

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202



Оригинальная статья /Original article

Адаптивные сейсмостойкие системы

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Данная статья является продолжением темы, затронутой в статье «Системы с оптимальными геометрическими формами», опубликованной в предыдущем выпуске настоящего журнала. Целью исследования является разработка конструктивных схем и пояснений к ним, изложение принципов их работы, конструктивных особенностей, обеспечивающих необходимую сейсмостойкость. **Метод.** Для обеспечения адаптивности используются различные конструктивные приёмы: включающиеся связи, выключающиеся связи, включающее-выключающиеся связи, здания и сооружения, состоящие из различных конструктивных блоков, имеющие различные частоты собственных колебаний. Таким образом блоки здания при колебаниях друг друга гасят, тем самым обеспечивает необходимую сейсмостойкость при землетрясениях. **Результат.** Приведены конструктивные системы с адаптивными свойствами, придающими высокую сейсмостойкость зданиям и сооружениям. **Вывод.** Изложенные в статье конструктивные приёмы обеспечивают высокую сейсмостойкость зданий и сооружений, которые могут найти применение в практике проектирования и строительства сейсмостойких систем.

Ключевые слова: сейсмостойкость, адаптивные системы, включающиеся связи, конструктивные схемы, частоты колебаний.

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Адаптивные сейсмостойкие системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (3):197-202. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202

Adaptive Earthquake-resistant Systems

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. This article is a continuation of the topic raised in the article “Systems with optimal geometric shapes”, published in the previous issue of this journal. The purpose of the study is to develop design diagrams and explanations for them, outline the principles of their operation, design features that provide the necessary seismic resistance. **Method.** To ensure adaptability, various design techniques are used: switching connections, switching connections, switching connections, buildings and structures consisting of various structural blocks having different frequencies of natural oscillations. Thus, the blocks of the building dampen each other during vibrations, thereby providing the necessary seismic resistance during earthquakes. **Result.** Structural systems with adaptive properties that impart high seismic resistance to buildings and structures are presented. **Conclusion.** The design techniques outlined in the article ensure high seismic resistance of buildings and structures, which can be used in the practice of designing and constructing earthquake-resistant systems.

Keywords: seismic resistance, adaptive systems, actuating connections, structural schemes, vibration frequencies.

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Adaptive Earthquake-resistant Systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(3): 197-202. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202.

Введение. В связи с увеличением численности населения земного шара необходимость построения сейсмостойких зданий становится актуальной [1,2,5]. Недавние землетрясения, которые произошли в Турции, говорят о недостаточности сейсмостойкости построенных зданий и сооружений. В связи с чем встают новые проблемы, связанные с со строительством сейсмостойких систем. В частности, к повышению сейсмостойкости сооружений приводят так называемые адаптивные системы.

Постановка задачи. К адаптивным относятся системы, которые приспособляются к сейсмическим воздействиям, то есть обладают способностью «убегать» от резонансного или близкого к нему состояния [4,6,7,10]. А это может произойти, если меняются частоты собственных колебаний системы в зависимости от перемещений. Такое возможно только в нелинейных системах, поскольку частоты свободных колебаний в линейных системах не зависят от перемещений. Изменение частот собственных колебаний обеспечивается за счёт внедрения в систему связей включающихся, выключающихся, или связей, обладающих свойствами включаться и выключаться. Адаптивные системы относятся к современным способам сейсмозащиты зданий и сооружений [3,10]. Все сейсмостойкие здания и сооружения должны проектироваться в соответствии с требованиями СП [11].

Методы исследования. Далее приводятся конструктивные системы сейсмостойких зданий и сооружений. Причём каждая приведенная ниже конструктивная система имеет свои преимущества и недостатки. В комментариях к конструктивным системам мы приводим эти преимущества и недостатки. Рассматриваются различные конструктивные системы, включающихся и выключающихся элементов. Даются здания, скомпонованные из отдельных блоков, соединённых между собой гибкими связями, причём каждый блок здания обладает своими частотами собственных колебаний.

