

Эффективность сейсмоизолирующего скользящего пояса при воздействии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения

Олег Вартанович Мкртычев, Салима Рафиловна Мингазова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнены исследования работы монолитного железобетонного здания различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений. Целью исследования является оценка эффективности сейсмоизоляции в виде скользящего пояса в уровне фундамента при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений с помощью прямого нелинейного динамического метода.

Материалы и методы. При проведении исследования использовался прямой динамический метод, основанный на явной схеме интегрирования уравнения движения (метод центральных разностей). Для определения наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений применялся метод, учитывающий все наиболее значимые собственные частоты рассматриваемого здания.

Результаты. На основе расчетов определены относительные перемещения, интенсивности напряжений для здания в целом и с детализацией для наиболее нагруженного этажа. Анализ полученных результатов показал существенное снижение сдвиговых перемещений и интенсивности напряжений при использовании сейсмоизоляции в виде скользящего пояса в уровне фундамента.

Выводы. При выборе типа сейсмоизоляции стоит учитывать ее стоимость, а также трудоемкость изготовления и монтажа. Необходимо, чтобы используемые системы сейсмоизоляции были доступны для массового строительства, были менее сложными и максимально эффективными. Следует использовать апробированные материалы и технологии устройства данных систем, не требующие специфических навыков и квалификации. Сейсмоизоляция должна обеспечивать комплексную защиту от наиболее вероятных сейсмических воздействий. Проведенные исследования показывают, что сейсмоизолирующий скользящий пояс отвечает вышеперечисленным требованиям. В отличие от широко применяемых резинометаллических и маятниковых скользящих опор, сейсмоизоляция в виде скользящего пояса в уровне фундамента не требует заводского изготовления и может быть выполнена непосредственно на строительной площадке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмостойкость, активная сейсмозащита, сейсмоизоляция, сейсмоизолирующий скользящий пояс, фторопласт, нелинейный динамический метод, акселерограмма землетрясения

Благодарности. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 «Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фоновых кристаллов».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Мингазова С.Р. Эффективность сейсмоизолирующего скользящего пояса при воздействии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1104–1115. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1104-1115

Автор, ответственный за переписку: Салима Рафиловна Мингазова, salima.mingazova@yandex.ru.

The efficiency of the seismic isolating sliding belt under the impact of the most unfavourable earthquake accelerograms

Oleg V. Mkrtychev, Salima R. Mingazova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Research was carried out on the performance of monolithic reinforced concrete buildings of varying heights with and without a seismic isolating sliding belt when subjected to the most unfavourable earthquake accelerograms. The objective of the study is to assess the effectiveness of seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level under the action of the most unfavourable earthquake accelerograms using a direct nonlinear dynamic method.

Materials and methods. The study employed a direct dynamic method based on an explicit integration scheme of the equation of motion (the central difference method). To determine the most unfavourable earthquake accelerograms, a method was used that accounted for all the most significant natural frequencies of the building under consideration.

Results. Based on the calculations conducted, relative displacements and stress intensities for the building as a whole and in detail for the most loaded floor were determined. The analysis of the obtained results showed a significant reduction in shear displacements and stress intensities with the use of seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level.

Conclusions. When selecting the type of seismic isolation, its cost, as well as the labour intensity of manufacturing and installation, must be considered. It is necessary for the seismic isolation systems used to be available for mass construction, less complex, and maximally effective. Proven materials and technologies for the installation of these systems, which do not require specific skills and qualifications, should be used. Seismic isolation should provide comprehensive protection against the most likely seismic impacts. Conducted research shows that the seismic isolating sliding belt meets the above requirements. Unlike widely used rubber-metallic and pendulum sliding bearings, seismic isolation in the form of a sliding belt at the foundation level does not require factory manufacturing and can be implemented directly at the construction site.

KEYWORDS: seismic resistance, active seismic protection, seismic isolation, seismic isolating sliding belt, fluoroplastic, direct dynamic method, accelerogram of earthquake

Acknowledgements. This research was supported by Ministry Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2023-0004 "A system of territorial seismic protection of critical infrastructure facilities based on granular metamaterials with the properties of wide-range phonon crystals".

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Mingazova S.R. The efficiency of the seismic isolating sliding belt under the impact of the most unfavorable earthquake accelerograms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1104-1115. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1104-1115 (rus.).

Corresponding author: Salima R. Mingazova, salima.mingazova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Последствиями землетрясения могут быть сильные разрушения зданий и сооружений, потеря жизней и значительный материальный ущерб. Приблизительно треть территории России находится в районах, где существует вероятность возникновения землетрясений средней и высокой интенсивности. Сейсмостойкость зданий и сооружений — важный аспект обеспечения безопасности жителей, проживающих на данных территориях. Сейсмостойкое строительство остается актуальной и практически значимой задачей для строительной отрасли, особенно в районах с высокой сейсмической активностью.

Один из известных методов повышения сейсмостойкости зданий и сооружений — применение активной сейсмозащиты. В настоящее время существуют несколько ее видов, они отличаются друг от друга по принципам работы и конструктивным решениям. Одним из таких видов активной сейсмозащиты служит сейсмоизоляция [1–9]. Снижение сейсмических сил на здание при использовании сейсмоизоляции достигается путем введения в конструкцию задания специальных конструктивных элементов — сейсмоизоляторов, что позволяет сократить усилия в несущих элементах системы при землетрясении.

Наиболее популярными системами сейсмоизоляции в России и за рубежом являются резинометаллические опоры (РМО) и маятниковые скользящие опоры (МСО). Однако рассматриваемые системы сейсмоизоляции имеют ряд недостатков: для РМО — сложность изготовления, ограниченный срок службы, повышенная чувствительность к низкочастотным воздействиям; для МСО — большое влияние неточностей изготовления и монтажа, отнюдь высокая стоимость.

