

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029

Динамическое гашение колебаний конструкций высотных зданий ствольно-подвесного типа при сейсмических воздействиях

Илья Владимирович Свитлик¹, Татьяна Александровна Белаш²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Ствольно-подвесные здания обладают рядом важных конструктивных особенностей, заключающихся в повышенной гибкости их несущих элементов. Это может быть использовано для снижения сейсмической нагрузки на конструкции высотных зданий. Однако технические сложности возведения, а также методы расчета, не позволявшие получить данные о поведении подвесных конструкций при сейсмическом воздействии, послужили препятствием для применения ствольно-подвесной системы при строительстве высотных зданий. Другим подходом к обеспечению сейсмической защиты высотных зданий является устройство динамических гасителей колебаний. Подвесные конструкции в зданиях с несущим стволем потенциально могут выполнять роль динамических гасителей колебания. Современные методы расчета математических моделей дают возможность проверить это предположение. Представлено новое конструктивное решение ствольно-подвесного здания, а также дана оценка влияния инженерных параметров подвешенной части здания на его сейсмостойкость.

Материалы и методы. Численное моделирование зданий с предлагаемым конструктивным решением в условиях сейсмического воздействия выполнено в программном комплексе ЛИРА во временной области в шаговой нелинейной постановке. Эффективность применения рассматриваемого конструктивного решения здания оценивается на основе данных о перемещениях и ускорениях несущих конструкций при сейсмическом воздействии.

Результаты. Обнаружены закономерности влияния величины продольной жесткости упругих связей и массы верхнего подвешенного блока этажей на перемещения и ускорения несущих конструкций здания. На основе сравнительного анализа сведений о деформированном состоянии сооружения в ходе сейсмического воздействия определены оптимальные параметры подвешенных конструкций, позволяющие снизить колебания всего здания.

Выводы. Изменение массы подвешенных этажей и жесткости связей между элементами ствольно-подвесного здания может привести к снижению перемещений и ускорений несущих конструкций, гашению колебаний системы. Дальнейшие исследования могут быть посвящены аналитическому определению оптимальных параметров подвешенных конструкций, обеспечивающих восприятие и рассеивание колебательной энергии сейсмического воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высотные здания, подвесные конструкции, динамические гасители колебаний, сейсмические воздействия, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Свитлик И.В., Белаш Т.А. Динамическое гашение колебаний конструкций высотных зданий ствольно-подвесного типа при сейсмических воздействиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1017–1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029

Автор, ответственный за переписку: Илья Владимирович Свитлик, svitlik.i@yandex.ru.

Dynamic damping of vibrations of structures of high-rise buildings of trunk-suspension type under seismic effects

Ilya V. Svitlik¹, Tatiana A. Belash²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation;

² Research Center “Construction”; Moscow, Russian Federation;

ABSTRACT

Introduction. Suspended buildings with rigid core have a number of important design features, which consist in increased flexibility of their load-bearing elements. This can be used to reduce the seismic load on the structures of high-rise buildings. However, the technical difficulties of construction, as well as calculation methods that did not allow receiving data on the be-

haviour of suspended structures under seismic impact, served as an obstacle to the use of this system in the construction of high-rise buildings. Another approach to providing seismic protection for high-rise buildings is the installation of dynamic absorbers. Suspended structures in buildings with a rigid core can potentially act as dynamic absorbers. Modern methods of calculating mathematical models allow us to verify this assumption. This paper presents a new design solution for a suspended building with a rigid core, as well as an assessment of the influence of engineering parameters of the suspended part of the building on its seismic resistance.

Materials and methods. Numerical modelling of buildings with the proposed design solution under seismic impact was performed in the LIRA software package in a stepwise nonlinear setting. The effectiveness of the considered structural solution of the building is evaluated on the basis of data on the movements and accelerations of load-bearing structures under seismic impact.

Results. The patterns of the influence of the longitudinal stiffness of elastic links and the mass of the upper suspended block of floors on the displacement and acceleration of load-bearing structures of the building were found. A comparative analysis of deformation state of the structure during seismic action was performed, the optimal parameters of suspended structures were determined, allowing to reduce vibrations of the entire building.

Conclusions. A change in the mass of suspended floors and the rigidity of the connections between the elements of suspended building can lead to a decrease in displacements and accelerations of structures and damping system vibrations. Further research can be devoted to the analytical determination of the optimal parameters of suspended structures that ensure the dispersion of seismic action energy.

KEYWORDS: high-rise buildings, suspended structures, dynamic absorbers, seismic impacts, numerical modelling

FOR CITATION: Svitlik I.V., Belash T.A. Dynamic damping of vibrations of structures of high-rise buildings of trunk-suspension type under seismic effects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1017-1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029 (rus.).

Corresponding author: Ilya V. Svitlik, svitlik.i@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Несущие системы высотных зданий различаются по способу передачи нагрузки от перекрытий к фундаменту. В зданиях ствольной конструктивной системы ядро жесткости является основной несущей конструкцией, воспринимающей все вертикальные и горизонтальные нагрузки. Одна из разновидностей данной системы — ствольно-подвесная система, которой присуща передача нагрузки от перекрытий к стволу при помощи растянутых элементов. На рис. 1 показаны здания, в которых была воплощена ствольно-подвесная конструктивная система.

Высотные здания с несущим стволом вошли в практику строительства прежде всего благодаря их удачной планировочной схеме и рациональному использованию уличного пространства у подножия здания. При этом здания ствольно-подвесного типа

имеют другое важное достоинство, которое заключается в малой изгибной жесткости несущих элементов. Сооружения, спроектированные с учетом повышенной податливости конструкций, обладают лучшей сейсмостойкостью. Период собственных колебаний ствольно-подвесных зданий может превышать одну секунду, что позволяет снизить сейсмическую нагрузку на несущие элементы. Однако это свойство способно привести к негативным эффектам, которые выражаются в значительных смещениях подвешенных конструкций при сейсмических воздействиях низкочастотного характера [1, 2].

