

УДК 699.841

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ



MODERN METHODS OF ENSURING EARTHQUAKE RESISTANCE OF HIGH-RISE BUILDINGS AND STRUCTURES

Замаруева Ирина Валерьевна

студент,
Кубанский государственный технологический университет
ira.zamarueva@yandex.ru

Кибирова Надежда Астемировна

студент,
Кубанский государственный технологический университет
nadezhda.ribrova@mail.ru

Аннотация. В данной статье подробно описываются наиболее часто применяемые в настоящее время методы обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений, проектируемых для строительства в сейсмически опасных районах.

Ключевые слова: сейсмостойкость зданий и сооружений, традиционный способ, нетрадиционный способ, активная сейсмозащита, пассивная сейсмозащита.

Zamarueva Irina Valeryevna

Student,
Kuban State Technological University
ira.zamarueva@yandex.ru

Kibirova Nadezhda Astemirovna

Student
Kuban State Technological University
nadezhda.ribrova@mail.ru

Annotation. This article describes in detail the most commonly used methods currently used to ensure the seismic resistance of buildings and structures designed for construction in seismically hazardous areas.

Keywords: earthquake resistance of buildings and structures, traditional method, non-traditional method, active seismic protection, passive seismic protection.

Введение

Сейсмостойкость – это важная характеристика, которой должно обладать здание или сооружение при его строительстве в сейсмически активном регионе. А при проектировании высотных зданий следует учитывать влияние землетрясения, даже при низкой вероятности его возникновения. Кроме того, важным является тот факт, что эффекты от воздействия сейсмических нагрузок на нижних и верхних этажах различны. Например, расшифровки сейсмограмм, записанных в Москве в 1977 и 1986 годах, показали, что землетрясения силой до 4 баллов на уровне поверхности земли приводят к возникновению на верхних этажах эффектов, соответствующих воздействиям силой 6, 7 и более баллов [1].

В России и многих зарубежных странах в настоящее время сформировалось два принципиально отличных друг от друга направления повышения сейсмостойкости зданий и сооружений: традиционное и специальное (нетрадиционное).

1. Традиционные методы обеспечения сейсмостойкости

Традиционный подход к проектированию сейсмостойких зданий основывается на увеличении прочности несущих конструкций здания и его способности сопротивляться воздействию поперечных динамических нагрузок. В данном подходе повышение сейсмической стойкости осуществляется с помощью объемно-планировочных и конструктивных мероприятий. При этом должны соблюдаться следующие принципы, которые включены в действующие нормативные документы СП 14.13330.2018 [2] и приведены ниже.

1. Принцип симметрии. Сейсмические массы и жесткости должны быть распределены равномерно и симметрично относительно центра тяжести сооружения.

2. Принцип гармонии. Геометрические параметры здания должны быть пропорциональными, а длина или высота не должны быть крайне большими.

3. Принцип снижения массы. Здание должно проектироваться из легких конструкций с центром тяжести, размещенным на минимально возможной высоте.

4. Принцип эластичности (предельная податливость). Строительные материалы, применяемые для несущих и ограждающих конструкций должны обладать упругими свойствами, а конструкции, изготовленные из них, должны быть однородными.

5. Принцип замкнутого контура. Несущие конструкции должны образовывать замкнутые контуры, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

6. Принцип фундаментальности. Фундаменты должны быть достаточно глубоко заложены с заменой жесткой связи между фундаментом и сооружением за счет использования пластического вяжущего материала.

Повышение несущей способности конструкций простым увеличением прочности приводит к дополнительным затратам строительных материалов и денежных средств. Кроме того, данные действия приводят к увеличению массы и, как следствие, инерционных сейсмических нагрузок.

2. Нетрадиционные методы обеспечения сейсмостойкости

Так как характер поведения здания при землетрясении предсказать практически невозможно, поэтому наряду с традиционными методами обеспечения сейсмостойкости зданий в последние годы стали широко применяться различные системы сейсмозащиты – специальные (нетрадиционные) методы [3]. Они основываются на изменении массы или жесткости, а также демпфировании системы в зависимости от ее перемещений и скоростей, что позволяет не только снизить затраты на усиление конструкции, но и улучшает прочностные характеристики и надежность всего здания [4].