Рассмотрим сейсмоизолирующий скользящий пояс в уровне фундамента. Данный вид сейсмоизоляции, несмотря на ряд преимуществ, практически не используется. Связано это с недостаточной изученностью, отсутствием всесторонних расчетных обоснований и соответствующих методик расчета данных систем.

Сейсмоизолирующий скользящий пояс в уровне фундамента представляет собой устройство с поверхностью скольжения с низким значением коэффициента трения материалов между верхней частью здания и фундаментом и с ограничителем больших горизонтальных перемещений (рис. 1). В качестве материала между нижним и верхним слоями опорных элементов применяют различные материалы (неопрен, тефлон, графит и др.). При проведении исследований в качестве такого материала рассматривался фторопласт.

Принцип работы скользящего пояса следующий: когда суммарная инерционная сила системы превысит определенное значение, в опорных элементах сейсмоизолирующего пояса возникает проскальзывание, которое приводит к снижению ускорений и, соответственно, усилий в несущих элементах здания.

Многочисленные экспериментальные исследования показывают эффективность применения сейсмоизолирующего скользящего пояса в уровне фундамента для снижения сейсмической нагрузки, которая действует на надземную часть здания [10]. Несмотря на это, до настоящего времени остаются открытыми вопросы разработки адекватных математических моделей, описывающих действительную работу системы «здание – сейсмоизоляция – фундамент – основание», и соответствующих методик расчета.

Научные исследования по вопросам обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений с по-

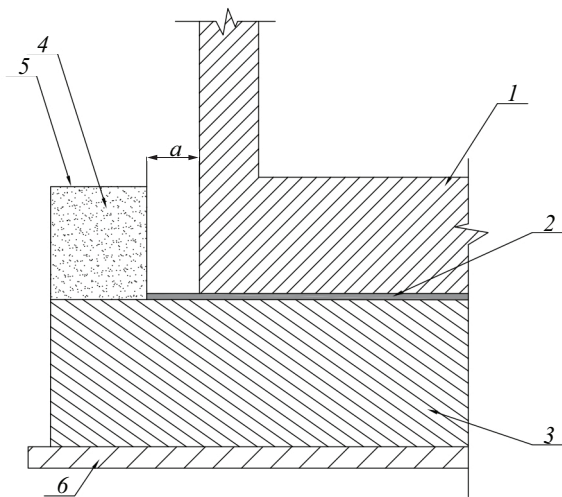


Рис. 1. Схема устройства скользящего пояса в уровне фундамента: 1 — верхний слой опорного элемента; 2 — материал с низким значением коэффициента трения; 3 — нижний слой опорного элемента; 4 — ограничитель горизонтальных перемещений (песок уплотненный); 5 — гидроизоляция; 6 — бетонная подготовка

Fig. 1. The scheme of the sliding belt device at the foundation level: 1 — top layer of the support element; 2 — low friction material; 3 — bottom layer of the support element; 4 — horizontal movement limiter (compacted sand); 5 — waterproofing; 6 — concrete preparation

мощью активной системы сейсмозащиты получили большое внимание в научных трудах Я.М. Айзенберга [11, 12], О.В. Мкртычева [13–17], Б.М. Абрамова [18], А.М. Алексеева [19], А.Н. Васюнкина [20], А.М. Уздина [3, 9], О.А. Савинова [21], Ю.Д. Черепинского [22], В.П. Чуднецова [23], В.Д. Кузнецова и Чэнь Сятин [24] и других авторов [25–33].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемыми объектами являются монолитные железобетонные здания разной высоты (трех-, пяти-, девяти-, шестнадцатизэтажные) (рис. 2) с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения.

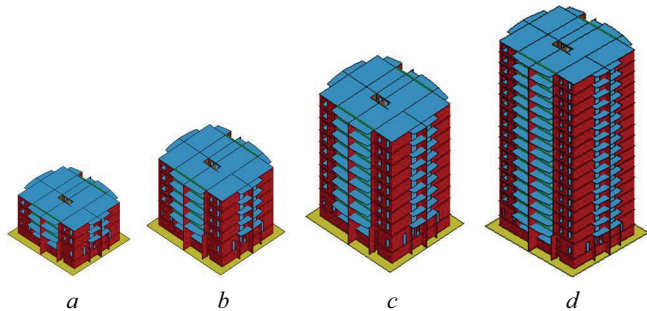


Рис. 2. Конечно-элементная схема зданий без сейсмоизоляции: а — 3 этажа; б — 5 этажей; с — 9 этажей; d — 16 этажей
Fig. 2. Finite element design scheme of a building without seismic isolation: a — 3 floors; b — 5 floors; c — 9 floors; d — 16 floors

При проведении исследования были применены следующие методы:

- моделирование (численное моделирование монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизоляцией и без нее с последующим их расчетом на действие наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения с использованием прямого нелинейного динамического метода при явной схеме интегрирования уравнений движения);
- сравнение (сравнение реакции монолитного железобетонного здания разной высоты с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения);
- анализ (все выводы, подтверждающие эффективность применения скользящего пояса в уровне фундамента для увеличения сейсмостойкости зданий, основаны на подробном анализе полученных результатов численных расчетов).

