здания аналогично упрощенным схемам: в зависимости от способа учета параметров вискодемпферов и грунтового основания (рис. 6).



**Рис. 6.** Схемы трехмерных расчетных схем здания: (1) – модель с идеально вязким демпфером без учета характеристик грунтового основания; (2) – модель с идеально вязким демпфером с учетом характеристик грунтового основания; (3) – модель с частотно-зависимым демпфером без учета характеристик грунтового основания; (4) – модель с частотно-зависимым демпфером и учетом характеристик грунтового основания; 1 – верхняя часть здания, включая верхнюю плиту фундамента; 2 – пружинно-демпферная сейсмоизоляция; 3 – нижняя фундаментная плита; 4 – модель грунта в виде упругого основания с линейным демпфированием

**Fig. 6.** Schemes of three-dimensional design schemes of the building: (1) – a model with an ideally viscous damper without accounting the characteristics of the soil base; (2) – a model with an ideally viscous damper accounting the characteristics of the soil base; (3) – a model with a frequency-dependent damper without accounting the characteristics of the soil base; (4) – a model with a frequency-dependent damper and accounting the characteristics of the soil base; 1 – the upper part of the building, including the upper foundation; 2 – spring-damper seismic insulation; 3 – the lower foundation; 4 – a model of the soil as an elastic base with linear damping

Для трехмерных схем параметры демпферов задавались аналогично упрощенным схемам для обоих вариантов учета их характеристик. Однако суммарные значения разделялись на соответствующее количеству реальных демпферов количество специальных КЭ, равномерно расположенных по площади фундаментной плиты.

При расчетах также использовалась акселерограмма землетрясения в Турции 17 августа 1999 г., заданная в виде сейсмограммы во все заземленные узлы фундаментной плиты. Задано направление колебаний вдоль горизонтальной оси X.

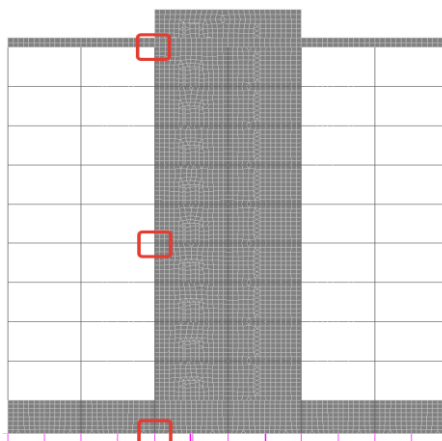
Для схем 2 и 4 моделирование грунтового основания осуществлялось с помощью специальных конечных элементов с линейной жесткостью и линейным затуханием. При задании параметров грунтового основания в трехмерной схеме суммарные значения жесткости и демпфирования были разделены на 7693 специальных КЭ, приходящих в каждый узел фундаментной плиты. Определялись суммарные значения жесткостей по трем направлениям и при повороте фундаментной плиты относительно горизонтальных осей и значения затуханий также по трем направлениям для фундаментной плиты размером 43 x 43 м. Максимальное значение демпфирования в основании ограничено 15% для горизонтального направления и 35% в долях от критического значения - для вертикального (таблица 2).

**Таблица 2.** Параметры модели грунтового основания для трехмерной схемы  
**Table 2.** Parameters of the soil foundation model for a three-dimensional scheme