Один из подходов, обеспечивающих сопротивляемость сооружений землетрясениям, — устройство в них динамических гасителей колебаний. Эффект динамического гашения колебаний хорошо известен в динамике сооружений. Идея динамического гасителя состоит в том, что к колеблющемуся



Рис. 1. Возведенные здания: а — BP Building, г. Антверпен; б — Qube, г. Ванкувер; в — Tour Totem, г. Париж; д — Stalexport, г. Катовице

Fig. 1. Buildings erected: a — BP Building, Antwerp; b — Qube, Vancouver; c — Tour Totem, Paris; d — Stalexport, Katowice

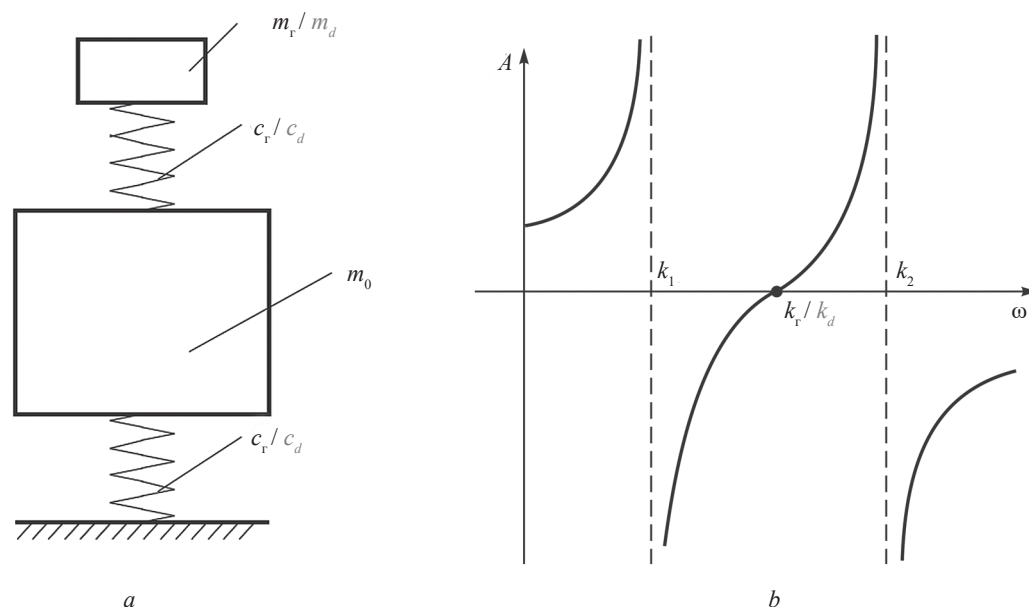


Рис. 2. Динамический гаситель колебаний: *a* — принципиальная схема; *b* — амплитудно-частотная характеристика
Fig. 2. Tuned mass damper: *a* — schematic diagram; *b* — amplitude-frequency response

объекту с помощью упругой связи присоединяют дополнительную массу (рис. 2, *a*).

Можно добиться полной остановки колеблющегося объекта. Для этого необходимо, чтобы парциальная частота колебаний гасителя равнялась частоте возмущающей силы:

$$k_r = \sqrt{c_r/m_r},$$

где c_r — жесткость гасителя; m_r — масса гасителя.

Этот эффект проиллюстрирован на рис. 2, *b*. На оси ординат отмечены частоты собственных колебаний системы k_1 и k_2 , а также парциальная частота колебаний гасителя.

В 1976 г. А.И. Цейтлиным было впервые предложено конструктивное решение, в котором в роли гасящей массы выступает гибкий верхний этаж, связанный с верхними конструкциями здания посредством гибкой связи [3]. Роль гибкой связи выполняют гибкие стойки. К стойкам подвешиваются легкие навесные стены. Здание с гибким верхним этажом впервые построено в г. Кировакане (Армения). Для гашения колебания опор мостов в качестве гасящей массы может служить пролетное строение. Эта идея первый раз реализована А.М. Уздиным [4] и получила развитие в работах его учеников [5–11].

Зачастую гасители колебаний представлены в виде массивных блоков, соединенных с конструкцией здания при помощи пружин или демпфирующих элементов. Масса подобных блоков, а также жесткость их связи с защищаемым сооружением должны обеспечивать достижение антирезонанса: эффекта, при котором инерционная сила движения дополнительной массы компенсирует возмущающее сейсмическое воздействие на систему. Рассеивания энергии колебаний можно достичь за счет приме-

нения гасителя колебаний в виде резервуаров с водой, установленных на верхних этажах здания [12]. Известен подход к устройству гасителя колебаний, предполагающий внедрение в защищаемую конструкцию маятниковой системы из массивного элемента и пружин [13, 14]. Одним из наиболее известных инерционных демпферов является маятниковый подвес в виде стального шара массой 660 т, установленный в небоскребе Тайбэй 101 в уровне верхних этажей (рис. 3).

Положительное влияние настраиваемых гасителей колебаний с большим массовым соотношением на сейсмостойкость зданий подтверждено в ряде исследований [15–17]. Динамические гасители колебаний позволяют снизить отклик высотных зданий и объектов на вихревое ветровое возмущение [18, 19].

Установление оптимальных характеристик системы инерционных демпферов — сложная инженерная задача, для решения которой в настоящее время применяются различные методы оптимизации [20]. Для этого оценивается влияние соотношения масс гасителя и защищаемой конструкции на сейсмостойкость зданий при землетрясениях с различным частотным составом [21].

Устройство динамических гасителей колебаний в зданиях требует внедрения в их конструкцию дополнительных массивных элементов, занимающих внутренний полезный объем. В зданиях ствольно-подвесного типа часть элементов подвешена к конструкциям несущего ствола. Данные элементы могут выполнять роль маятниковых гасителей колебаний несущего ствола в случае определения оптимальных массы подвеса и жесткости его связей с ядром здания. Это предположение проверяется в настоящей статье.

91-й этаж — 390,6 м. Открытая смотровая площадка
91st floor — 390.6 m. Outdoor observation deck

89-й этаж — 382,2 м. Крытая смотровая площадка
89st floor — 382.2 m. Indoor observation deck

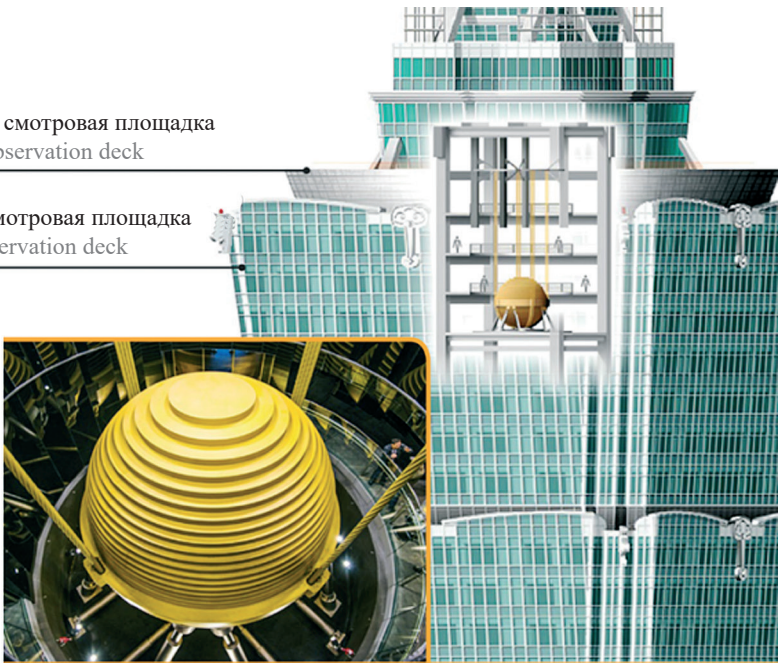


Рис. 3. Гаситель колебаний в здании Тайбэй 101
Fig. 3. Tuned mass damper in Taipei 101 building