К принципам, на которых базируются специальные методы, относятся снижение собственной частоты колебаний сооружения по сравнению с преобладающими частотами сейсмического воздействия, устройство фундаментов без жесткой связи с сооружением, использование динамических гасителей различного типа и др.

В промышленно развитых странах насчитывается множество объектов, в том числе здания с высокой степенью ответственности (реакторные отделения АЭС, аэропорты, объекты космической отрасли, высотные здания и т.п.), в которых применены различные средства сейсмоизоляции.

Среди средств специальной сейсмозащиты можно выделить активную (имеющую дополнительный источник энергии) и пассивную.

2.1. Пассивная сейсмозащита

Несмотря на то, что при землетрясениях в фундаменте редко возникают повреждения, он играет важную роль в обеспечении сейсмостойкости всего здания. Чем прочнее его связь с грунтом, тем выше сейсмические нагрузки, формирующиеся в несущих конструкциях здания, передающиеся от грунта фундаментами. С помощью системы пассивной сейсмозащиты возможно достижение уменьшения связи между зданием и грунтом. По принципу, лежащем в основе, данные системы делятся на два направления, в одном случае используется принцип трения-скольжения, а в другом – трения-качения.

2.1.1. Слоистые эластомерные опоры

Самыми распространенными средствами пассивной сейсмозащиты в российском и зарубежном строительстве являются многослойные сейсмоизоляторы. Другое название многослойных сейсмоизоляторов – слоистые эластомерные опоры (СЭО). Многослойные сейсмоизоляторы конструктивно состоят из металлических пластин и резиновых листов, попеременно уложенных друг за другом. За счёт упругой горизонтальной податливости СЭО фундамент смещается вместе с грунтом во время землетрясения, а основная частота собственных колебаний конструкций снижается, а параллельное выключение упруго-пластических устройств приводит к значительному затуханию колебаний.

Принципиальная схема эластомерного сейсмоизолятора представлена на рисунке 1.

В качестве материала металлических пластин в подавляющем большинстве случаев выступает сталь. Эти пластины предотвращают выпучивание резиновых листов при действии вертикальных нагрузок и обеспечивают вертикальную прочность и жёсткость опор.

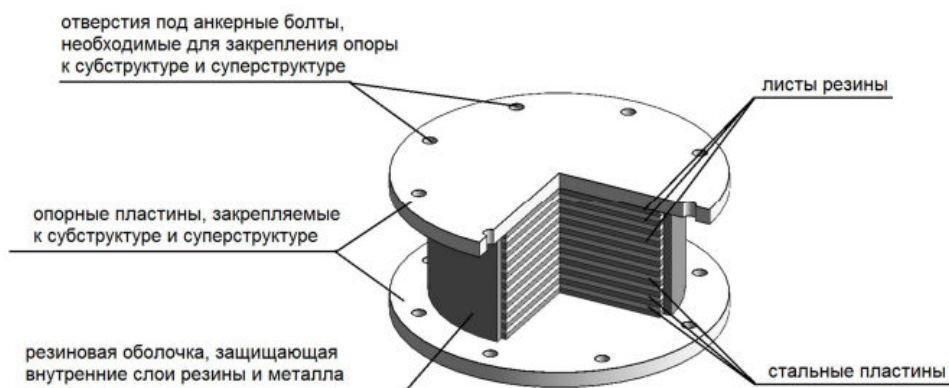


Рисунок 1 – Схема эластомерного сейсмоизолятора

Полимерные листы производятся из натуральной и искусственной резины. Обладая низкой сдвиговой жесткостью резины, они отвечают за горизонтальную податливость опор.

Установка опорных элементов многослойных сейсмоизоляторов производится под каждой колонной каркаса или в местах пересечения несущих стен.

Данный вид сейсмоизоляторов рассчитан на восприятие многоцикловых усилий растяжения, сжатия, сдвига и кручения.

Если при восприятии собственного веса здания вертикальные деформации эластомерных опор не превышают нескольких миллиметров, то при горизонтальных колебаниях сдвиговые деформации достигают нескольких десятков сантиметров (рис. 2).