В соответствии с текущими нормативными документами при строительстве на сейсмоопасных территориях требуется проведение расчетов на основе наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений для конкретных зданий и сооружений. Однако в существующих строительных нормах отсутствуют установленные критерии для определения наиболее опасных акселерограмм землетрясений, а также отсутствуют методы их моделирования. Для формирования данных, необходимых для синтеза акселерограмм, обычно применяются сейсмические характеристики строительной площадки или анализ результатов статистической обработки набора инструментальных акселерограмм, соответствующих этой площадке. В процессе подготовки исходных данных не уделяется внимание динамическим свойствам будущей конструкции, поскольку они не оказывают влияния на сейсмические характеристики площадки строительства. Все же подготовленные исходные сведения содержат неопределенности, обусловленные случайным характером сейсмического воздействия, и подчиняются нормальному распределению. Принимая во внимание имеющиеся неопределенности, можно подобрать такие исходные данные, которые окажут наибольшее воздействие на соору-

жения. Для оценки степени опасности необходимо принимать во внимание динамические особенности сооружения. Акселерограммы, сформированные на основе указанной информации, будут считаться наиболее неблагоприятными.

При определении наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения использовался метод, который учитывает все значимые собственные частоты рассматриваемого здания [16]. Этот метод включает два этапа подготовительной работы: сначала устанавливаются характеристики сейсмического воздействия для конкретной строительной площадки, а затем проводится определение динамических характеристик рассматриваемого здания. По завершении этих этапов формируется целевая функция, которая впоследствии максимизируется с учетом ограничений, наложенных вероятностными факторами. Процесс максимизации включает анализ частотной характеристики системы (рис. 3, а) в сочетании с частотной характеристикой акселерограммы с целью достижения максимальной дисперсии реакции системы (рис. 3, б).

После этого формируются исходные данные для моделирования акселерограмм и производится их синтезирование с помощью метода канонических разложений [15].

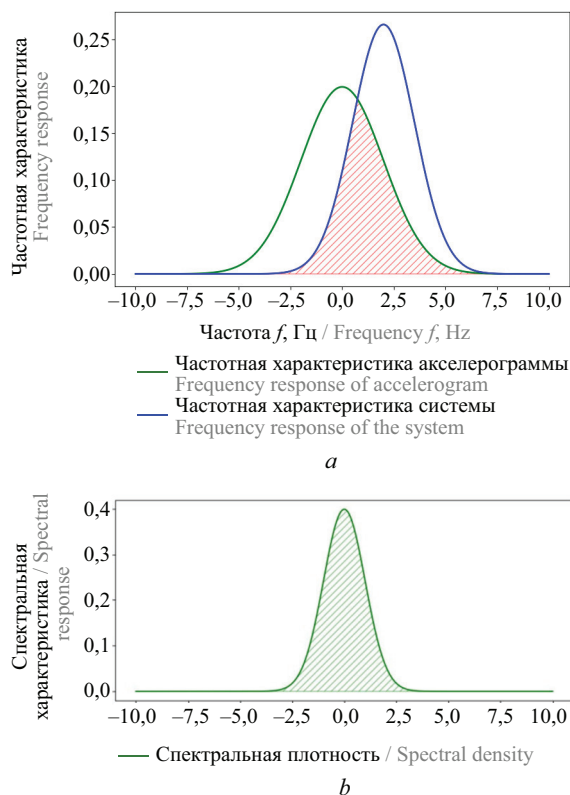


Рис. 3. Схема передачи энергии воздействия системе (а); дисперсия реакции системы (b)

Fig. 3. Scheme of transfer of impact energy to the system (a); dispersion of the reaction of the system (b)

Дифференциальное уравнение движения системы с ограниченным числом степеней свободы, представленное в матричной форме, имеет следующий вид [17]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f^a.$$

При проведении расчета применялась явная схема интегрирования [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено исследование монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом в уровне фундамента при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений. Ниже приведены полученные с помощью используемой методики (которая была рассмотрена выше) наиболее неблагоприятные расчетные акселерограммы землетрясения для 9-этажного здания (рис. 4, 5).

Исходные данные исследуемых монолитных железобетонных зданий приведены в работе [16].

Расчет выполнен с помощью прямого динамического метода в многоцелевой программе конечно-элементного анализа LS-DYNA с учетом нелинейного характера деформирования несущих конструкций. При моделировании расчетной схемы использовались стержневые элементы и пространственные конечные элементы оболочки.

Далее в таблице приведены основные результаты расчета.

На основе полученных результатов были построены графики горизонтальных перемещений верхней точки здания относительно нижней (рис. 6), интенсивности напряжений в наиболее нагруженном элементе первого этажа здания (рис. 7), а также получены соответствующие изополя перемещений (рис. 8), интенсивности напряжений для здания в целом (рис. 9) и отдельно для наиболее нагруженного этажа (рис. 10).

Результаты проведенных исследований показывают, что для:

- 3-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса наблюдается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 4,8 раз, всего здания в 5,5 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 7,5 раз, всего здания в 7,3 раз (воздействие по оси Y);
- 5-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса отмечается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 5,2 раз, всего здания в 4,6 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 6,8 раз, всего здания в 6,4 раз (воздействие по оси Y);
- 9-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса фиксируется снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 7,0 раз, всего здания в 5,2 раз (воздействие по оси X); относительного