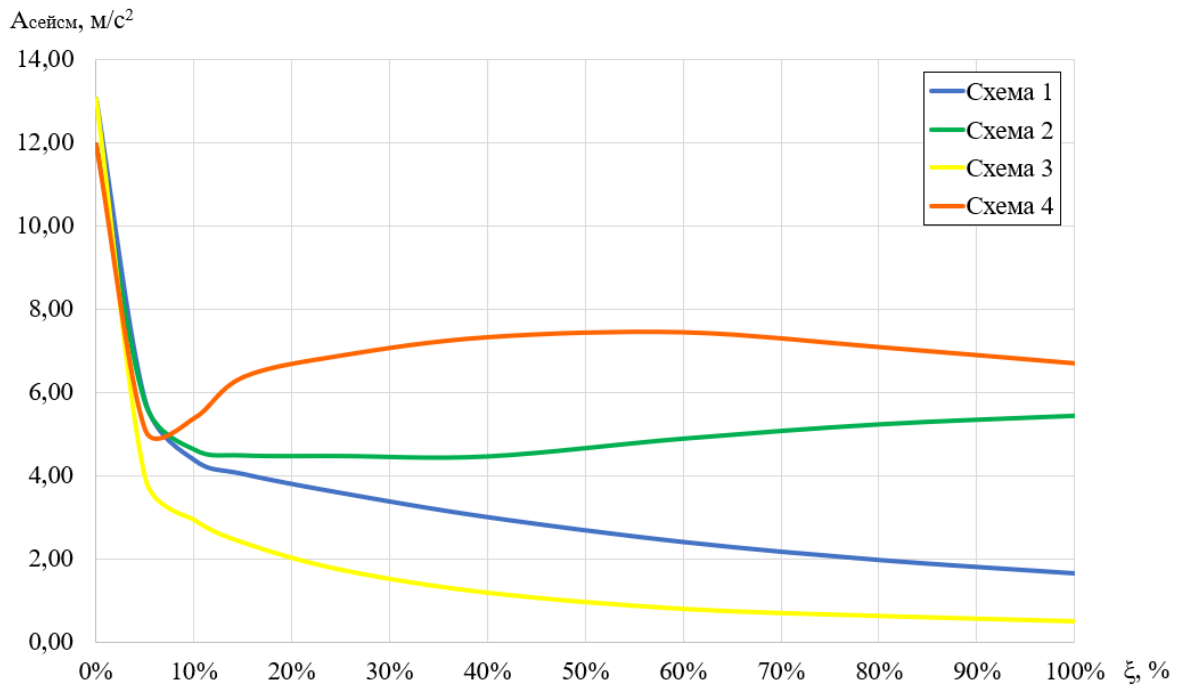
№	Параметр	Обозначение	Суммарное значение	Ед. изм.
1	Коэффициент динамической жесткости в горизонтальном направлении	$K_{X(Y)}$	7,75E+07	кН/м
2	Коэффициент динамической жесткости в вертикальном направлении	$K_z$	1,13E+08	кН/м
3	Коэффициент динамической жесткости при повороте относительно горизонтальной оси	$K_\phi$	2,39E+10	кН·м
4	Демпфирование в горизонтальном направлении (15%)	$C_{X(Y)}$	4,90E+05	кН·с/м
5	Демпфирование в вертикальном направлении (35%)	$C_z$	1,38E+06	кН·с/м

Проводился анализ изменения значений максимальных ускорений вдоль горизонтальной оси X при увеличении количества демпферов и соответственно величины относительного демпфирования в слое сейсмоизоляции следующих узлов (рис. 7):

- узел в уровне верхней фундаментной плиты (рис. 8);
- узел в уровне перекрытия 4-го этажа (середина здания по высоте) (рис. 9);
- узел в уровне плиты покрытия (рис. 10).

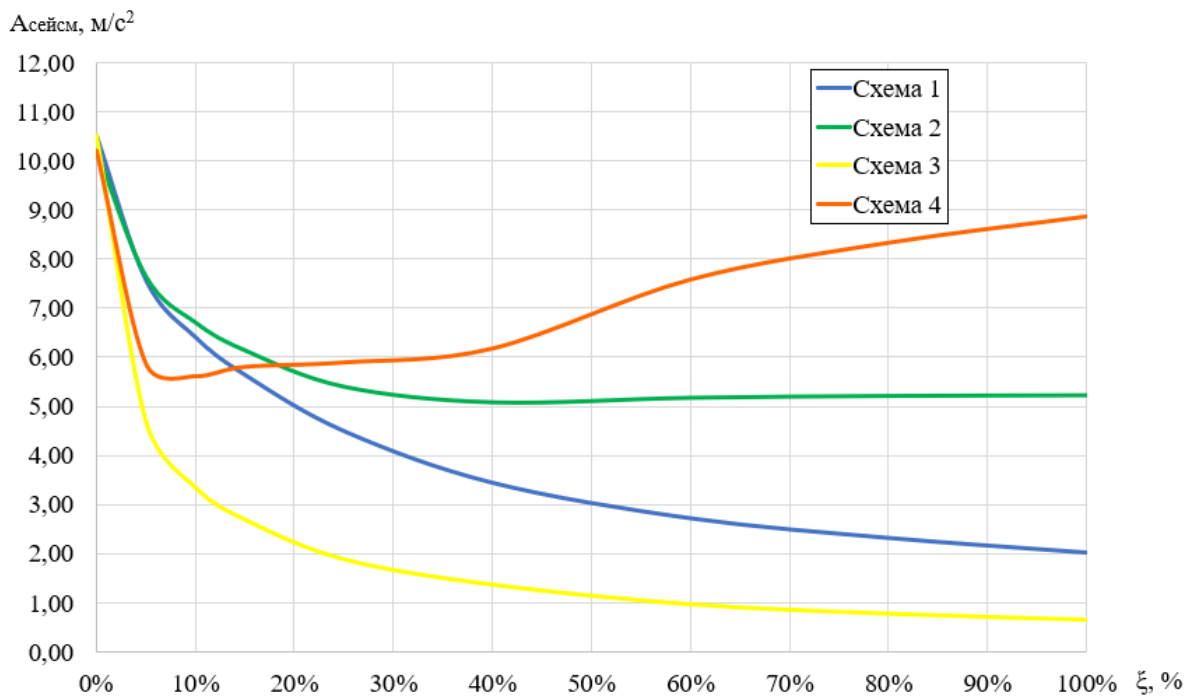


**Рис. 7.** Положение анализируемых узлов по высоте здания  
**Fig. 7.** The position of the analyzed nodes according to the height of the building



