

Сейсмическая изоляция конструкций и проблемы её использования

© А.С. Барахтенко, Т.Л. Дмитриева

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. Территория многих государств, включая Россию, содержит в себе сейсмически активные районы. Сейсмическая активность выше определенного порога оказывается разрушительной для зданий и сооружений, в которых не было предусмотрено каких-либо антисейсмических мероприятий. По мере развития конструкторского ремесла появлялись все более новые сведения о природе сейсмического воздействия и защите конструкций от него. Существующее положение дел таково, что только сравнительно недавно в нормативных актах, регламентирующих проектирование в сейсмических районах различных государств, появилось упоминание систем сейсмической защиты зданий. При этом действующая документация умалчивает о принципе расчета зданий с подобными системами и не дает какой-либо методики расчета. Данная статья раскрывает сущность таких систем и предпосылки их использования. В работе приводятся выводы из различных исследований, касающихся как расчетов, так и практической реализации таких систем. Наибольшее внимание в данной статье уделено сейсмической изоляции, вариантам реализации такого рода систем, а также проблемам их расчета и использования. Описан принцип работы сейсмоизоляции, а также простейший метод ее расчета и предпосылки данного метода.

Ключевые слова: сейсмоизоляция, системы сейсмической защиты зданий, эластомерные опоры, кинематические опоры, скользящий пояс

Seismic Isolation of Structures and Problems of Its Use

© Alexander S. Barakhtenko, Tatiana L. Dmitriyeva

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. There are seismically active areas in the territory of many states, including Russia. Seismic activity above a certain threshold is destructive for buildings and structures that do not provide for any anti-seismic activities. With the development of the design craft, more and more new information appeared about the nature of seismic impact and the protection of structures from it. The current state of affairs is such that the regulations governing the design in seismic areas of different States have only recently mentioned seismic protection systems for buildings. At the same time, the current documentation does not mention the principle of calculating buildings with similar systems and does not provide any calculation methodology. This article reveals the nature of these systems and the background to their use. The article presents the findings of various studies relating to both the calculations and the practical implementation of such systems. The article focuses on seismic isolation, the feasibility of these types of systems, and the problems of their calculation and use. The article describes the principle of seismic isolation, as well as the simplest method of calculating it and the prerequisites of this method.

Keywords: seismic isolation, seismic protection systems of buildings, elastomeric bearings, kinematic bearings, sliding belt

В общем случае системы сейсмической защиты зданий (далее – ССЗ) являются альтернативным подходом к понятию сейсмостойкого строительства. В традиционном понимании сейсмостойкое строительство подразумевает соблюдение определенных принципов при проектировании зданий и сооружений. Таким образом, при прочих равных условиях проектирование в сейсмических районах сводится к тому, что конструкторы вынуждены воспринимать сейсмическое воздействие «в лоб» путем повышения

несущей способности здания и его отдельных элементов.

С учётом сказанного выше стоит понимать, что повышение несущей способности здания сопровождается увеличением сечений. Чем больше сечение конструктивных элементов, тем выше их жесткость, а чем выше жесткость элементов, тем выше жесткость конструкции в целом. При повышении же жесткости здания увеличивается и частота собственных колебаний в простейшем

случае в соответствии с законом простого гармонического движения¹:

$$f = 1/2\pi\sqrt{k/m},$$

где k – жесткость, m – масса.

Если учитывать природу сейсмического воздействия (частота сейсмической волны колеблется в диапазоне от 2 до 50 Гц), есть риск наткнуться на явление резонанса, а оно губительно для конструкции.

В случае с ССЗ конструкторы подходят к вопросу сейсмостойкости с другой стороны: «Что будет, если вместо повышения несущей способности здания снизить инерционную нагрузку на здание?». Казалось бы, что подобные мысли достаточно инновационны, но на самом деле подобные методы давно используются при проектировании опор под различное оборудование.

В тематической литературе выделяется четыре основных способа сейсмической защиты зданий²:

1. системы, реализующие принципы сейсмоизоляции;
2. системы адаптивного типа с изменяющимися характеристиками;
3. системы повышенного демпфирования;
4. системы с гасителями колебаний различных типов.

В общем случае каждую из вышеперечисленных групп можно разделить на подгруппы. Все указанные выше методы сейсмозащиты позволяют снизить инерционную нагрузку на здание в два-три раза. Таким образом, можно осуществлять дальнейшую проработку проекта и снижать расчетную сейсмичность на балл (как минимум). Так или иначе, на данный момент наиболее распространенными ССЗ являются системы, реализующие принципы сейсмоизоляции.