Обсуждение результатов. На рис. 1.а показано здание 2 на гибких колоннах 3. Верхняя часть здания жёсткая 2. Пунктирами (рис.1.а) показаны выключающиеся связи 4. Пока горизонтальные перемещения здания при землетрясении малы, выключающиеся связи 4 выдерживают усилия. С возрастанием перемещений, когда система начинает входить в резонанс, происходит отрыв (разрушение) выключающихся связей. При этом частоты собственных колебаний системы резко уменьшаются, и здание «убегает» от опасного состояния, то есть приспособляется (адаптируется). При этом система принимает другую конструктивную структуру (рис.1.б) – где уже нет связей.

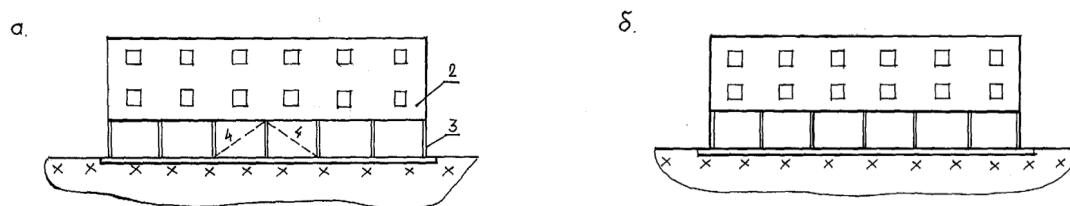


Рис.1. Здание на гибких колоннах:

а) – с выключающимися связями; б) – после выключения связей

Fig.1. Building on flexible columns:

а) – with switchable connections; б) – after turning off the connections

Недостатки: после землетрясения выключенные связи необходимо восстановить; новое состояние системы (рис.1.б) может иметь ещё относительно большие перемещения, которые, правда, быстро гасятся. Новое состояние системы должно выдерживать воздействие «новых» значений напряжений.

На рис. 2, а показано здание на гибких колоннах 3. Верхняя часть 1 здания – жёсткая. На рис. 2.б показан фрагмент, где даётся включающаяся связь 2 в виде железобетонного простенка, жестко соединенного с фундаментными конструкциями 5. Из-за наличия (рис. 2, б) зазора 4 здание 1 на гибких колоннах 3 может получить достаточно большие горизонтальные перемещения. При этом сейсмические нагрузки на здание уменьшаются. Если система начинает входить в резонанс, то колонны 3 ударяются об резиновые

упругоподатливые подушки, установленные на элементе 2 (рис. 2) в местах соприкосновения его с колоннами. При этом жёсткость системы возрастает, резко увеличиваются частоты свободных колебаний, и система «убегает» от резонансного состояния. В местах соединения гибких колонн 3 с верхней 1 и нижней 5 частями здания (рис. 2, б) могут быть два варианта сопряжения: колонны гибкие, сопряжения жесткие; колонны очень жёсткие, сопряжения – в виде конструктивного шарнира.

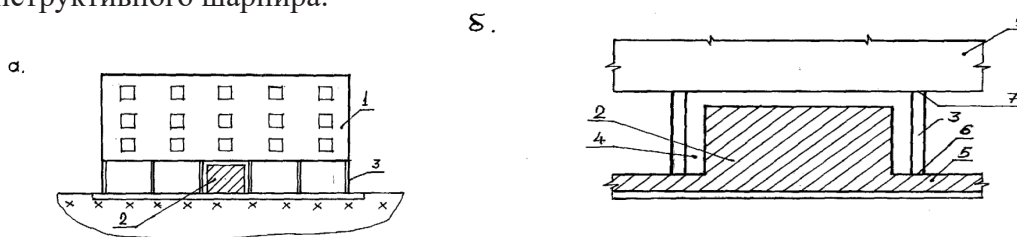


Рис. 2. Здание на гибких колоннах:

а) – с включающимися связями; б) – фрагмент включающейся связи в виде простенка

Fig. 2. Building on flexible columns:

Недостатки: в элементах включающихся связей (элемент 2, рис. 2) могут возникать чрезмерно большие нагрузки; чтобы исключить соударений необходимо устроить буферные конструкции. Устройство включающихся, выключающихся связей требует высокой культуры производства: изготовления и монтажа.

На рис. 3. показана схема кинематической опоры [8,9], состоящая из ствола и двух оголовков со сферическими поверхностями.