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 4 приведено конструктивное решение здания ствольно-подвесного типа, призванное обеспечить его сопротивляемость сейсмическим воздействиям путем динамического гашения колебаний. Ключевое отличие рассматриваемой конструкции здания от известных решений заключается в том, что подвешенные этажи объединены в геометрически неизменяемые блоки с независимой подвеской к несущему оголовку.

Расчетная схема здания изменяется при сейсмическом воздействии за счет разрушения выключающихся связей между блоками этажей и несущим стволом. Каждый этажный блок в дальнейшем может выступать в роли инерционного демпфера, так как обладает отличными от ядра жесткости частотами собственных колебаний. Данное конструктивное решение дает возможность настроить оптимальную массу блоков этажей путем изменения количества плит перекрытий, входящих в их состав, или изменения толщины этих перекрытий. Жесткость связи несущего ствола с подвешенными конструкциями определяется жесткостью упругих элементов, установленных в зазоре между ними.

В качестве объекта моделирования выбрано 17-этажное здание с тремя блоками этажей (рис. 5). Диаметр ядра равен 19 м, наружный диаметр здания — 38 м. Высота этажа составляет 3,3 м. Материал несущих конструкций ствола и ростверка здания — бетон марки В45. Конструкции перегородок и подвешенных плит перекрытий выполнены из бетона класса В30. В качестве несущих подвесок применены стальные канаты.

Стержневые железобетонные и стальные элементы состоят из универсальных конечных элементов (КЭ) пространственного стержня, элементы в виде пластин — из элементов тонкой оболочки. Всем под-

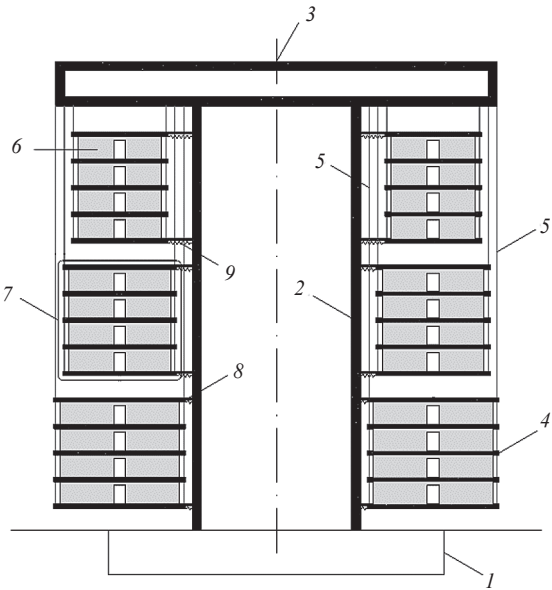


Рис. 4. Здание с подвешенными блоками этажей: 1 — фундамент; 2 — несущий ствол; 3 — консольный ростверк; 4 — плиты перекрытий; 5 — подвески; 6 — диафрагмы жесткости; 7 — геометрически неизменяемые блоки этажей; 8 — выключающиеся связи; 9 — упругие связи
Fig. 4. A building with suspended floor blocks: 1 — foundation; 2 — rigid core; 3 — cantilever; 4 — floor slabs; 5 — suspensions; 6 — stiffening diaphragms; 7 — stable floor blocks; 8 — switching connections; 9 — elastic connections

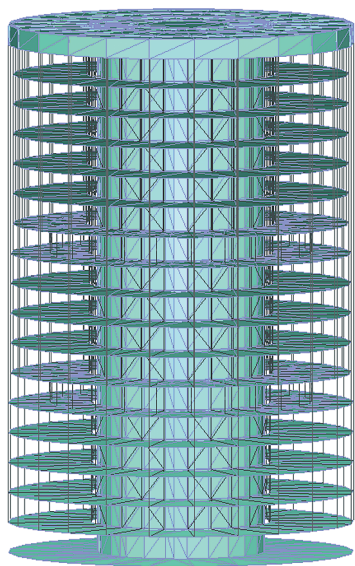


Рис. 5. Расчетная модель здания
Fig. 5. Calculation model of the building

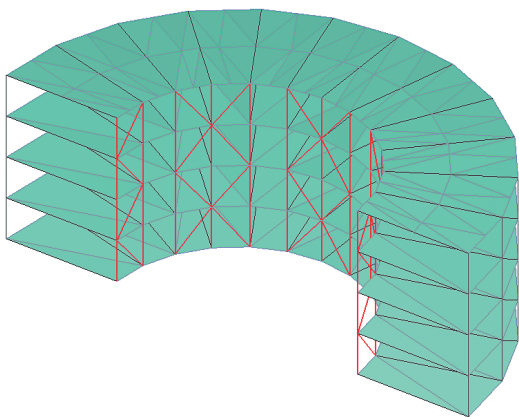


Рис. 6. Фрагмент расчетной модели с элементами пространственной жесткости
Fig. 6. A fragment of the calculation model with elements of spatial rigidity

Табл. 1. Масса верхнего подвешенного блока этажей
Table 1. The mass of the upper suspended floor block

Толщина перекрытий блока этажей, мм The thickness of the slabs of the floor block, mm	Масса надземной части здания, т The mass of the above-ground part of the building, t	Масса блока этажей, т The mass of the floor block, t	Относительная масса блока этажей, % Relative mass of a floor block, %
100	27 086	2408	8,9
200	28 286	3607	12,8
400	30 685	6006	19,6
600	33 084	8406	25,4
800	35 484	10 805	30,5
1000	37 883	13 204	34,9