Под сейсмоизоляцией обычно подразумевается снижение инерционных нагрузок на здание или сооружение путем устройства специальных систем или элементов между верхней частью здания и его фундаментом. Идеи об использовании подобных конструкций появились еще в древние времена, но всерьез подобное предложение внес М. Вискордини в 1925 году. Его предложение заключалось в установке в подвальной части здания катковых опор или колонн со сфери-

ческими верхними и нижними частями.

Наиболее распространенной методикой сейсмоизоляции является устройство систем с гибкой нижней частью несущих конструкций здания. Начало подобным системам было положено в виде зданий с гибким первым этажом. Подобное решение было относительно нетрудоемким, потому что не требовало каких-либо особых мероприятий. В дальнейшем эти системы не оправдали себя, так как имели ряд существенных недостатков, которые привели к катастрофическим разрушениям.

Дальнейшие исследования подобных систем показали, что отклик подобных конструкций на горизонтально распространяющиеся волны приводит к интенсивному кручению здания, что влечет за собой возрастание силовых факторов от сейсмического воздействия (они становятся даже больше, чем у обычного здания) [1].

Системы, реализующие принципы сейсмоизоляции, нашли свое продолжение в так называемых резинометаллических (эластомерных) опорах, обеспечивающих защиту зданий от сейсмических толчков (рис. 1) [2, 3, 4]. Конструкция подобных опор представляет собой чередующиеся слои металла и полимера (изначально использовался неопрен, в современном производстве все чаще находит применение синтетический каучук). Существенный недостаток подобных систем заключается в их чувствительности к низкочастотным воздействиям [5, 6]. Таким образом, как и в случае с первым гибким этажом, подобные системы не могут применяться самостоятельно и требуют устройства дополнительных средств сейсмической защиты. Так или иначе, на сегодняшний день резинометаллические опоры показывают себя с лучшей стороны [7, 8].

К системам, реализующим принцип сейсмоизоляции, также относятся системы с кинематическими опорами, системы с подвесными опорами, системы со скользящими опорами. О системах с кинематическими опорами можно сказать, что они долгое время изучались и даже были реализованы, но не оправдали себя, так как усилия между опорами распределялись неравномерно и вызывали их разрушение (рис. 2) [9, 10]. Таким образом, испытания показали, что часть опор не выдержала нагрузок и требует замены, а замена опор в построенном здании – это весьма трудоемкое мероприятие. Стоит отметить, что для данного метода сей-

¹Кузнецов С.И., Рогозин К.И. Краткий курс физики: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 215 с.

²Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1989. 320 с.

смоизоляции достаточно неплохо проработана теоретическая база [11, 12].

Системы же с подвесными опорами показали себя неплохо при натуральных испытаниях, но исполнение таких опор даже в

заводских условиях весьма проблематично, так как подобное производство требует высокой точности (рис. 2). Такая точность свойственна скорее машиностроительной отрасли, нежели строительству.

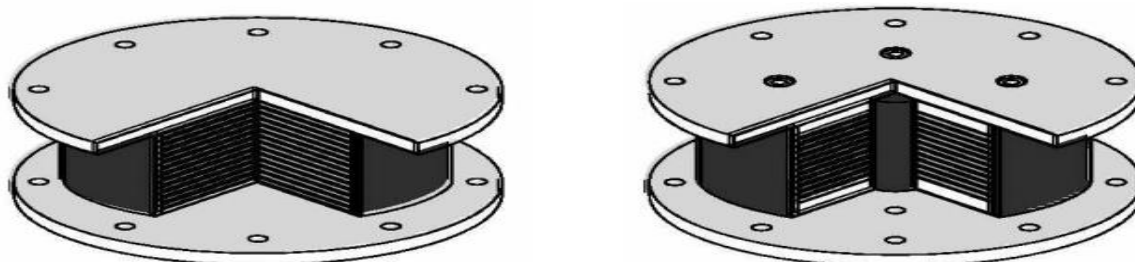


Рис. 1. Эластомерные опоры: слева – без свинцового сердечника, справа – со свинцовым сердечником