**Рис. 8.** Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне верхней фундаментной плиты в зависимости от величины относительного затухания

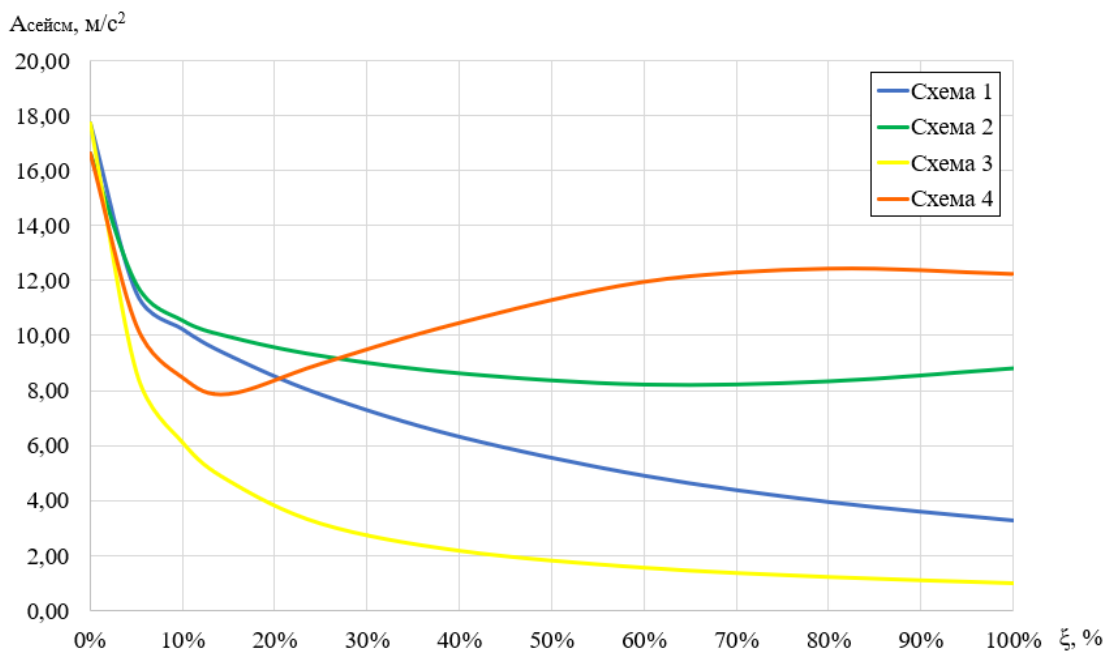
**Fig. 8.** The values of the maximum seismic accelerations along the X axis at the node at the level of the upper foundation plate, depending on the relative damping value



**Рис. 9.** Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне перекрытия 4-го этажа в зависимости от величины относительного затухания

**Fig. 9.** The values of the maximum seismic accelerations along the X-axis at the node at the 4th floor level, depending on the relative damping value





**Рис. 10.** Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне плиты покрытия в зависимости от величины относительного затухания

**Fig. 10.** The values of the maximum seismic accelerations along the X axis at the node at the level of the coating plate, depending on the relative damping value

Общий характер полученных графиков соответствует результатам, полученным при расчете упрощенных схем здания.

Наибольшая схожесть с графиками для упрощенных схем по абсолютным значениям наблюдается с графиком для узла в середине здания по высоте. Максимальные ускорения массы упрощенных схем при отсутствии демпфирования соответствуют значениям, полученным также для узла в середине здания по высоте. Значения полученные для узлов в уровне плиты покрытия значительно отличаются от значений для упрощенных схем в большую сторону. Соответственно, использование упрощенных схем не применимо для оценки значений максимальных ускорений верхних точек здания.

Вне зависимости от расположения рассматриваемого узла видно, что при расчете схем 1 и 3, не учитывающих параметры грунтового основания, результаты ускорений при увеличении количества демпферов занижены по сравнению с результатами для схем 2 и 4. Схемы 1 и 3 не в полной мере отражают характер работы конструкции и требования норм по расчету зданий совместно с основанием. Заниженные результаты в данном случае могут привести к ошибкам в проектировании сейсмоизоляции здания.