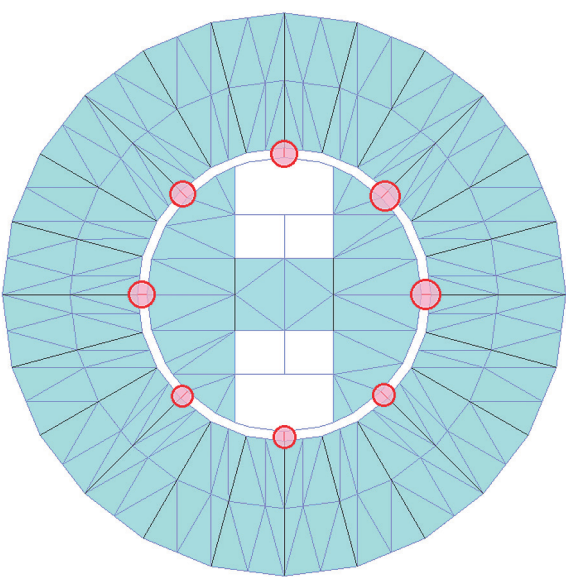


Рис. 7. Поперечное сечение расчетной модели с местами установки упругих элементов
Fig. 7. Cross-section of the calculation model with the locations of the elastic elements

вескам был задан тип геометрически нелинейного КЭ «нить».

Плиты перекрытий объединены в блоки при помощи пространственной решетчатой системы, изготовленной из элементов трубного проката (рис. 6). Места установки упругих связей в плане между несущим стволом и подвешенными перекрытиями представлены на рис. 7.

Для анализа влияния параметров подвешенных элементов на сейсмостойкость здания выбрана конструкция верхнего этажного блока, так как в уровне верхних этажей перемещения несущего ствола достигают наибольших значений. Масса блока этажей варьировалась в зависимости от толщины плит перекрытий, входящих в его состав (табл. 1).

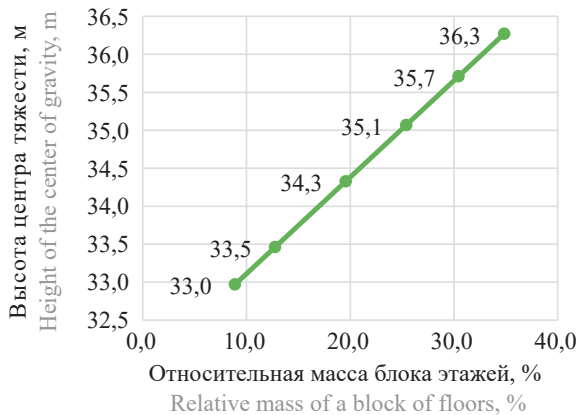


Рис. 8. Зависимость высоты центра тяжести здания от относительной массы верхнего подвешенного блока этажей

Fig. 8. Dependence of the height of the building's centre of gravity on the relative mass of the upper suspended floor block

Высота центра тяжести здания возрастает пропорционально увеличению относительной массы этажного блока (рис. 8).

Жесткость упругих связей принимала значения в диапазоне от 0 до 100 т/м.

К элементам расчетных моделей прикладывалась постоянная нагрузка, кратковременная нагрузка от людей и оборудования, а также особая нагрузка в виде нагрузки от землетрясения. Сейсмическое воздействие задавалось при помощи инструментальной трехкомпонентной сейсмограммы землетрясения, произошедшего в г. Цзицзи в 1999 г. (рис. 9). Для него характерно преобладание колебаний с периодом более одной секунды, отчего данное землетрясение можно условно отнести к низкочастотным. Колебания грунтового основания в подобном частотном диапазоне представляют наибольшую угрозу для целостности ствольных зданий подвешенного типа.

Численное моделирование зданий в условиях сейсмического воздействия выполнено в программ-

ном комплексе ЛИРА версии 10.12 во временной области в шаговой нелинейной постановке.

Эффективность применения рассматриваемого конструктивного решения здания ствольного-подвешенного типа оценивается на основе данных о перемещениях и ускорениях несущих конструкций при сейсмическом воздействии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сведения о перемещениях и ускорениях конструкций, полученные в ходе численного моделирования рассматриваемых зданий, сравнивались с результатами расчетов здания с жесткой связью подвешенных блоков этажей с несущим стволом (рис. 10).

В качестве примера на рис. 11 приведена диаграмма максимальных перемещений элементов расчетной модели, в которой используются перекрытия толщиной 200 мм и отсутствуют упругие связи.

Было выявлено, что изменение продольной жесткости упругих связей практически не влияет на перемещения несущего ствола здания (табл. 2). При этом перемещения ядра здания могут быть снижены посредством изменения массы верхнего этажного блока: увеличение его относительной массы с 12,8 до 19,6 % привело к снижению перемещения несущего ствола на 3,1 % (рис. 12).

На значения перемещений подвешенных перекрытий влияют как их масса, так и жесткость их связей с несущим стволом (табл. 3). Перемещения подвешенного блока этажей, в состав которого входят перекрытия толщиной 400 мм, на 21,8 % ниже перемещений перекрытий, жестко связанных с несущим стволом (рис. 13).

Зданиям с большей относительной массой подвешенного блока этажей соответствуют меньшие значения ускорений конструкций ядра жесткости (табл. 4). Это может свидетельствовать о том, что при сейсмическом воздействии несущие элементы