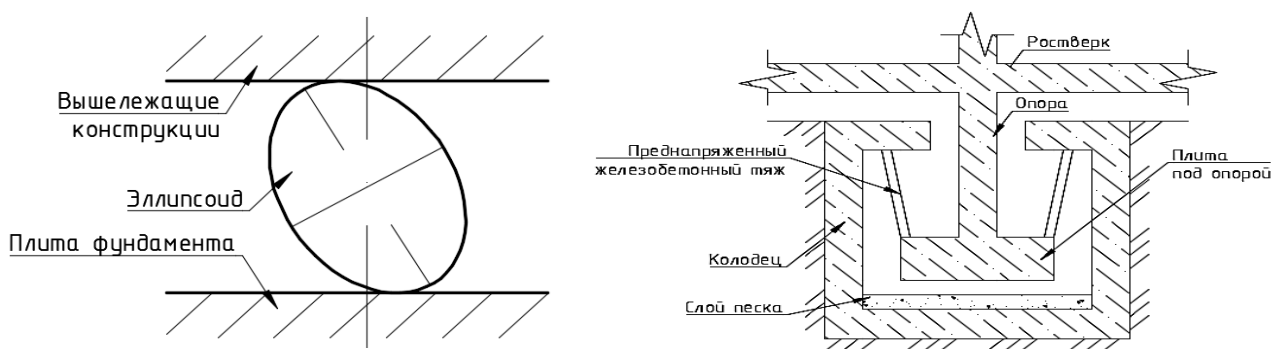


Рис. 2. Кинематические и подвесные опоры: слева – кинематическая эллипсоидная опора, справа – подвесная опора

Куда более интересными являются системы со скользящими опорами (рис. 3). Сущность данного метода, как ни странно, проста: энергия, передаваемая сейсмической волной на здание, частично затрачивается на преодоление трения скольжения. Для данного метода используются пластины

из материалов с низким коэффициентом трения скольжения, такие пластины устанавливаются между фундаментом и вышележащими конструкциями либо устанавливаются непосредственно в фундаменте, рассекая его на две горизонтальные составляющие.

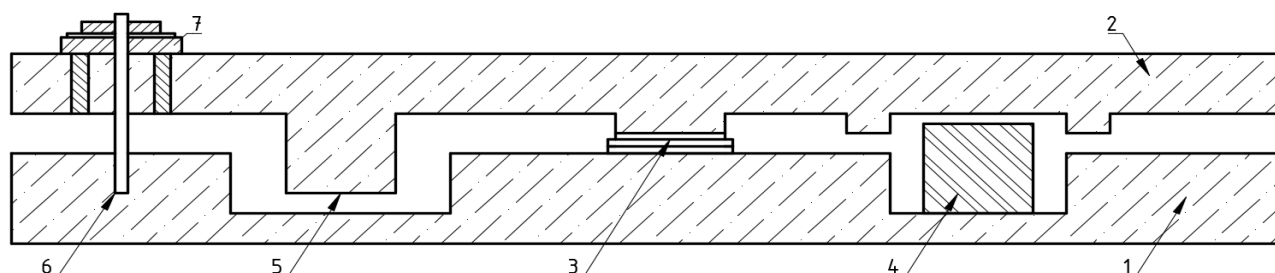


Рис. 3. Скользящая опора (скользящий пояс): 1 – верхняя обвязка фундаментов; 2 – ростверк; 3 – скользящая опора; 4 – ограничитель горизонтальных перемещений; 5 – жесткий ограничитель горизонтальных перемещений; 6 – ограничитель вертикальных перемещений; 7 – вертикальный амортизатор

Особенностью данной системы является то, что при малых сейсмических воздействиях здание ведет себя так, будто стоит на жестком основании, а при более высоких показателях нагрузок система начинает ра-

ботать на рассеяние энергии [13, 14]. При этом максимальные перемещения в горизонтальной плоскости ограничиваются резинометаллическими элементами. Принцип работы сейсмоизоляции при сейсмическом

воздействии представлен на рис. 4. Разумеется, данные деформированные схемы представлены весьма условно, так как де-

формированное состояние системы во многом зависит от способности ССЗ к диссипации энергии.