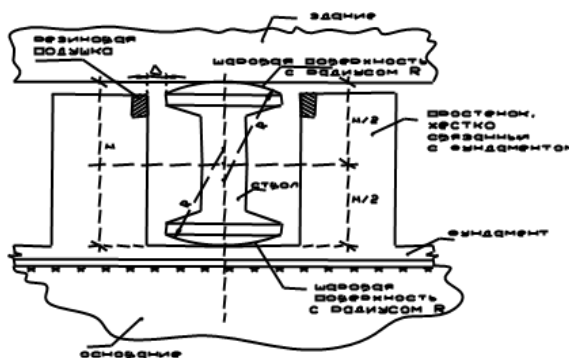


Рис.3. Кинематическая опора

Fig.3. Kinematic support

При сейсмических колебаниях такая опора работает, как «Ванька-встанька» [$R > \frac{H}{2}$]. Система – низкочастотна. Она эффективна при землетрясениях с высокочастотным спектром. При спектрах низкочастотных и широкополосных система может войти в резонанс и получить большие перемещения. Тогда включают в работу (рис. 3) упругие буфера, например, резиновые подушки, и повышается жесткость системы: частоты собственных колебаний увеличиваются – система «убегает» от резонансного или близкого к нему состояния. Зазор Δ назначается по расчету (рис. 3). В частном случае, такая кинематическая опора может иметь только один шарообразный оголовок.

Недостатки: конструкция сложна для изготовления. При качении опоры, ствол ее работает на сжатие с изгибом; в местах перехода оголовка к стволу, из-за концентрации напряжений, материал охрупчивается. Эксперименты показывают, что в наклонном состоянии опоры (во время колебаний) края оголовка дают трещины: скалываются. Конструкция рациональна в сооружениях специального назначения.

На рис. 4 дана конструктивная схема здания с гибкими колоннами 3 на первом этаже. Жёсткие простенки 5 неподвижно соединены с фундаментами. В местах соприкосновения простенка 5 с жесткой верхней частью 1 здания (рис.4, а, б) имеется сварной шов 6. Между гибкими колоннами 3 и простенками 5 имеются зазоры 4. Здесь в зависимости от величины

зазора 4 наблюдаются два варианта.

Первый вариант: зазор значительный. Система в целом изначально жёсткая. Для неё опасны землетрясения с высокочастотным спектром: система может войти в резонансное состояние. При этом развиваются значительные горизонтальные перемещения и высокие напряжения в сварном шве 6 (рис.4, б). Шов разрушается, и система становится гибкой: частоты собственных колебаний здания резко падают и сооружение в целом «убегает» от резонансного состояния. Если изначально, пока сварной шов не вышел из строя, землетрясение – низкочастотное, горизонтальные перемещения будут незначительными: система работает «хорошо».

Второй вариант: зазор незначительный. При низкочастотных землетрясениях, как уже было указано выше, система работает с малыми перемещениями. При землетрясениях система может войти в резонанс и привести к разрушению сварного шва 6 (рис.4, б). Таким образом здание «убегает» от высокочастотного резонанса. Но нередко землетрясения имеют широкий спектр частот (широкополосный спектр): имеют и высокие и низкие частоты. При этом, поскольку система (рис.4) высокочастотна, то здание реагирует на высокие частоты сейсмических воздействий, и при наступлении высокочастотного резонанса оно «убегает» от него.



Рис. 4. Здание на гибких колоннах:

а) – с включающимися – выключающимися связями;

б) – фрагмент связи с включающимися и выключающимися элементами

Fig. 4. Building on flexible columns:

a) – with switching connections; b) – a fragment of connection with elements that turn on and off

Сооружение в целом превращается в низкочастотную систему, для которой опасны уже низкие частоты. Наличие в широкополосном спектре землетрясения низких частот приводит здание в низкочастотное резонансное состояние: развиваются большие перемещения. При этом, поскольку зазор 4 мал (рис.4), простенки 5, соприкасаясь с гибкими колоннами 3, включаются в работу (включаются связи), повышается жёсткость всего здания. Частоты собственных колебаний увеличиваются, система уже второй раз «убегает» от резонанса. Недостатки: они такие же, как и на рис. 2.