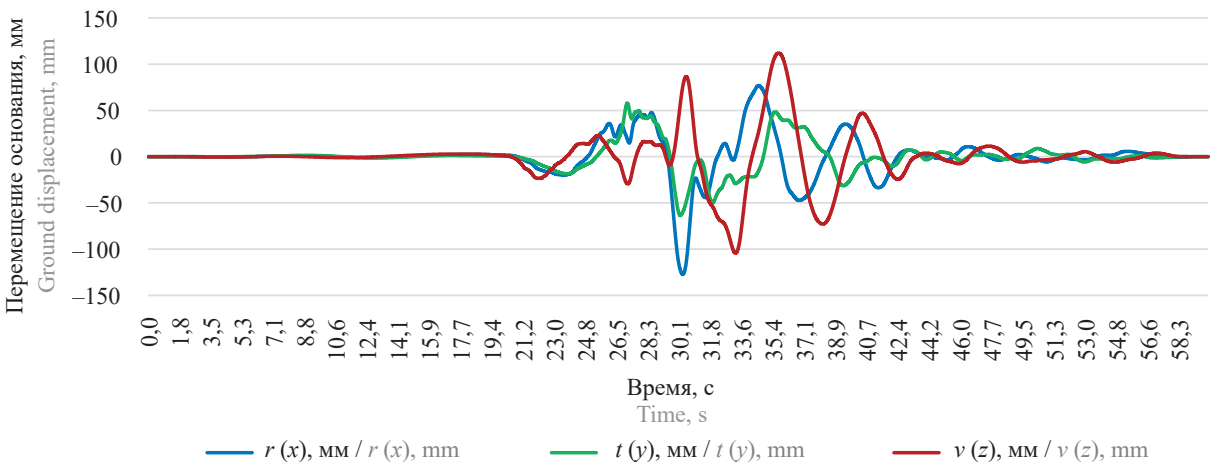


Рис. 9. Сейсмограмма землетрясения в г. Цзицзи, Тайвань

Fig. 9. Seismogram of earthquake in Jiji, Taiwan

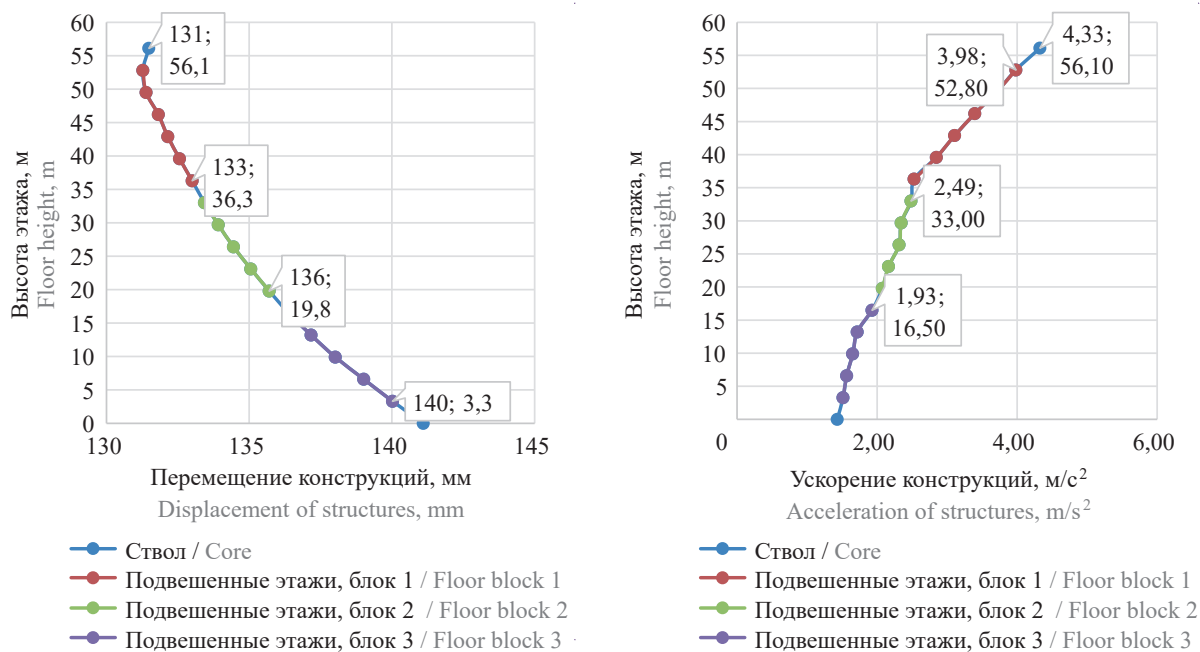


Рис. 10. Максимальные перемещения и ускорения конструкций расчетной модели с жесткой связью подвешенных блоков с несущим стволom при толщине перекрытий 200 мм

Fig. 10. Maximum displacements and accelerations of structures of the calculation model with a rigid connection between suspended blocks and core with a floor thickness of 200 mm

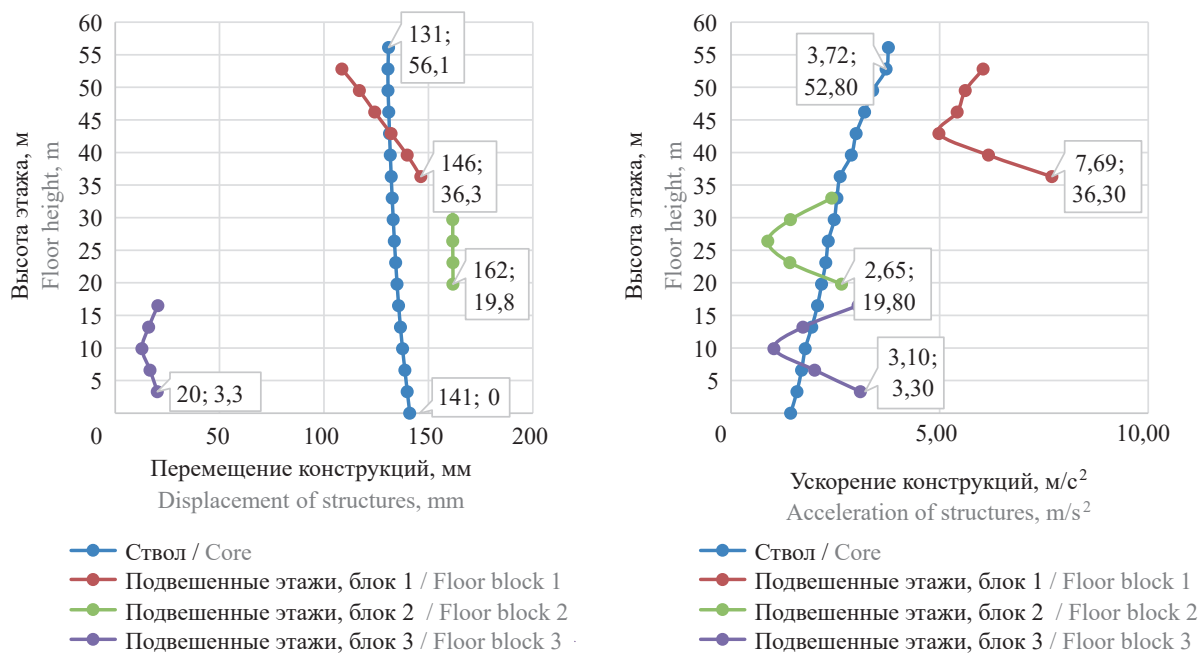


Рис. 11. Максимальные перемещения и ускорения конструкций расчетной модели без устройства упругих связей при толщине перекрытий 200 мм

Fig. 11. Maximum displacements and accelerations of the calculation model structures without elastic connections with a floor thickness of 200 mm

в них испытывают меньшую нагрузку. Во всех рассматриваемых случаях отсутствие жесткой связи подвешенных конструкций с несущим стволom приводит к уменьшению ускорений его конструкций вплоть до 20,1 % (рис. 14).