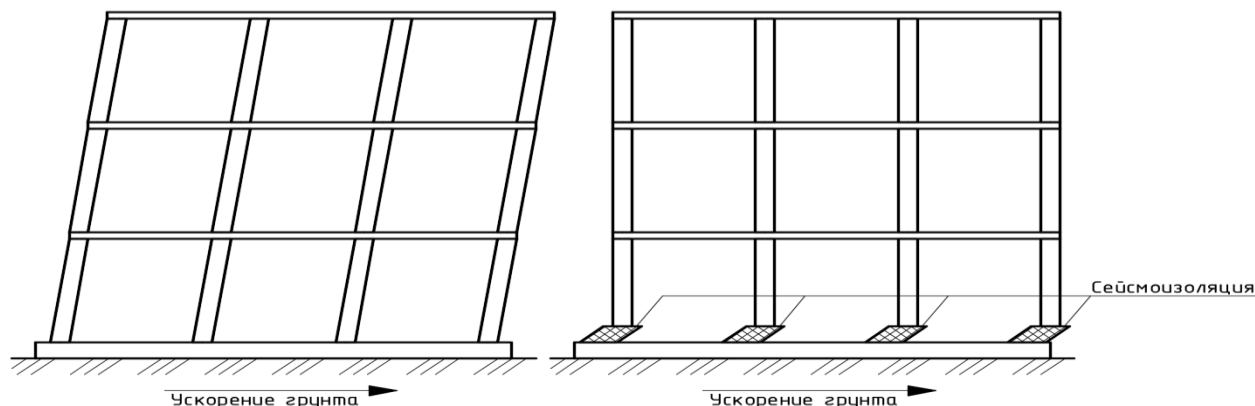


Рис. 4. Деформированные схемы здания без изоляции и с изоляцией

Тенденция развития строительной индустрии показывает, что в определенный момент системы сейсмоизоляции станут обыденностью. Однако в данное время существует ряд сложностей с точки зрения расчетов и дальнейшей реализации таких систем. Как показано на рис. 4, принцип действия сейсмоизоляции плотно связан с достаточно большими перемещениями конструкций вследствие деформирования опор или их перемещения. В случае если перемещения окажутся больше какого-либо заложенного проектом значения, то они будут автоматически остановлены упорами.

В ситуации такой «вынужденной остановки» рассматриваемое здание претерпевает удар, что едва ли является благоприятным с точки зрения работы конструкции. Избежать этого можно за счет совместной установки вязких демпферов для дополнительной диссипации энергии, но это неминуемо приведет к удорожанию ССЗ для данного проекта.

Помимо прочего, не стоит забывать об определенных сложностях с расчетом подобных систем. Современные программные комплексы позволяют нам использовать упругие опоры в качестве граничных условий, в этом случае их жесткость будет определяться характеристиками, указанными в каталоге производителя. Однако данный способ довольно прост и, безусловно, не позволяет рассчитывать здания с достаточной точностью. Связано это со сложностью учёта нелинейной работы эластомерных опор, а также с повышением их модуля деформаций при динамическом нагружении. Справедливости ради стоит отметить, что

учёт нелинейности, вероятнее всего, приведёт к большей диссипации энергии в системе, что дает нам определенного рода запас, на который, конечно, желательно не надеяться. С учётом того, что ССЗ применяются в первую очередь для экономии материалов, можно сделать вывод, что при достижении опорами предельного состояния ослабленному зданию едва ли удастся выстоять под нагрузками.

Какой-либо отработанной методики по проектированию зданий с системами сейсмоизоляции не существует. Наиболее простым методом расчета подобных систем является упрощенный линейный расчет, который предполагает, что конструкции, лежащие выше системы сейсмоизоляции, являются единым жестким телом, перемещающимся над этой системой. Для такой упрощенной системы эффективный период колебаний будет определяться по формуле:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{M/K_{eff}},$$

где M – масса надземной части здания, K_{eff} – эффективная горизонтальная жесткость системы сейсмоизоляции.

Эффективная горизонтальная жесткость в случае с эластомерными опорами определяется как:

$$K_{eff} = \frac{F_{max}}{d_{db}},$$

где F_{max} – максимальная горизонтальная сила (рис. 5), d_{db} – полное расчетное перемещение (рис. 5).