Рисунок 2 – Деформирование эластомерной опоры при сжатии, растяжении и сдвиге

Примером использования слоистых эластомерных опор в практике отечественного строительства может служить 25-этажное здание гостинично-туристического комплекса «Sea Plaza» в г. Сочи высотой около 99 м, в подземной части которого для уменьшения сейсмических нагрузок были применены СЭО, выпускаемые итальянской фирмой «FIP Industriale S.p.A» [5]. Данное решение позволило как минимум в два раза снизить сейсмические нагрузки расчетных землетрясений и сохранить предлагаемый архитектурный облик здания, который не соответствует некоторым современным нормам сейсмостойкого строительства в РФ.

2.1.2. Эластомерные опоры со свинцовыми сердечниками

Кроме обычных эластомерных опор в настоящее время применяются опоры со свинцовыми сердечниками и имеют большее распространение, чем первые. Их резиновые прослойки имеют невысокие демпфирующие свойства. Размещение свинцового сердечника возможно в центре, как одного стержня, или он может быть распределен по периметру опоры. Суммарный диаметр сердечника должен составлять около 15–33 % от внешнего диаметра опоры. Схема данного сейсмоизолятора представлена на рисунке 3.

При небольших горизонтальных сейсмических нагрузках работа таких сейсмоизоляторов представляется как работа жестких элементов в вертикальном и горизонтальном направлениях. При высоких же горизонтальных нагрузках в вертикальном направлении сейсмоизоляторы все же продолжают работать как жесткие элементы, но в горизонтальном направлении они уже рассматриваются как податливые связи. При таких значениях воздействий горизонтальные деформации сдвига эластомерных опор со свинцовыми сердечниками могут развиваться до 400 %.

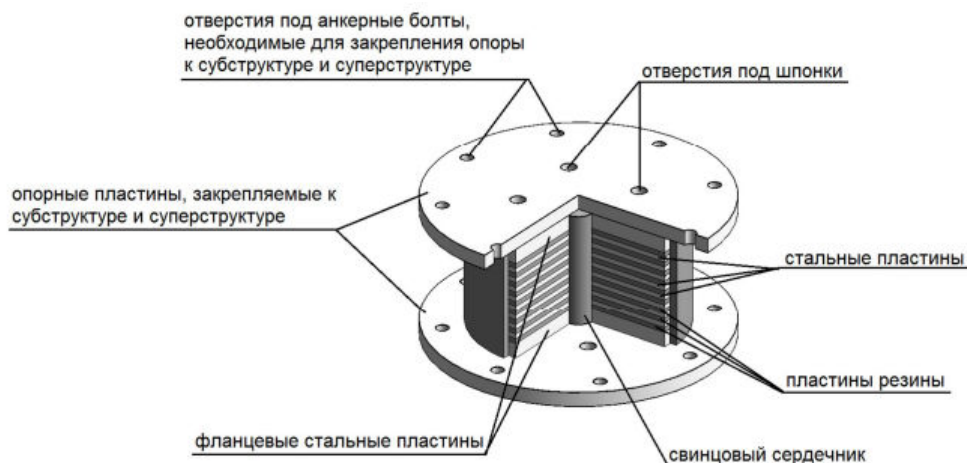


Рисунок 3 – Схема эластомерного сейсмоизолятора со свинцовым сердечником

Такой системой сейсмоизоляции оборудовано 24-этажное здание делового центра «Спутник» в городе Сочи с сейсмичностью площадки 9 баллов по карте ОСР-97В. В уровне пятого этажа размещено порядка 200 резинометаллических опор со свинцовыми сердечниками [5].

2.1.3. Плоские скользящие опоры

По принципу трения-скольжения реализуется способ сейсмозащиты здания с применением скользящей пары из пластин фторопласта и шлифованной нержавеющей стали (рис. 4). Они представляют собой опоры или ряды опор, расположенные между обрезом фундамента и нижней опорной частью несущих конструкций здания. В данной системе нижняя стальная пластина, по которой происходит скольжение прикреплена к конструкции фундамента, а верхняя – имеет жесткую связь с нижней частью конструкций здания. При землетрясении значение сейсмических сил превысит значение сил трения между нижней и верхней пластинами, но за счет проскальзывания здания относительно перемещающегося вместе с грунтом фундамента, оно сохранит свое равновесие.