Увеличение относительной массы подвешенных конструкций также привело к уменьшению их ускорений при сейсмическом воздействии (табл. 5). Повышение жесткости упругих связей также привело к снижению максимальных ускорений подвешенных

Табл. 2. Максимальные горизонтальные перемещения конструкций несущего ствола в уровне верхнего этажа, мм
Table 2. The maximum horizontal displacement of the structures of the rigid core at the level of the upper floor, mm

		Относительная масса блока этажей M , % Relative mass of a floor block M , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	131	131	127	136	135	129
	25	129	131	127	135	135	129
	50	129	131	127	135	135	129
	75	129	131	127	135	135	129
	100	129	132	128	135	135	130



Рис. 12. Перемещения стволос расчетных моделей при $M = 12,8\%$ с жесткими связями и при $M = 19,6\%$ с упругими связями $R = 25$ тс/м

Fig. 12. Movements of the cores of the calculation models at $M = 12.8\%$ with rigid connections and at $M = 19.6\%$ with elastic connections $R = 25$ t/m

Табл. 3. Максимальные горизонтальные перемещения конструкций подвешенного блока этажей, мм
Table 3. The maximum horizontal displacement of the structures of the suspended floor block, mm

		Относительная масса блока этажей M , % Relative mass of a floor block M , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	146	146	104	148	134	181
	25	447	335	172	161	137	182
	50	284	449	402	302	329	205
	75	402	284	454	418	338	328
	100	405	315	406	456	413	367

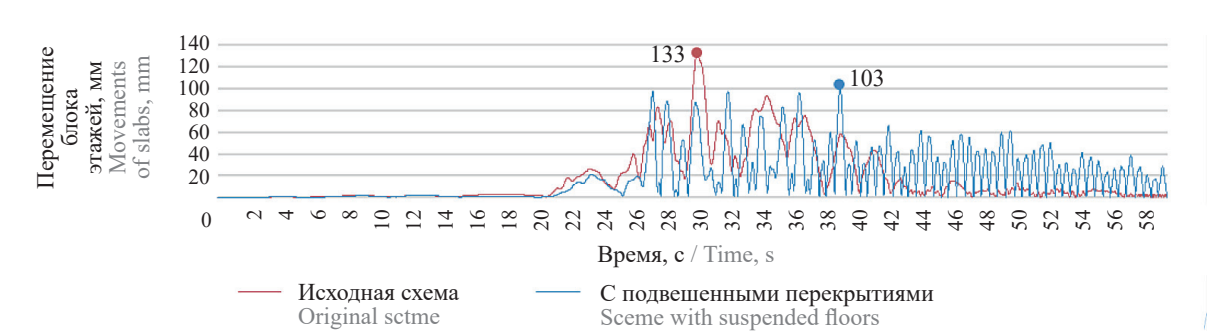


Рис. 13. Перемещения перекрытий расчетных моделей при $M = 12,8\%$ с жесткими связями и при $M = 19,6\%$ с $R = 0$ тс/м

Fig. 13. Movements of the slabs of the calculation models at $M = 12.8\%$ with rigid connections and at $M = 19.6\%$ with $R = 0$ t/m

Табл. 4. Максимальные горизонтальные ускорения конструкций несущего ствола в уровне верхнего этажа, м/с²
Table 4. The maximum horizontal accelerations of the structures of the rigid core at the level of the upper floor, m/s²

		Относительная масса блока этажей M , % Relative mass of a floor block M , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	3,78	3,78	3,68	3,58	3,56	3,57
	25	3,75	3,71	3,67	3,64	3,66	3,56
	50	3,72	3,79	3,66	3,58	3,52	3,55
	75	3,72	3,69	3,66	3,61	3,47	3,53
	100	3,72	3,71	3,65	3,64	3,46	3,52



Рис. 14. Ускорения стволов расчетных моделей при $M = 12,8\%$ с жесткими связями и при $M = 30,5\%$ с упругими связями $R = 100$ тс/м
Fig. 14. Accelerations of the cores of the calculation models at $M = 12.8\%$ with rigid connections and at $M = 30.5\%$ with elastic connections $R = 100$ t/m

Табл. 5. Максимальные горизонтальные ускорения конструкций подвешенного блока этажей, м/с²
Table 5. The maximum horizontal accelerations of the structures of the suspended floor block, m/s²

		Относительная масса блока этажей M , % Relative mass of a floor block M , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	7,69	7,69	4,23	4,38	3,43	3,6
	25	10,35	8,17	4,14	4,37	3,43	3,54
	50	11,31	8,52	4,05	4,25	3,44	3,48
	75	11,58	8,57	4,03	4,2	3,47	3,4
	100	10,89	8,86	4,02	4,33	3,5	3,4

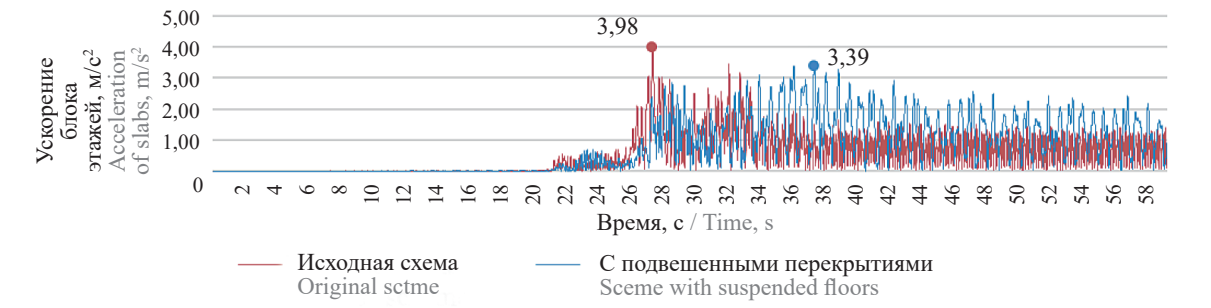


Рис. 15. Ускорения перекрытий расчетных моделей при $M = 12,8\%$ с жесткими связями и при $M = 34,9\%$ с упругими связями $R = 100$ тс/м
Fig. 15. Accelerations of the slabs of the calculation models at $M = 12.8\%$ with rigid connections and at $M = 34.9\%$ with elastic connections $R = 100$ t/m

элементов. Ускорения конструкций блока этажей с относительной массой 34,9 % при жесткости упругих связей 100 т/м на 55,8 % ниже ускорений перекрытий, жестко связанных с несущим стволом (рис. 15).