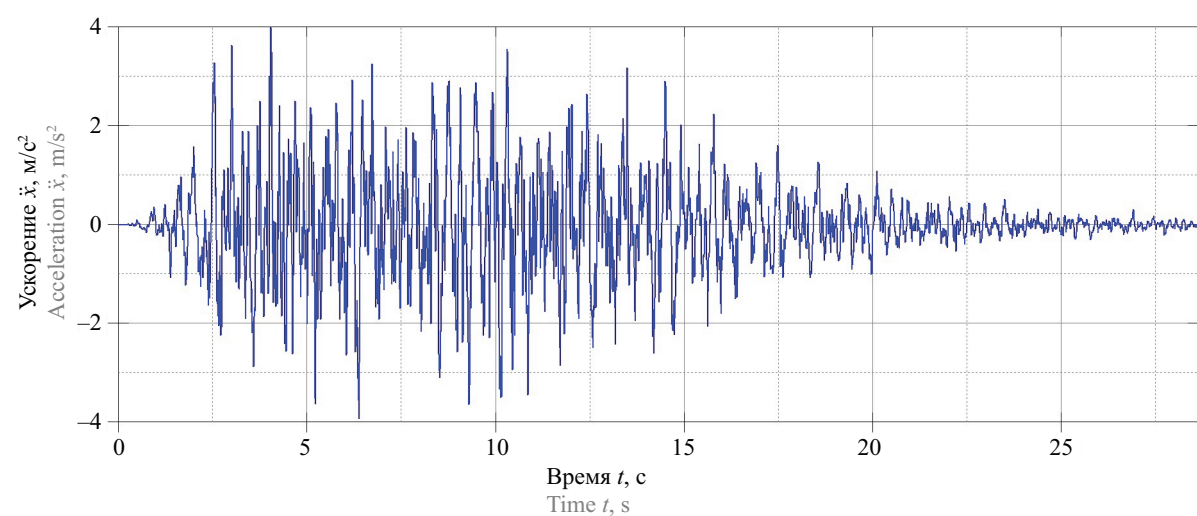


Рис. 4. Наиболее неблагоприятная акселерограмма землетрясения по оси X для 9-этажного здания

Fig. 4. The most unfavourable earthquake accelerogram along the X axis for a 9-story building

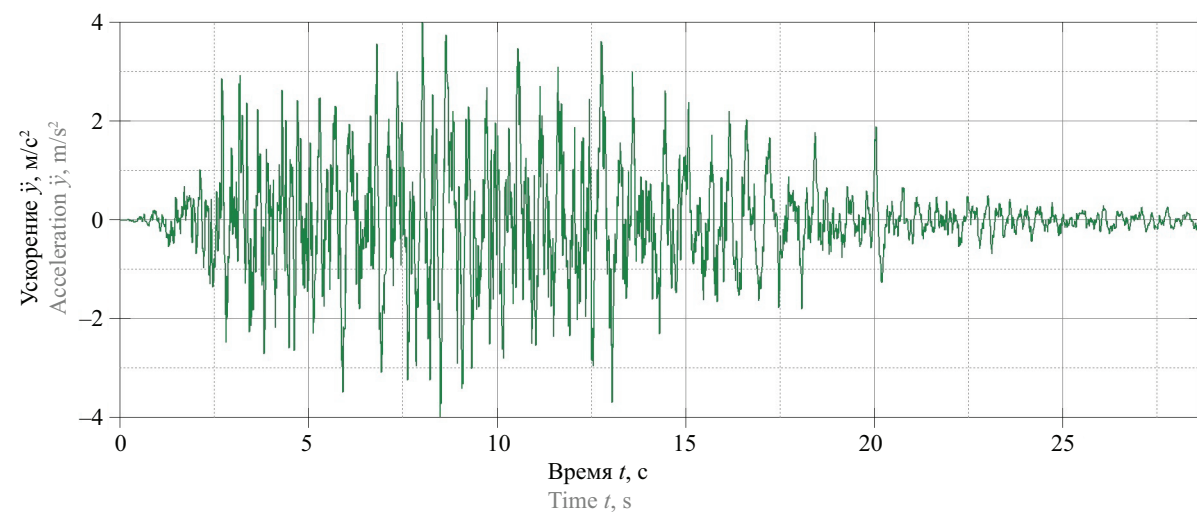


Рис. 5. Наиболее неблагоприятная акселерограмма землетрясения по оси Y для 9-этажного здания

Fig. 5. The most unfavourable earthquake accelerogram along the Y axis for a 9-story building

Основные результаты расчета монолитных железобетонных зданий различной этажности с сейсмоизолирующим скользящим поясом при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения

Main results of the calculation of a monolithic reinforced concrete building of various storeys with a seismic isolating sliding belt under the action of the most unfavourable earthquake accelerograms

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа S_{max} , Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor S_{max} , Pa·10 ⁷
3-этажное здание (сейсмика по оси X) 3-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,00425	0,001	1,28
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00077	0,00021	0,491

Продолжение табл. / Continuation of the Table

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{max}(Dy_{max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{max}(Dy_{max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа S_{max} , Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor S_{max} , Pa·10 ⁷
3-этажное здание (сейсмика по оси X) 3-storey building (seismic action on the X axis)			
Отношение Relation	5,519	4,762	2,607
3-этажное здание (сейсмика по оси Y) 3-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0109	0,00411	2,34
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00149	0,000549	0,309
Отношение Relation	7,315	7,486	7,573
5-этажное здание (сейсмика по оси X) 5-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0129	0,0023	2,034
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0028	0,000445	0,439
Отношение Relation	4,607	5,168	4,633
5-этажное здание (сейсмика по оси Y) 5-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,025	0,0055	3,63
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,00391	0,000811	0,472
Отношение Relation	6,394	6,782	7,691
9-этажное здание (сейсмика по оси X) 9-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0594	0,0046	5,98
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0114	0,000657	1,43
Отношение Relation	5,211	7,002	4,182
9-этажное здание (сейсмика по оси Y) 9-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,0776	0,00786	5,54
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,0132	0,00155	1,31
Отношение Relation	5,878	5,071	4,229

Без/с сейсмоизоляцией Without/with seismic isolation	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ всего здания, м Maximum value of the relative displacement $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ of the entire building, m	Максимальное значение относительного перемещения $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ 1-го этажа, м Maximum value of relative displacement $Dx_{\max}(Dy_{\max})$ of the 1st floor, m	Интенсивность напряжения в наиболее нагруженном элементе стены 1-го этажа $S_{\max}$, Па·10 ⁷ Stress intensity in the most loaded element of the wall of the 1st floor $S_{\max}$, Pa·10 ⁷
16-этажное здание (сейсмика по оси X) 16-storey building (seismic action on the X axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,220	0,007	9,41
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,051	0,001	2,51
Отношение Relation	4,314	7,000	3,749
16-этажное здание (сейсмика по оси Y) 16-storey building (seismic action on the Y axis)			
Без сейсмоизоляции Without seismic isolation	0,445	0,018	16,1
С сейсмоизоляцией With seismic isolation	0,055	0,002	2,39
Отношение Relation	8,091	9,000	6,736