Плоские скользящие опоры сухого трения весьма чувствительны и срабатывают даже при малом горизонтальном воздействии. Кроме того, порог срабатывания данной системы регулируется варьированием коэффициента трения.

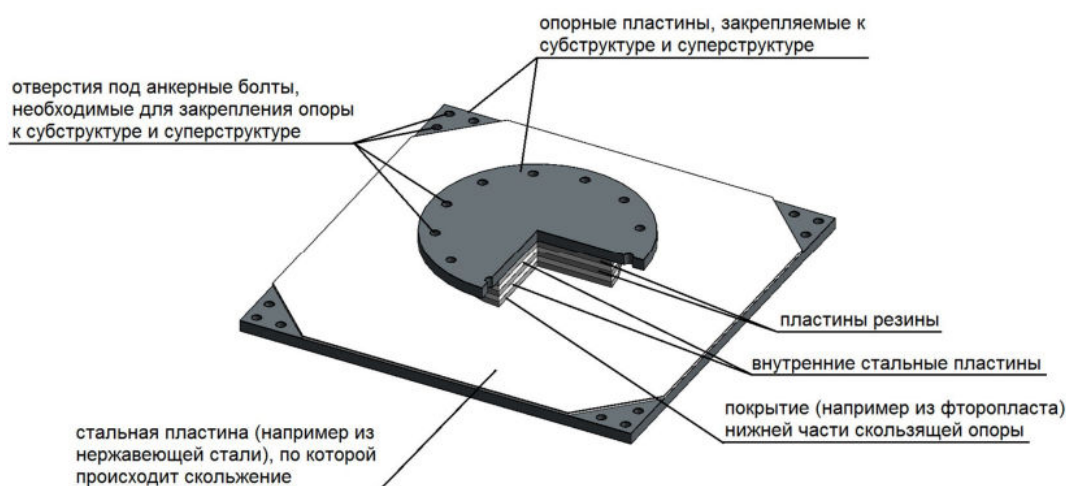


Рисунок 4 – Плоская скользящая опора

Недостатком плоских скользящих опор является сохранение конечных односторонних перемещений в пределах нижней плиты скольжения сейсмоизолированной конструкции даже после прекращения землетрясения. Это обусловлено отсутствием в опорах данного типа восстанавливающих сил, которые стремились бы вернуть опору в первоначальное положение. Для устранения данного недостатка плоские скользящие опоры устанавливают в паре с элементами, в которых при горизонтальном смещении

возникают восстанавливающие силы. Пример такой комбинации плоской скользящей опоры и слоистой эластомерной опоры представлен на рисунке 5.

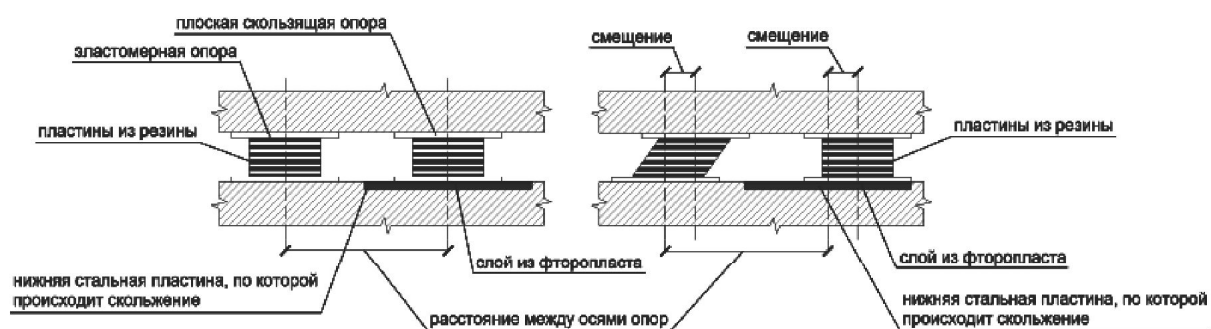


Рисунок 5 – Совместное использование плоской скользящей опоры и эластомерной опоры

2.1.4. Маятниковые скользящие опоры

Маятниковые скользящие опоры – это фрикционно-подвижные опоры со сферическими поверхностями скольжения. Данные опоры имеют такую же конструкцию, как и плоские скользящие опоры, но одна или несколько их поверхностей скольжения имеет сферическую форму.