Стоит отметить, что при упругой связи перекрытий со стволом в здании колебания несущих элементов затухают медленнее, чем при жесткой связи конструкций (рис. 13–15). В условиях продолжительного сейсмического воздействия применение подвешенных конструкций может привести к негативным последствиям, выраженным в нарушении целостности несущих элементов. В этой связи целесообразно использовать в зданиях ствольно-подвесного типа демпфирующие устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве гасящей массы целесообразно использовать части самой защищаемой конструкции. Эта идея может быть реализована в зданиях ствольно-подвесной системы. Конструкцию верхних подвешенных этажей можно условно принимать как элемент конструкции гасителя колебаний, а подвески рассматривать в качестве гибкой связи непосредственно

со зданием. При этом обеспечить условия эффективной настройки такого гасителя с учетом вышеизложенных рекомендаций к классическому варианту динамического гасителя достаточно сложно, учитывая непредсказуемый и сложный характер землетрясения. Однако роль верхних подвешенных этажей в общей системе повышения сейсмостойкости здания рассматриваемого типа может быть существенной.

Перемещения конструкций здания, в котором относительная масса подвешенного блока этажей достигала 19,6 %, принимали наименьшие значения.

Зданиям с большей массой подвешенных конструкций соответствовали меньшие значения ускорений несущих элементов.

Изменение массы подвешенных элементов и жесткости связей между конструкциями ствольно-подвесного здания может привести к гашению колебаний системы.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены аналитическому определению оптимальных инженерных параметров подвешенных конструкций, обеспечивающих восприятие и рассеивание колебательной энергии сейсмического воздействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Belash T., Svitlik I. Damping of Structures of Earthquake-Resistant Suspended Buildings // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 289–297. DOI: 10.1007/978-3-031-21120-1_28*
2. *Белаш Т.А., Свитлик И.В. К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвесного типа в районах высокой сейсмической активности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 2. С. 54–66. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66. EDN XPGUVQ.*
3. *Цейтлин А.И., Ким Л.И. Сейсмические колебания многоэтажного здания с «гибким» верхним этажом // Снижение материалоемкости и трудоемкости сейсмостойкого строительства : тез. докл. Всесоюзного совещания. 1982. 85 с.*
4. *Белаш Т.А., Беляев В.С., Уздин А.М., Ермошин А.А., Кузнецова И.О. Сейсмоизоляция. Современное состояние // Избранные статьи профессора О.А. Савинова и ключевые доклады, представленные на четвертые Савиновские чтения. 2004. С. 95–128.*
5. *Уздин А.М., Нестерова О.П., Федорова М.Ю., Гуан Ю.Х. Особенности расчетного обоснования параметров динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты зданий и сооружений // XIV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию : мат. науч.-практ. конф. 2021. С. 135–136. DOI: 10.37153/2687-0045-2021-14-135-136. EDN HGYZHA.*
6. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Федорова М.Ю. Особенности применения динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты зданий и сооружений // IX Поляховские чтения : мат. Междунар. науч. конф. по механике. 2021. С. 119–121. EDN OUDZYG.*
7. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Фрезе М.В. Учет демпфирования при подборе параметров динамических гасителей сейсмических колебаний // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 5 (60). С. 35–42. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.60.5.002. EDN CUDKGF.*
8. *Нестерова О.П., Уздин А.М. Особенности подбора динамических гасителей колебаний (ДГК) сейсмических колебаний при сильных землетрясениях // Архитектура – строительство – транспорт : мат. 74-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, в 2 частях. 2018. С. 43–48. EDN WYYHZB.*
9. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Ухова Н.Ю., Фролова Е.Д., Фрезе М.В., Гуань Ю. Об одном способе повышения сейсмостойкости портовых причалов // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 3 (58). С. 26–28. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.58.3.003. EDN USNBSY.*
10. *Сафронова В.Ю., Пронина А.А., Уздин А.М. Эффективность надстройки гибкого верхнего этажа для повышения сейсмостойкости зданий на нескальных основаниях // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 483–487. EDN ANOOZD.*

11. Желиостов Д.А., Медведева А.А., Уздин А.М., Ухова Н.Ю., Нестерова О.П. Некоторые особенности подбора параметров двухмассовых динамических гасителей сейсмических колебаний // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2023. № 1 (62). С. 27–31. DOI: 10.55341/ptrbs.2023.62.1.006. EDN LUEGHZ.

12. Vaghela V., Patel V., Bhatt P. Behavior of Structures Under Dynamic Loading Having Water Tank Designed as Tuned Mass Damper // International Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 9. Issue 6. Pp. 62–71. DOI: 10.14445/23488352/ijce-v9i6p106

13. Maddah Sadatieh M.S., Ghorbani-Tanha A.K. An innovative semi-active pendulum tuned mass damper and its application in vibration control // Journal of Vibration and Control. 2023. Vol. 29. Issue 7–8. Pp. 1820–1832. DOI: 10.1177/10775463211070903

14. Xiang Y., Tan P., He H., Shang J., Zhang Y. Seismic optimization of variable friction pendulum tuned mass damper with hysteretic damping characteristic // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2022. Vol. 160. P. 107381. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107381

15. Kang Y., Peng L., Pan P., Wang H., Xiao G. Seismic performances of a structure equipped with a large mass ratio multiple tuned mass damper // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2020. Vol. 29. Issue 17. DOI: 10.1002/tal.1803

16. Prakash Sh., Jangid R.S. Optimum parameters of tuned mass damper-inerter for damped structure un-

der seismic excitation // International Journal of Dynamics and Control. 2022. Vol. 10. Issue 5. Pp. 1322–1336. DOI: 10.1007/s40435-022-00911-x

17. Fahimi Farzam M., Hojat Jalali H. Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads // Structural Control and Health Monitoring. 2022. Vol. 29. Issue 9. DOI: 10.1002/stc.2987

18. Rahman S., Jain A.K., Jha K.N., Bharti S.D., Datta T.K. Response control of chimneys using tuned mass damper, multi-tuned mass damper and tuned mass inerter system // Structures. 2024. Vol. 69. P. 107526. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107526

19. Dirbas W., Diken H., Alnefaie K. The Effect of Tuned Mass Damper Mass Ratio on Wind Turbine Vibration Mitigation // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2024. Vol. 14. Issue 6. Pp. 18388–18394. DOI: 10.48084/etasr.9170

20. Akbari-Helm M., Massoudi M.S. A comparison of deterministic and reliability-based optimization of tuned mass damper under uncertainties // Asian Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 23. Issue 2. Pp. 203–217. DOI: 10.1007/s42107-022-00418-y

21. Araz O. Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction // Archive of Applied Mechanics. 2022. Vol. 92. Issue 10. Pp. 2951–2971. DOI: 10.1007/s00419-022-02217-y

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 10 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 26 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илья Владимирович Свитлик** — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; Scopus: 57486237400, ResearcherID: GQA-5384-2022, ORCID: 0000-0003-2878-4938; svitlik.i@yandex.ru;

Татьяна Александровна Белаш — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; SPIN-код: 5217-7177, РИНЦ ID: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru.