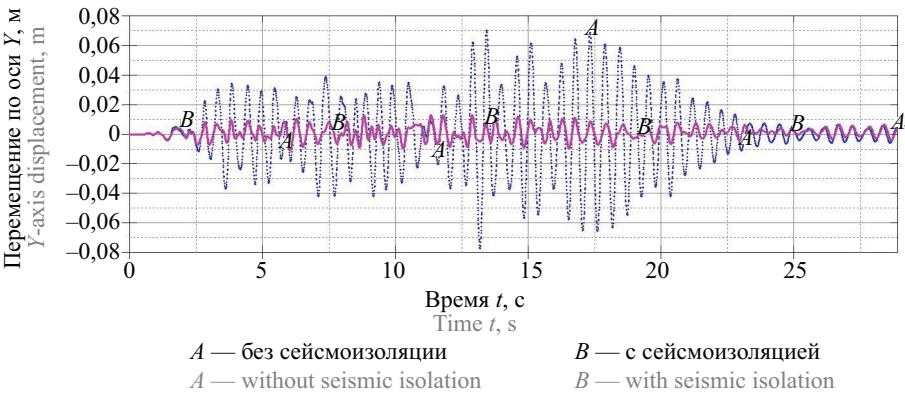


Рис. 6. Перемещение верхней точки 9-этажного здания относительно нижней точки по оси Y с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него, м

Fig. 6. Displacement of the upper point of a 9-storey building relative to the lower point in the Y axis with and without a seismic isolation sliding belt, m

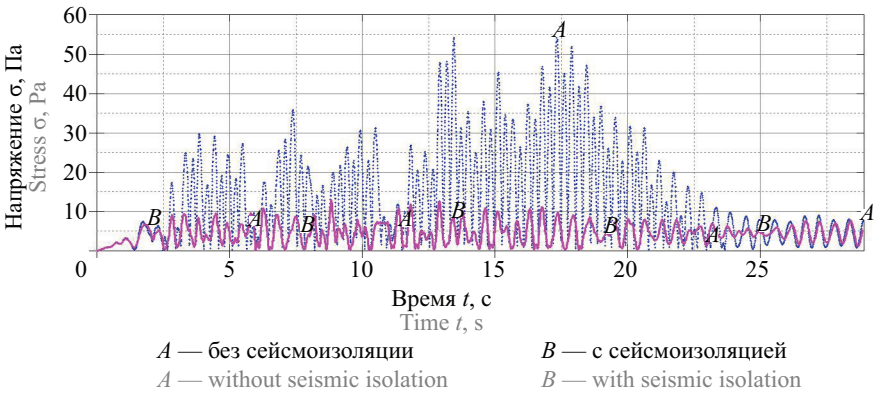


Рис. 7. Интенсивность напряжений в наиболее нагруженном элементе стены 1-го яруса 9-этажного здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом и без него, Па

Fig. 7. Stress intensity in the most loaded wall element of the 1st tier of a 9-storey building with and without a seismic isolation sliding belt, Pa

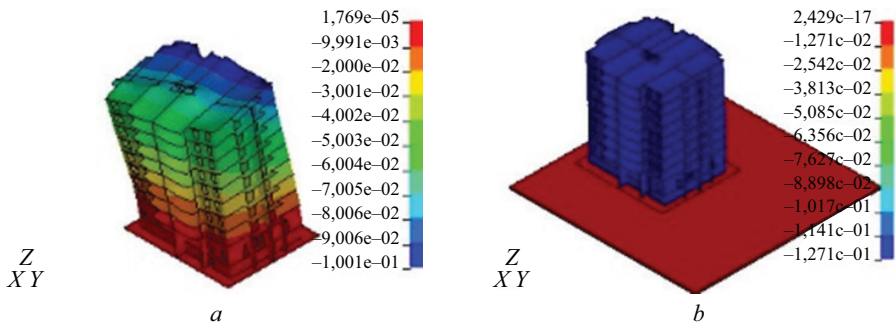


Рис. 8. Изополя перемещений по оси Y в момент времени $t = 13,45$ с 9-этажного здания: a — без сейсмоизоляции; b — с сейсмоизоляцией, м

Fig. 8. Displacement isopoles along the Y axis at the time $t = 13.45$ s of a 9-story building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic-isolating sliding belt, m

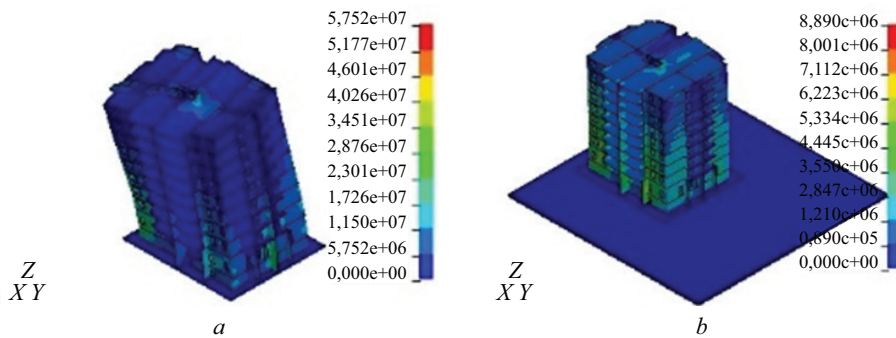


Рис. 9. Изополя интенсивности напряжений в момент времени $t = 13,45$ с 9-этажного здания: a — без сейсмоизолирующего скользящего пояса; b — с сейсмоизолирующим скользящим поясом, Па