Вследствие того, что при использовании этого типа опор в случае сейсмического воздействия сейсмоизолированная конструкция будет совершать движения сходные с движениями маятника с трением такие опоры получили название маятниковых скользящих опор.

В состав маятниковой скользящей опоры входят: одна или несколько вогнутых сферических поверхностей скольжения, один или несколько ползунов и бортики на поверхностях скольжения, ограничивающие горизонтальное перемещение ползунов.

Подобно скользящим опорам, маятниковые опоры изготавливаются из нержавеющей стали, а поверхности скольжения покрываются особыми материалами, которые обеспечивают требуемый коэффициент трения. Помимо того металлические конструкции требуют тщательного ухода за ними для обеспечения их надежности и долговечности [6].

Преимуществом рассматриваемых опор перед плоскими скользящими является то, что после прекращения сейсмического воздействия они возвращаются в исходное положение. Данный эффект достигается использованием вогнутых сферических поверхностей, в которых горизонтальная составляющая силы тяжести стремится вернуть ползун в состояние устойчивого равновесия, то есть в начальное положение.

На рисунке 6 представлена схема одномаятниковой скользящей опоры.

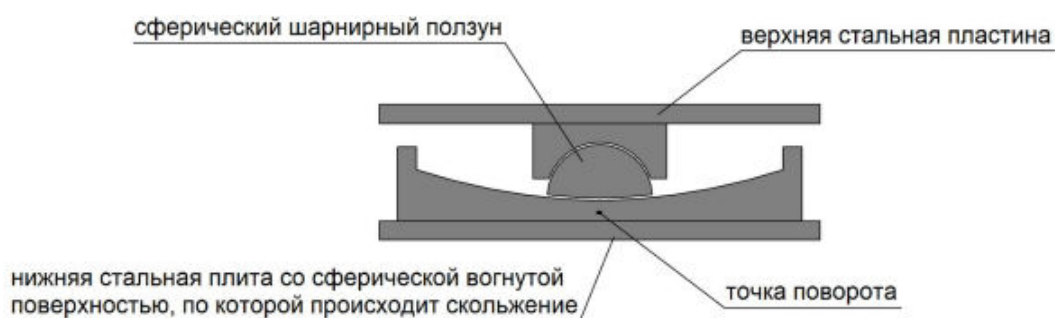


Рисунок 6 – Одномаятниковая скользящая опора

Принцип действия одномаятниковой скользящей опоры представлен на рисунке 7.

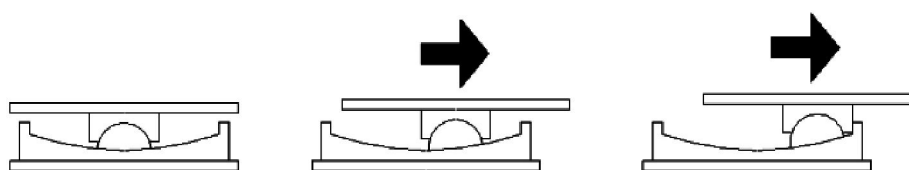


Рисунок 7 – Принцип действия одномаятниковой скользящей опоры

2.1.5. Инерционный демпфер

Помимо вышеперечисленных методов пассивной сейсмозащиты в практике высотного строительства используются инерционные демпферные системы, которые ослабляют эффект горизонтального сейсмического воздействия в высотных зданиях. Они представляют собой специальные грузы, которые подвешиваются или устанавливаются на гидравлических креплениях в верхних этажах башен.

Принцип действия такого демпфера состоит в том, что при землетрясении и отклонении здания в любую сторону он движется с той же частотой, но в противоположную сторону, тем самым позволяя держать амплитуду колебаний в безопасных для здания пределах.

В одном из известных небоскребов мира «Тайбэй 101» в Тайване (высотой 509 м), размещенный между 78 и 92 этажами 728-тонный маятник-отвес обеспечивает устойчивость верхней части небоскреба во время сильных ветров и позволяет ему выдержать землетрясение мощностью в 7 баллов (рис. 8) [7].