Аналогично результаты расчета схемы 2 и 4 также показывают расхождения в результатах. В случае использования модели с учетом частотно-зависимых характеристик демпферов (схема 4) минимальные значения ускорений для всех точек здания лежат в интервале относительного демпфирования от 5% до 25%. Для верхних точек здания минимальные значения ускорения соответствуют относительному демпфированию 70%. Значения ускорений при таком же демпфировании модели с учетом частотно-зависимых характеристик отличаются в 1,5 раза.

Соответственно, использование линейной модели демпферов может привести к подбору неправильного количества элементов сейсмоизоляции и достижению обратного эффекта: значительному увеличению максимальных ускорений, по сравнению с ожидаемыми.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполняя сейсмические расчеты зданий и сооружений с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией, необходимо учитывать параметры, наиболее точно соответствующие реальной работе конструкций, подтвержденные экспериментальными данными. Для предотвращения критических ошибок в расчетах, следует учитывать динамические характеристики грунтового основания, а также частотные зависимости динамических жесткостей и демпфирований, используя четырех-параметрическую модель Максвелла.

С помощью упрощенных схем возможно приближенно оценить значения ускорений точек здания, а также примерно определить оптимальное значение относительного затухания для последующего

уточнения в трехмерной расчетной схеме и проектирования системы сейсмоизоляции. При использовании упрощенной схемы оптимальное относительное затухание лежит в интервале от 5% до 25%, что соответствует минимумам для разных точек здания. Использование 3Д расчетной схемы необходимо для учета геометрии конструкций и распределения жесткостей при анализе ускорений наиболее важных точек здания. Максимальные ускорения в узле верха здания отличаются от ускорений массы упрощенной схемы в 2 -2,5 раза.

При анализе графика относительное затухание для наиболее детализированной 4-й схемы наблюдается локальный минимум в интервале от 5% до 25%, позволяющий подобрать необходимое количество демпферов в системе сейсмоизоляции. Данный эффект наблюдается и при расчёте упрощенной схемы и при рассмотрении трехмерной схемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belash T.A., Belashov M.S. The use of damping devices to increase the seismic resistance of frame buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sochi, 06–12 September 2020. Sochi, 2020. P. 022068. DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022068. EDN: GYXBFN
2. Белаш Т.А., Ерохина Е.Д. Повышение сейсмостойкости эксплуатируемых зданий с использованием специальных методов сейсмозащиты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 3. С. 41-48. DOI 10.37153/2618-9283-2021-3-41-48. EDN QOEUIС
3. Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36-49. DOI 10.37153/2618-9283-2021-5-36-49. EDN LCJNOS
4. Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 30-41. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41. EDN RSXRRN
5. Костарев В.В., Павлов Д.Ю., Васильев П.С., Щукин А.Ю., Берковский А.М. Обеспечение сейсмостойкости и повышения надежности и ресурса трубопроводов с использованием технологии высоковязкого демпфера // ASSISi. 2011. № 1. С. 31–35
6. Kostarev V.V., Petrenko A.V., Vasilyev P.S. An advanced seismic analysis of an NPP powerful turbogenerator on an isolation pedestal // Nuclear engineering and design. 2007. Vol. 237. № 12–13. P. 1315–1324
7. Nawrotzki P., Kostarev V., Siepe D., Barutzki F., Salcedo V. 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification // SMIRT-26, Berlin/Potsdam, 10-15 July 2022. Berlin, 2022. P. 1-9.
8. Nawrotzki P., Kostarev V., Vasilyev P., Vaindrakh M. Seismic dynamic analysis, optimization, testing and probabilistic safety assessment of an innovative 3D seismic base isolation system for important structures // Proc. of the TINCE-2018 – Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering, Paris, France, 29-31 August 2018, Paris, 2018. P. 27-33
9. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость // СПб: Наука. 1998. 255 с.
10. Белаш Т.А., Травин С.М. О Возможности использования существующих методов учета грунтового основания при динамических расчетах строительных конструкций // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1(44). С. 48-50. EDN: EWNEUH

#### ОБ АВТОРАХ

**Борис Олегович Гапоненко** – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: boris.ddy@yandex.ru

**Владимир Александрович Тарасов** – к.т.н., старший преподаватель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: vtarasov1000@yandex.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Boris O. Gaponenko** – master's degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: boris.ddy@yandex.ru

**Vladimir A. Tarasov** – Ph.D., senior lecturer. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: vtarasov1000@yandex.ru