На рис. 4.а показано здание на гибких колоннах 3. Верхняя часть 1 здания жесткая. Из-за наличия достаточно большого зазора 4 между колоннами 3 и жёстко закреплённого к фундаментным конструкциям простенка 5 здание при землетрясении может получить значительные горизонтальные перемещения. При этом снижаются сейсмические нагрузки на здание. С целью ограничения развития чрезмерно больших перемещений между верхней частью 1 (рис.4, б) и простенком 5 устраивается демпфер сухого трения 6, работа которого описывается законом Амонтова. Как и в случае вязких демпферов, демпфер сухого трения, хотя не меняет частоты собственных колебаний системы, уменьшает величину перемещений: не даёт системе раскачиваться.

Недостатки: в процессе эксплуатации характеристики демпферов сухого трения довольно скоро становятся не стабильными: демпферы теряют свои свойства.

На рис. 5, а показана схема фасада здания, имеющего ядро 1 и «обойму» 2. Между ними имеется зазор 3, за счёт наличия которого при землетрясении происходят колебания ядра и «обоймы» независимо (не совсем независимо). Ядро имеет относительно низкие частоты свободных колебаний, а «обойма», как жёсткая конструкция, – более высокие частоты. Если «обойма»

и ядро совершенно друг с другом не связаны, то резонансные состояния для каждого из них будут наступать при различных частотах сейсмических сил. Чтобы «обойма» и ядро друг другу «мешали», друг друга гасили при землетрясении, их соединяют с помощью демпферов. На рис. 5, в дана принципиальная схема такого демпфера. В ёмкости 6 находится вязкая жидкость, которая просачивается при перемещениях поршня 5 через его отверстия. Шток 4 соединён с ядром 1, а ёмкость 7 с вязкой жидкостью - с «обоймой 2» (рис.5, в). Вязкий демпфер не меняет собственной частоты системы в целом, но уменьшает величину перемещения, так как в соответствующей функции Грина, коэффициент, обеспечивающий её убывание во времени значителен.

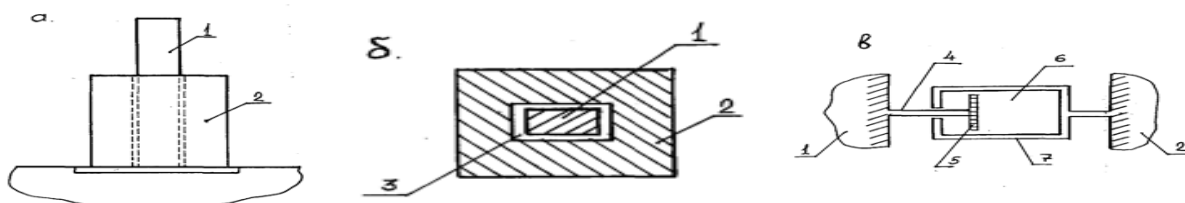


Рис. 5. Здание, состоящее из ядра и обоймы:

а) – общий вид здания; б) – схема плана здания; в) – схема демпфера

Fig. 5. A building consisting of a core and a cage:

a) – general view of the building; b) – diagram of the building plan; c) – damper diagram

Недостатки: демпфера требуют периодической проверки в процессе эксплуатации; вязкие жидкости, используемые в демпферах, очень дороги.

На рис. 6, а дана схема фасада здания. Здание сконструировано из блоков большей высоты 2 и меньшей 1. На рис. 6, б приведён план. Оба блока соединены между собой кольцами. Конструктивная схема одного из них показана на рис. 6, в. Если бы блоки не были соединены, они бы имели разные частоты собственных колебаний и резонансные ситуации у них наступали бы не одновременно. Имея соединения, они друг другу «мешают» входить в резонансное состояние. При этом кольцо 3 деформируется, становясь эллипсом, меняя положение больших и малых полуосей; возникают пластические шарниры, поглощается энергия, которая не восстанавливается (уходит в виде тепла). Всё это приводит к уменьшению перемещений здания при землетрясении. Для устройства демпферов удобна также конструктивная схема здания, показанная на рис. 2, а.