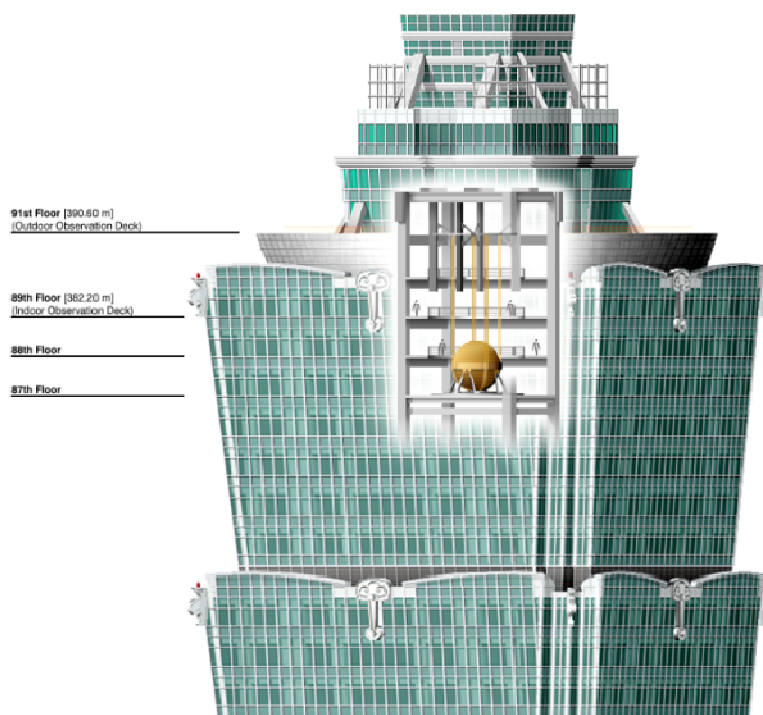


Рисунок 8 – Инерционный демпфер на высотном здании «Тайбэй 101», расположенный в столице Тайваня – Тайбэе

2.2. Активная сейсмозащита

Активная сейсмозащита зданий реализуется изменением их динамических свойств и выводом из состояния резонанса с помощью специальных устройств, которыми оснащаются здания. Этот способ является самым прогрессивным и эффективным в области сейсмостойкого строительства, так как в этом случае в здании устанавливаются управляемые силовые приводы. Управление производится с помощью современных компьютерных систем, которые производят обработку информации от происходящего землетрясения.

Для создания «активной сейсмозащиты» специалистами Японии применяется специальное устройство на первом этаже здания, которое осуществляет автоматически отстройку от резонансного режима. Схематическое изображение такого устройства приведено на рисунке 9.

В составе устройства имеются диагональные связи, в каждую из которых введены поршневые элементы. Цилиндры поршней соединены между собой трубкой, по которой в зависимости от нагружения диагональных стержней перетекает несжимаемая жидкость. При изменении скорости протекания жидкости меняется и жесткость диагональных связей. Для регулирования скорости протекания жидкости на трубке имеется задвижка, которая управляется программирующим устройством, меняющим жесткость конструкций здания так, чтобы в нем не возникало резонансных явлений [5].

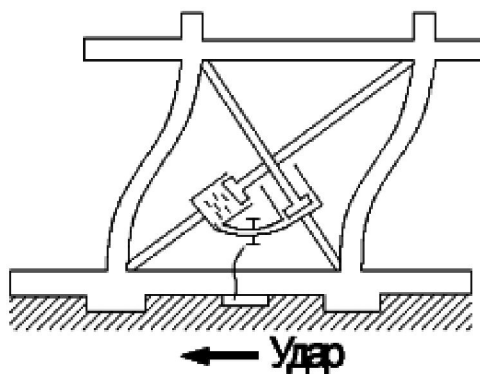


Рисунок 9 – Схема устройства для изменения жесткостных характеристик здания и его динамических параметров

Достоинством, позволяющим называть систему активной сейсмозащиты лидером среди всех средств, обеспечивающих сейсмостойкость здания, является широкий диапазон применимости. Управляющие силы генерируются непосредственно на основе анализа фактических нагрузок и деформаций строительных конструкций, с чем не могут конкурировать пассивные системы, которые являются эффективными только для тех колебаний, на которые они настроены [8].