Fig. 9. Stress intensity isopoles at the time $t = 13.45$ s of a 9-storey building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic isolating sliding belt, Pa

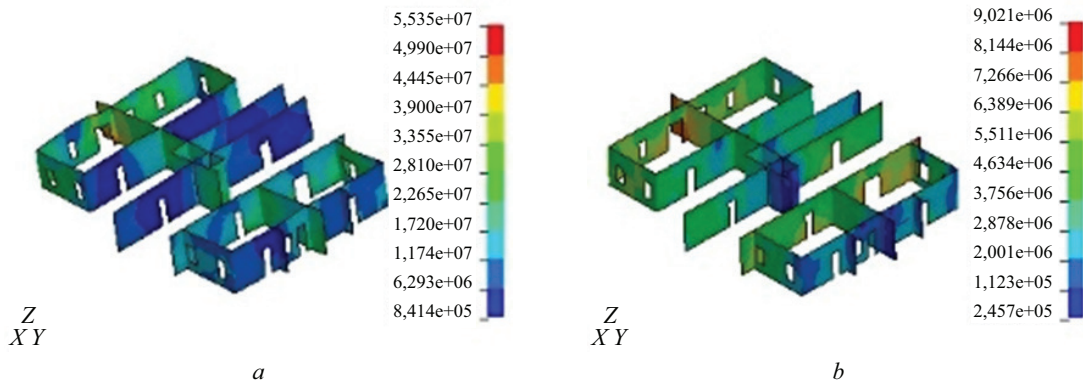


Рис. 10. Изополя интенсивности напряжений в момент времени $t = 17,34$ с 1-го яруса 9-этажного здания: a — без сейсмоизолирующего скользящего пояса; b — с сейсмоизолирующим скользящим поясом, Па

Fig. 10. Stress intensity isopoles at the time $t = 17.34$ s of the 1st tier of a 9-storey building: a — without seismic isolation sliding belt; b — with seismic isolating sliding belt, Pa

сдвига 1-го этажа в 5,1 раз, всего здания в 5,9 раз (воздействие по оси Y);

- 16-этажного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса отмечается снижение: относительного сдвига 1-го этажа в 7,0 раз, всего здания в 4,3 раз (воздействие по оси X); относительного сдвига 1-го этажа в 9,0 раз, всего здания в 8,1 раз (воздействие по оси Y).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обеспечение сейсмостойкости современных зданий и сооружений представляет собой важную и сложную задачу. Основываясь на характеристиках сейсмического воздействия на конкретном участке строительства, а также на выборе конструктивных решений и учете эксплуатационных требова-

ний, можно определить наиболее подходящий тип сейсмоизоляции. При выборе сейсмоизоляции необходимо учитывать сложность и трудоемкость изготовления, ее стоимость. Сейсмоизоляция должна обеспечивать комплексную защиту от вероятных сейсмических воздействий. В данной работе представлены результаты исследований эффективности сейсмоизолирующего скользящего пояса в уровне фундамента с фторопластовыми пластинами.

Научной новизной является разработка адекватной математической модели здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом при действии землетрясения. Полученные результаты позволяют качественно и количественно оценить и расчетным образом обосновать эффективность применения скользящего пояса для использования в сейсмостойком строительстве.

Проведены исследования работы монолитных железобетонных зданий различной этажности

с сейсмоизоляцией и без нее при действии наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясения. Анализ результатов исследований свидетельствует о высокой эффективности сейсмозащиты в виде скользящего пояса в уровне фундамента. Данный вид сейсмоизоляции позволяет существенно снизить сейсмические нагрузки на надземную часть конструкций зданий, повысить надежность их работы при землетрясениях, снизить материалоемкость и стоимость строительства. В сравнении с популярными резинометаллическими и маятниковыми скользящими опорами, сейсмоизоляция в виде скользящего пояса в уровне фундамента не требует заводского изготовления и может быть выполнена непосредственно на строительной площадке. Предложенный метод обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений представляет собой практически приемлемый подход, который не требует значительных затрат на антисейсмические мероприятия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Арутюнян Л.М. Оценка надежности железобетонных зданий с сейсмоизолирующим фундаментом с маятниковыми скользящими опорами : дис. ... канд. тех. наук. М., 2017. 141 с. EDN FHKTSY.

2. Dushimimana A., Dushimimana C., Mbereyaho L., Niyonsenga A.A. Effects of building height and seismic load on the optimal performance of base isolation system // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. Issue 10. Pp. 13283–13302. DOI: 10.1007/s13369-023-07660-9

3. Уздин А.М., Мозжухин А.С., Сорокина Г.В. Некоторые вопросы нелинейной работы сейсмоизоляции // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 3. С. 8–19. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-3-8-19. EDN DIOWWZ.

4. Patil A.Y., Patil R.D. A review on seismic analysis of a multi-storied steel building provided with different types of damper and base isolation // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024. Vol. 25. Issue 4. Pp. 3277–3283. DOI: 10.1007/s42107-023-00978-7

5. Sezer Y.M., Diambra A., Ge B., Dietz M., Alexander N.A., Sextos A.G. Experimental determination of friction at the interface of a sand-based, seismically isolated foundation // *Acta Mechanica*. 2023. Vol. 235. Issue 3. Pp. 1649–1667. DOI: 10.1007/s00707-023-03802-0

6. Asaad R., Kaadan A. Retrofitting existing masonry structures by using seismic base isolation system // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 49. Issue 4. Pp. 5243–5254. DOI: 10.1007/s13369-023-08381-9

7. Calvi P.M., Ruggiero D.M. Numerical modelling of variable friction sliding base isolators // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 14. Issue 2. Pp. 549–568. DOI: 10.1007/s10518-015-9834-y

8. Khoshnudian F., Motamedi D. Seismic response of asymmetric steel isolated structures considering vertical component of earthquakes // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. Issue 6. Pp. 1333–1347. DOI: 10.1007/s12205-013-0115-5

9. Уздин А.М., Сандович Т.А., Самих Амин Аль-Насер-Мохомад. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб. : Издательство ВНИИГ, 1993. 175 с.

10. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М. : Стройиздат, 1989. 318 с.

11. Айзенберг Я.М. Простейшая сейсмоизоляция. Колонны нижних этажей как элемент сейсмоизоляции здания // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2004. № 1. С. 28–32. EDN HXDEUA.

12. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М. : Стройиздат, 1976. 232 с.

13. Мкртычев О.В., Арутюнян Л.М. Исследование работы сейсмоизолирующей маятниковой скользящей опоры при периодическом воздействии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2016. № 4. С. 38–43. EDN WHCVJD.

14. Мкртычев О.В., Бунов А.А. Сравнительный анализ работы сейсмоизоляции зданий в виде резинометаллических опор на двухкомпонентную акселерограмму // *Наука и образование в современной конкурентной среде : мат. Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. С. 117–123.

15. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Сейсмические нагрузки при расчете зданий и сооружений : монография. М. : Изд-во АСВ, 2017. 140 с.
16. Mkrtychev O., Mingazova S. Analysis of the reaction of reinforced concrete buildings with a varying number of stories with a seismic isolation sliding belt to an earthquake // IOP Conference Series : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052065. DOI: 10.1088/1757-899x/869/5/052065
17. Mkrtychev O., Mingazova S. Numerical analysis of antiseismic sliding belt performance // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19. Issue 2. Pp. 161–171. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-161-171
18. Абрамов Б.М., Абрамов А.Б. Динамический гаситель колебаний, вызываемых периодическими ударами // Механика машин. 1969. № 20. С. 103–117.
19. Алексеев А.М. О демпфировании колебаний импульсно-динамическим гасителем // Проблемы прочности. 1972. № 2. С. 52–54.
20. Васюнкин А.Н., Бобров Ф.В. Экспериментальные исследования зданий на опорах в форме эллипсоидов вращения // Сейсмостойкое строительство. 1976. Т. 14. № 4. С. 20–24.
21. Савинов О.А., Сандович Т.А. О некоторых особенностях применения системы сейсмоизоляции зданий и сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1978. Т. 212. С. 26–39.
22. Черепинский Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1972. № 3. С. 13–15.
23. Чуднецов В.П., Солдатова Л.Л. Здания с сейсмоизоляционным скользящим поясом и упругими ограничителями перемещений // Сейсмостойкое строительство. 1979. Т. 14. № 5. С. 1–3.
24. Кузнецов В.Д., Чэнь С. Скользящий пояс с фторопластом сейсмостойкого здания // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 53–58. EDN NTLXRV.
25. Nishia T., Murotab N. Elastomeric seismic-protection isolators for buildings and bridges // Chinese Journal of Polymer Science. 2013. Vol. 31. Issue 1. Pp. 50–57. DOI: 10.1007/s10118-013-1217-8
26. Pan P., Ye L., Shi W., Cao H. Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China // Science China Technological Sciences. 2012. Vol. 55. Issue 11. Pp. 3036–3046. DOI: 10.1007/s11431-012-4922-6
27. Zhou F., Tan P. Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2018. Vol. 17. Issue 1. Pp. 19–27. DOI: 10.1007/s11803-018-0422-4
28. Leblouba M. Selection of seismic isolation system parameters for the near-optimal design of structures // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19114-7
29. Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurodov J. Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding foundations // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. P. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402022
30. Ahmad N., Shakeel H., Masoudi M. Design and development of low-cost HDRBs seismic isolation of structures // Bulletin of Earthquake Engineering. 2020. Vol. 18. Issue 3. Pp. 1107–1138. DOI: 10.1007/s10518-019-00742-w
31. Ras A., Hamdaoui K. Effect of friction pendulum bearing on metallic buildings behaviour subjected to horizontal ground motions // Asian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 7. Pp. 2065–2075. DOI: 10.1007/s42107-023-00626-0
32. Hassan W.M. Assessment of ASCE 7–16 seismic isolation bearing torsional displacement // International Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 18. Issue 3. Pp. 351–366. DOI: 10.1007/s40999-019-00462-x
33. Xu W., Du D., Wang S., Liu W., Li W. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation // Engineering Structures. 2019. Vol. 201. P. 109802. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109802