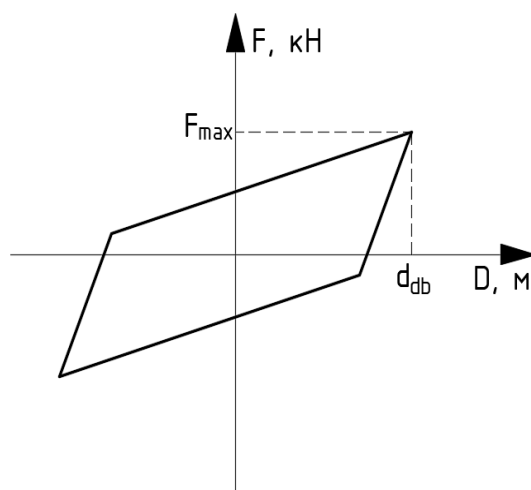


Рис. 5. Зависимость «сила-перемещение» в виде петли гистерезиса для эластомерных опор

Данная методика расчета подходит для простейших случаев. Для расчета же сложных конструкций требуется более проработанная научная теория, слишком громоздкая, чтобы описывать ее в данной статье. Таким образом, можно сделать вывод о том,

что сейсмоизоляция, несомненно, найдет широкое применение в будущем, но к тому моменту необходимо разработать надежную теорию расчета таких систем, чтобы обеспечить высокую надежность при должной экономической эффективности проекта.

Библиографический список

1. Wolf I.P., Oberhuber P. Effects of horizontally propagating waves on the response of structures with soft first storey // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1981. Vol. 9. № 1. P. 1–21.
2. Смирнов И.И., Захарова К.В. К расчету упругопластических торсионов энергопоглощающих устройств // *Инженерный вестник Дона*. 2012. Т. 23. № 4-2.
3. Abe M., Yoshida J., Fujino Y. Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: Experimental Study // *Journal of Structural Engineering*. 2004. Vol. 130. № 8. P. 1119–1132.
4. Aiken I.D., Kelly J.M., Tajirian F.F. *Mechanics of low shape factor elastomeric seismic isolation bearings*. Berkeley, CA: University of California, 1989.
5. Мкртычев О.В. Анализ эффективности резинометаллических опор при строительстве высотных зданий в сейсмических районах // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2010. № 2. С. 126–137.
6. Экспериментальное исследование здания на сейсмоизолирующих опорах при действии динамических нагрузок (Япония) // *Экспресс-информ. ВНИИС*. 1984. Вып. 17. С. 8–10.
7. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Брыксин А.А. Результаты исследования здания с резинометаллической сейсмоизоляцией методом стоячих волн (на примере здания гражданского строительства национального университета Тайваня, г. Тайбэй) // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2017. № 2. С. 53–59.
8. Хорошавин Е.А. Динамические испытания административного здания со стационарной системой сейсмоизоляции в г. Иркутске // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 6. С. 62–69.
9. Васюнкин А.Н., Бобров Ф.В. Экспериментальные исследования зданий на опорах в форме эллипсоидов вращения // *Сейсмостойкое строительство: Реф. Информ. ЦИНИС*. 1977. Вып. 1. С. 18–22.
10. Черепинский Ю.Д. *Сейсмоизоляция зданий. Строительство на кинематических опорах*. М.: Blue Apple, 2009. 47 с.
11. Тяпин А.Г. Плоские колебания жесткого сооружения на кинематических опорах. Общий случай геометрии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2020. № 4. С. 41–54.
12. Юсупов А.К. *Проектирование сейсмостойких зданий на кинематических опорах*. Махачкала: Изд-во «Лотос», 2006. 231 с.
13. Давыдова Г.В., Ермошин А.А., Уздин А.М., Румянцев А.Ю. Оценка перемещений зданий с сейсмоизолированным скользящим поясом // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2007. № 3. С. 34–36.
14. Аубакиров А.Т. К расчету зданий на сейсмоизолирующих фундаментах с элементами сухого трения // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 3. С. 70–74.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Барахтенко Александр Сергеевич,
магистрант группы ТИМм-19-1,
Институт архитектуры, строительства и дизайна,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: A.S.Barahtenko@yandex.ru

Дмитриева Татьяна Львовна,
доктор технических наук,
доцент кафедры механики и сопротивления
материалов,
Институт архитектуры, строительства и ди-
зайна,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: dmitrievat@list.ru

Alexander S. Barakhtenko,
Postgraduate Student,
Institute of Architecture, Construction and De-
sign,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: A.S.Barahtenko@yandex.ru

Tatiana L. Dmitriyeva,
Dr. Sci. (Technics),
Associate Professor of Mechanics and Strength
of Materials Department,
Institute of Architecture, Construction and De-
sign,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: dmitrievat@list.ru