Вклад авторов:

Свитлик И.В. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Белаш Т.А. — идея и концепция исследования, научное руководство, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belash T., Svitlik I. Damping of Structures of Earthquake-Resistant Suspended Buildings. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 289-297. DOI: 10.1007/978-3-031-21120-1_28

2. Belash T.A., Svitlik I.V. On the issue of improving the seismic resistance of suspended buildings in ar-

eas of high seismic activity. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2023; 2:54-66. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66. EDN XPGUVQ. (rus.).

3. Zeitlin A.I., Kim L.I. Seismic vibrations of a multi-storey building with a “flexible” upper floor. *Reducing the material consumption and labor inten-*

sity of earthquake-resistant construction : abstracts of the All-Union Meeting. 1982; 85. (rus.).

4. Belash T.A., Belyaev V.S., Uzdin A.M., Ermoshin A.A., Kuznetsova I.O. Seismic isolation. Current status. *Selected articles by Professor O.A. Savinov and key reports presented at the fourth Savinov Readings*. 2004; 95-128. (rus.).

5. Uzdin A.M., Nesterova O.P., Fedorova M.Yu., Guan Yu.Kh. Features of the calculation substantiation of the parameters of dynamic vibration dampers for seismic protection of buildings and structures. *XIV Russian National Conference on Earthquake Engineering and Seismic Zoning: materials of the scientific and practical conference*. 2021; 135-136. DOI: 10.37153/2687-0045-2021-14-135-136. EDN HGYZHA. (rus.).

6. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Features of the use of dynamic vibration dampers for seismic protection of buildings and structures. *IX Polyakhov readings: proceedings of the international scientific conference on mechanics*. 2021; 119-121. EDN OUDZYG. (rus.).

7. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Frese M.V. Accounting for damping in the selecting parameters of mass dampers. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2022; 5(60):35-42. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.60.5.002. EDN CUDKGF. (rus.).

8. Nesterova O.P., Uzdin A.M. Specifics of selecting dynamic absorbers (DAS) of seismic vibrations in case of severe earthquakes. *Architecture-construction-transport : materials of the 74th scientific conference of the University's faculty and graduate students, in 2 parts*. 2018; 43-48. EDN WYYHZB. (rus.).

9. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Ukhova N.Yu., Frolova E.D., Frese M.V., Guan Yu. About one way to increase seismic resistance of port berths. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2022; 3(58):26-28. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.58.3.003. EDN USNBSY. (rus.).

10. Safronova V.Y., Pronina A.A., Uzdin A.M. Efficiency of superstructure of flexible upper floor to increase seismic resistance of buildings on non-rock bases. *Scientifically technical and economical cooperation in Asia-pacific countries in the 21st century*. 2022; 1:483-487. EDN ANOOZD. (rus.).

11. Zheliostov D.A., Medvedeva A.A., Uzdin A.M., Ukhova N.Yu., Nesterova O.P. Some features of the selection of parameters of two-mass dynamic dampers of seismic vibrations. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2023; 1(62):27-31. DOI: 10.55341/ptrbs.2023.62.1.006. EDN LUEGHZ. (rus.).

12. Vaghela V., Patel V., Bhatt P. Behavior of Structures Under Dynamic Loading Having Water Tank Designed as Tuned Mass Damper. *International Journal of Civil Engineering*. 2022; 9(6):62-71. DOI: 10.14445/23488352/ijce-v9i6p106

13. Maddah Sadatieh M.S., Ghorbani-Tanha A.K. An innovative semi-active pendulum tuned mass damper and its application in vibration control. *Journal of Vibration and Control*. 2023; 29(7-8):1820-1832. DOI: 10.1177/10775463211070903

14. Xiang Y., Tan P., He H., Shang J., Zhang Y. Seismic optimization of variable friction pendulum tuned mass damper with hysteretic damping characteristic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022; 160:107381. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107381

15. Kang Y., Peng L., Pan P., Wang H., Xiao G. Seismic performances of a structure equipped with a large mass ratio multiple tuned mass damper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020; 29(17). DOI: 10.1002/tal.1803

16. Prakash Sh., Jangid R.S. Optimum parameters of tuned mass damper-inerter for damped structure under seismic excitation. *International Journal of Dynamics and Control*. 2022; 10(5):1322-1336. DOI: 10.1007/s40435-022-00911-x

17. Fahimi Farzam M., Hojat Jalali H. Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads. *Structural Control and Health Monitoring*. 2022; 29(9). DOI: 10.1002/stc.2987

18. Rahman S., Jain A.K., Jha K.N., Bharti S.D., Datta T.K. Response control of chimneys using tuned mass damper, multi-tuned mass damper and tuned mass inerter system. *Structures*. 2024; 69:107526. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107526

19. Dirbas W., Diken H., Alnefaie K. The Effect of Tuned Mass Damper Mass Ratio on Wind Turbine Vibration Mitigation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024; 14(6):18388-18394. DOI: 10.48084/etasr.9170

20. Akbari-Helm M., Massoudi M.S. A comparison of deterministic and reliability-based optimization of tuned mass damper under uncertainties. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2022; 23(2):203-217. DOI: 10.1007/s42107-022-00418-y

21. Araz O. Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction. *Archive of Applied Mechanics*. 2022; 92(10):2951-2971. DOI: 10.1007/s00419-022-02217-y

Received February 20, 2025.

Adopted in revised form on April 10, 2025.

Approved for publication on May 26, 2025.

BIONOTES: Ilya V. Svitlik — postgraduate student of the Department of Metal and Timber Constructions; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st.,

Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; Scopus: 57486237400, ResearcherID: GQA-5384-2022, ORCID: 0000-0003-2878-4938; svtlik.i@yandex.ru;

Tatiana A. Belash — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials; **Research Center “Construction”**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 5217-7177, ID RSCI: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru.

Contribution of the authors:

Ilya V. Svitlik — collection and processing of the material, writing of the source text, final conclusions.

Tatiana A. Belash — the idea and concept of research, scientific guidance, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.