Заключение

На сегодняшний день проблема сейсмостойкого строительства является весьма актуальной в Российской Федерации и за рубежом. Эффективными методами обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений являются применение системы пассивной или активной сейсмоизоляции. При этом в последнее время практикуется использование одного или нескольких типов сейсмоизолирующих и (или) демпфирующих устройств. Назначение конкретного типа сейсмоизоляции происходит специалистами на стадии проектирования в зависимости от конструктивного решения и назначения объекта, вида строительства (новое строительство, реконструкция, усиление), а также от сейсмологических и грунтовых условий площадки.

Тем не менее пассивная и активная сейсмоизоляции как методы защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий являются ещё молодыми и развивающимися системами, требующими более глубокого исследования и практической проверки временем. Также необходимо учитывать работу металлических средств обеспечения сейсмостойкости в условиях получения ими локальных разрушений при землетрясении [9] и многих других факторов, снижающих эффективность применения данных средств.

Литература

1. Сальников А.А., Шашин Д.А. Некоторые аспекты проектирования и строительства сейсмостойких высотных зданий // *Материалы XII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум»*. – URL : <https://scienceforum.ru/2020/article/2018022331>
2. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.
3. Халелова А.К. Обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений // *Молодой ученый*. – 2020. – № 46 (336). – С. 40-44. – URL : <https://moluch.ru/archive/336/75185/>
4. Арутюнян А.Р. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений.
5. Мустакимов В.Р. Проектирование сейсмостойких зданий : учебное пособие. – 2016. – 343 с.
6. Сорокина Е.Н., Жуковский Н.А., Щербак Д.В. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений // *Актуальные вопросы теории и практики развития научных исследований : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Омск, 24 января 2022 года. Часть 1.* – Стерлитамак : Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований», 2022. – С. 93–98.
7. Вагабов Г.А., Мустафин Р.Р. Строительство зданий и сооружений из железобетона в зоне повышенной сейсмической активности // *Молодой ученый*. – 2019. – № 47 (285). – С. 142–145. – URL : <https://moluch.ru/archive/285/64273/>

8. Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1 [Электронный ресурс]. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5510

9. Карпанина Е.Н. Некоторые вопросы обеспечения живучести зданий и сооружений с учетом запроектных воздействий // Science Time. – 2016. – № 5(29). – С. 275–279.

References

1. Salnikov A.A., Shashin D.A. Some aspects of the design and construction of earthquake-resistant high-rise buildings // Materials of the XII International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum». – URL : <https://scienceforum.ru/2020/article/2018022331>

2. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Actualized edition of SNiP II-7-81*.

3. Khalelova A.K. Ensuring seismic resistance of buildings and structures // Young Scientist. – 2020. – № 46 (336). – P. 40–44. – URL : <https://moluch.ru/archive/336/75185/>

4. Arutyunyan A.R. Modern Methods of Seismic Insulation of Buildings and Structures.

5. Mustakimov V.R. Designing earthquake-proof buildings : a training manual. – 2016. – 343 p.

6. Sorokina E.N., Zhukovsky N.A., Shcherbak D.V. Increasing the reliability of metal structures of buildings and structures // Actual issues of theory and practice of scientific research development : a collection of articles on the results of the International Scientific-Practical Conference : in 2 parts, Omsk, January 24, 2022. Part 1. – Sterlitamak : Limited Liability Company «International Research Agency», 2022. – P. 93–98.

7. Vagabov G.A., Mustafin R.R. Construction of buildings and structures from reinforced concrete in the zone of increased seismic activity // Young Scientist. – 2019. – № 47 (285). – P. 142–145. – URL : <https://moluch.ru/archive/285/64273/>

8. Engineering Herald of the Don. – 2019. – № 1 [Electronic resource]. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5510

9. Karpanina E.N. Some issues of survivability of buildings and structures taking into account beyond design impacts // Science Time. – 2016. – № 5(29). – P. 275–279.