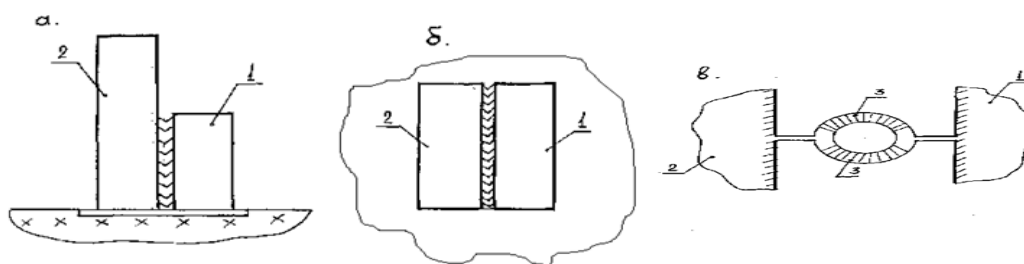


Рис. 6. Здание, состоящее из двух блоков различной высоты:

а) – общий вид здания; б) – схема здания в плане; в) – схема демпфера

Fig. 6. A building consisting of two blocks of different heights:

a) – general view of the building; b) – plan diagram of the building; c) – damper diagram

Недостатки: прочность материала колец определяется малоцикловой прочностью; происходит накопление деформаций в элементах конструкции, из которых изготовлены демпферы пластических деформаций.

Вывод. Разработаны конструктивные системы сейсмостойких зданий и сооружений с адаптивными свойствами. Приведены схемы включающихся, выключающихся и включающе - выключающихся связи.

Изложены недостатки и преимущества предлагаемых конструктивных приёмов. Даны схемы сейсмостойких зданий с демпферами сухого и пластического трения. Предлагаемые конструктивные схемы могут найти применение при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений различного назначения.

Библиографический список:

1. Айзенберг Я.М. Два разрушительных землетрясения в Турции за три месяца 1999г. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2000. - №1.- С. 54-57.
2. Абакаров А.Д., Крамынин П.И. Выбор рациональных площадок для строительства сейсмостойких зданий в г. Махачкале (Инженерно геологические особенности Дагестанской АССР), 1984.
3. Айзенберг Я.М., Миносян А.В. Взаимодействие сооружения с упруго-пластическим грунтом при сейсмических воздействиях //Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001, №2.
4. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция зданий в России и СНГ// Сейсмостойкое строительство», 1998, № 1. С. 23-26.
5. Кириков Б. А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. Изд-во “Наука”, М. 1990.
6. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (Основы теории сейсмостойкости). Изд-во Высшая школа, М.1983.
7. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. Стройиздат, М. 1989.
8. Уздин А.М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера-строителя//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. №1.С. 27-31.
9. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. — М.: Стройиздат, 1978.—311с.
10. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах.
11. Айзенберг Я.М, В. И. Смирнов, А. В. Минасян. Качающиеся опоры с гидроциркуляционной системой для сейсмоизоляции сооружений// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений — Вып. 2. 2000. С. 34-36.

References

1. Aizenberg Ya.M. Two devastating earthquakes in Turkey in three months in 1999. Earthquake-resistant construction. Building safety”. 2000; 1: 54-57. (In Russ)
2. Abakarov A.D., Kramynin P.I. Selection of rational sites for the construction of earthquake-resistant buildings in the city of Makhachkala (Engineering and geological features of the Dagestan ASSR), 1984. (In Russ)
3. Aizenberg Ya.M., Minosyan A.V. Interaction of a structure with an elastic-plastic soil under seismic influences. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2001; 2. (In Russ)
4. Aizenberg Ya.M. Seismic isolation of buildings in Russia and the CIS. *Earthquake-resistant construction*, 1998; 1: 23-26. (In Russ)
5. B.A. Kirikov, Ancient and Newest Seismic-Resistant Structures. Publishing house “Science”, M. 1990. (In Russ)
6. Polyakov S.V. Seismic-resistant structures of buildings (Fundamentals of the theory of seismic resistance). Publishing House Higher School, M.1983. (In Russ)
7. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Modern methods of seismic protection of buildings. Sroizdat, M. 1989. (In Russ)
8. Uzdin A.M. Setting the seismic impact. View of a civil engineer. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2005; 1:27-31. (In Russ)
9. Polyakov S.V. Consequences of strong earthquakes. M. : Sroizdat, 1978; 311. (In Russ)
10. SP 14.13330.2018 “SNiP II-7-81* Construction in seismic areas. (In Russ)
11. Aizenberg Ya.M., V.I. Smirnov, A.V.Minasyan. Swinging supports with a hydrocirculation system for seismic isolation of structures. *Earthquake-resistant construction. Building Safety*.2000;2: 34-36. (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 17.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 31.08.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 31.08.2023.