Поступила в редакцию 23 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 5 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Вартанович Мкртычев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Салима Рафиловна Мингазова — аспирантка кафедры сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7506-5852, Scopus: 57207860320; salima.mingazova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мкртычев О.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Мингазова С.Р. — проведение численных исследований, подготовка исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Arutyunyan L.M. *Assessment of reinforced concrete buildings with seismic insulating foundations by pendulum sliding supports : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2017; 141. EDN FHKTSY. (rus.).
2. Dushimimana A., Dushimimana C., Mberayaho L., Niyonsenga A.A. Effects of building height and seismic load on the optimal performance of base isolation system. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023; 48(10):13283-13302. DOI: 10.1007/s13369-023-07660-9
3. Uzdin A.M., Mozzhuhin A.S., Sorokina G.V. Some questions of nonlinear seismic isolation behavior. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2022; 3:8-19. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-3-8-19. EDN DIOUWZ. (rus.).
4. Patil A.Y., Patil R.D. A review on seismic analysis of a multi-storied steel building provided with different types of damper and base isolation. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024; 25(4):3277-3283. DOI: 10.1007/s42107-023-00978-7
5. Sezer Y.M., Diambra A., Ge B., Dietz M., Alexander N.A., Sextos A.G. Experimental determination of friction at the interface of a sand-based, seismically isolated foundation. *Acta Mechanica*. 2023; 235(3):1649-1667. DOI: 10.1007/s00707-023-03802-0
6. Asaad R., Kaadan A. Retrofitting existing masonry structures by using seismic base isolation system. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023; 49(4):5243-5254. DOI: 10.1007/s13369-023-08381-9
7. Calvi P.M., Ruggiero D.M. Numerical modelling of variable friction sliding base isolators. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2015; 14(2):549-568. DOI: 10.1007/s10518-015-9834-y
8. Khoshnudian F., Motamedi D. Seismic response of asymmetric steel isolated structures considering vertical component of earthquakes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013; 17(6):1333-1347. DOI: 10.1007/s12205-013-0115-5
9. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Samikh Amin Al-Naser-Mohomad. *Fundamentals of the theory of earthquake engineering of buildings and structures*. St. Petersburg, VNIH Publishing House, 1993; 175. (rus.).
10. Polyakov V.S., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. *Modern Methods of Seismic Protection of Buildings*. Moscow, Stroyizdat, 1989; 318. (rus.).
11. Eisenberg Y.M. Simple seismic protection. lower floor columns as an element of building seismic protection. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2004; 1:28-32. EDN HXDEUA. (rus.).
12. Eisenberg Y.M. *Structures with switching links for seismic areas*. Moscow, Stroyizdat, 1976; 232. (rus.).
13. Mkrtychev O.V., Arutyunyan L.M. Research of work of seismic isolation friction pendulum bearing at periodic influence. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2016; 4:38-43. EDN WHCVJD. (rus.).
14. Mkrtychev O.V., Bunov A.A. Comparative analysis of the work of seismic insulation of buildings in the form of rubber-metal supports on a two-component accelerogram. *Science and education in a modern competitive environment: materials of the international scientific-practical conference*. 2014; 117-123. (rus.).
15. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. *Seismic loads in the calculation of buildings and structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 140. (rus.).
16. Mkrtychev O., Mingazova S. Analysis of the reaction of reinforced concrete buildings with a varying number of stories with a seismic isolation sliding belt to an earthquake. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052065. DOI: 10.1088/1757-899x/869/5/052065
17. Mkrtychev O., Mingazova S. Numerical analysis of antiseismic sliding belt performance. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(2):161-171. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-2-161-171
18. Abramov B.M., Abramov A.B. Dynamic damper of vibrations caused by periodic shocks. *Mechanics of Machines*. 1969; 20:103-117. (rus.).
19. Alekseev A.M. About the damping of vibrations by impulse-dynamic damper. *Problems of Strength*. 1972; 2:52-54. (rus.).
20. Vasyunkin A.N., Bobrov F.V. Experimental investigations of buildings on supports in the form of ellipsoids of rotation. *Earthquake Engineering*. 1976; 14(4):20-24. (rus.).
21. Savinov O.A., Sandovich T.A. About some peculiarities of applying the system of seismic insulation of buildings and structures. *Vedeneev VNIIG*. 1978; 212:26-39. (rus.).
22. Cherepinsky Y.D. To seismic stability of buildings on kinematic supports. *Foundations, Fundamentals and Soil Mechanics*. 1972; 3:13-15. (rus.).
23. Chudnetsov V.P., Soldatova L.L. Buildings with seismic insulating sliding belt and elastic limiters of displacements. *Earthquake Engineering*. 1979; 14(5):1-3. (rus.).
24. Kuznetsov V.D., Chen S. Sliding belt with fluoroplastic of earthquake-resistant building. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 3:53-58. EDN NTLXRV. (rus.).
25. Nishia T., Murotab N. Elastomeric seismic-protection isolators for buildings and bridges. *Chinese Journal of Polymer Science*. 2013; 31(1):50-57. DOI: 10.1007/s10118-013-1217-8
26. Pan P., Ye L., Shi W., Cao H. Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China. *Science China Technological Sciences*. 2012; 55(11):3036-3046. DOI: 10.1007/s11431-012-4922-6

27. Zhou F., Tan P. Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2018; 17(1):19-27. DOI: 10.1007/s11803-018-0422-4

28. Leblouba M. Selection of seismic isolation system parameters for the near-optimal design of structures. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-19114-7

29. Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurodov J. Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding foundations. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402022

30. Ahmad N., Shakeel H., Masoudi M. Design and development of low-cost HDRBs seismic isolation

of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020; 18(3):1107-1138. DOI: 10.1007/s10518-019-00742-w

31. Ras A., Hamdaoui K. Effect of friction pendulum bearing on metallic buildings behaviour subjected to horizontal ground motions. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023; 24(7):2065-2075. DOI: 10.1007/s42107-023-00626-0

32. Hassan W.M. Assessment of ASCE 7–16 seismic isolation bearing torsional displacement. *International Journal of Civil Engineering*. 2020; 18(3):351-366. DOI: 10.1007/s40999-019-00462-x

33. Xu W., Du D., Wang S., Liu W., Li W. Shaking table tests on the multi-dimensional seismic response of long-span grid structure with base-isolation. *Engineering Structures*. 2019; 201:109802. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109802

Received January 23, 2024.

Adopted in revised form on March 11, 2024.

Approved for publication on April 5, 2024.

B I O N O T E S : **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Salima R. Mingazova — postgraduate student of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7506-5852, Scopus: 57207860320; salima.mingazova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Oleg V. Mkrtychev — scientific guidance, research concept, development of methodology, final conclusions.

Salima R. Mingazova — numerical research, preparation of the original text, final conclusions.

The authors declare the absence of conflict of interest.