

УДК 699.841:624.042.8

ИННОВАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ЗА РУБЕЖОМ

ІННОВАЦІЙНІ СИСТЕМИ СЕЙСМОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ЗА КОРДОНОМ

INNOVATIVE SYSTEMS OF SEISMOPROTECTION OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS ABROAD

Литвинова Э.В., к.т.н., доц. (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, г. Симферополь), **Литвинов Б.А.** (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, г. Симферополь)

Літвінова Е.В., к.т.н., доц. (Національна академія природоохоронного та курортного будівництва, м. Сімферополь), **Літвінов Б.О.** (Національна академія природоохоронного та курортного будівництва, м. Сімферополь)

Litvinova E.V., candidate of technical sciences (The National academy of environmental protection and resort development, Simferopol), **Litvinov B.** (The National academy of environmental protection and resort development, Simferopol)

Приведены классификация и инновационные конструктивные решения систем сейсмозащиты зданий и сооружений за рубежом.

Наведені класифікація та інноваційні конструктивні рішення систем сейсμοзахисту будівель і споруд за кордоном.

Classification and innovative constructive decisions of systems of seismoprotection of buildings and constructions abroad are resulted.

Ключевые слова:

Сейсмозащита, сейсмоизоляция, сейсмостойкость, конструктивная сейсмобезопасность, пространственная фундаментная платформа (ПФП), стационарные и адаптивные системы.

Сейсμοзахист, сейсμοізоляція, сейсмосійкість, конструктивна сейсmobезпека, просторова фундаментна платформа (ПФП), стаціонарні і адаптивні системи.

Seismoprotection, seismoisolation, seismic stability, constructive seimosafety, spatial base platform (SBP), stationary and adaptive systems.

Введение. Задачу уменьшения материального и социального ущерба от сильных землетрясений решают двумя путями: развитием прогноза землетрясения и строительством сейсмостойких зданий и сооружений.

Методы обеспечения сейсмостойкости [4]:

- 1) организационные – защита от землетрясений;
- 2) инженерные – сочетание расчетов и эмпирических решений: особых конструктивных и объемно–планировочных схем;
- 3) экономические;
- 4) комбинированные.

В настоящее время наиболее эффективным и экономически целесообразным инструментом в сейсмостойком строительстве является контроль сейсмической нагрузки и, в частности, сейсмическая изоляция, позволяющая возводить сравнительно легкие и недорогие постройки.

Сейсмоизоляция – это современная технология сейсмической защиты, обеспечивающая снижение сейсмического воздействия на сооружения при землетрясении и доказавшая свою эффективность и экономическую конкурентоспособность по сравнению с обычными способами обеспечения сейсмостойкости различных сооружений, таких, как мосты, гражданские здания, исторические памятники и ответственные сооружения [7].

Анализ последних исследований. На сегодняшний день известно более 100 запатентованных конструктивных решений, которые позволяют значительно снизить сейсмические нагрузки на здания и сооружения, обеспечив их сейсмобезопасность [1–3, 5–8]. Специалистами Украины, России и зарубежных стран предложены разнообразные устройства систем сейсмоизоляции и гасители энергии колебаний сооружений, а также системы с использованием сплавов, запоминаящих объемное состояние, и другие «интеллектуальные» системы [9].

Постановка цели и задачи исследования. Повышение сейсмозащищенности зданий и сооружений может быть обеспечено путем выведения спектра его собственных колебаний за пределы наиболее интенсивных участков спектров реальных интенсивных землетрясений данного региона. Эту задачу можно решать, во–первых, путем повышения жесткости здания вместе с фундаментом, во–вторых, с помощью уменьшения жесткости конструкции выводящей собственные колебания здания в область более низких частот. Второе решение экономически более целесообразно. Уменьшение жесткости при этом осуществляют в основном на уровне связи между фундаментом и основной конструкцией.

Методика исследований. Устройства сейсмоизоляции превращают изолируемый объект в колебательную систему, собственную частоту свободных колебаний которой определяют соотношением геометрических параметров устройства сейсмоизоляции. Выбором этих параметров можно

придать изолируемому объект частоту собственных колебаний, значение которой может принадлежать широкому интервалу.

В районах повышенной сейсмичности и сложных грунтовых условий целесообразно вместо приспособления традиционных конструкций развивать новые конструктивные решения, в первую очередь фундаменты и сейсмозащитные устройства, снижающие сейсмические воздействия. Необходимо развивать применение конструкций и методов конструктивной сейсмобезопасности, используя как новые, так и древнейшие подходы. К таким подходам и принципам относятся [5, 6]:

- рациональное пространственное формообразование цельной единой системы «фундамент–здание», в том числе многосвязанных замкнутых систем;
- разработка конструкций, малочувствительных к негативным сейсмическим воздействиям, в том числе пространственные фундаментные платформы (ПФП) на скользящем слое, расположенном между основанием и платформой;
- первоочередное использование таких сейсмозащитных устройств, которые снижают (или предотвращают) передачу энергии сейсмических колебаний на фундамент и систему в целом.

Таким устройствам целесообразно отдавать предпочтение по сравнению с традиционной сейсмоизоляцией, которая снижает воздействие на отдельные части здания.

Профессором А.М. Уздиным была предложена в 1993 году схема классификации сейсмозащиты, в которой не были предусмотрены способы внешнего снижения сейсмических воздействий и защитные устройства (экраны), в том числе малочувствительные конструкции, траншеи, фундаментные волногасящие платформы (рис. 1) [1, 2, 8].

При традиционной сейсмозащите используемые внутри здания устройства для прерывания или рассеивания энергетического потока ослабляют цельность системы, разделяя одни части от других. Они являются как бы инородными включениями, которые при отсутствии сейсмичности не нужны, других функций не выполняют и удорожают строительство. Применяемые современные демпфирующие устройства, как правило, являются неконструктивными, т. е. дополнительными элементами.

Новые устройства, например пространственная фундаментная платформа (ПФП) на скользящем слое, являются частью системы, которая укрепляет цельность всей системы и выполняет ряд конструктивных и эксплуатационных функций, как при наличии, так и отсутствии сейсмичности [3, 5, 6].

Существующие системы сейсмоизоляции на основании принятой выше классификации подразделяются на две группы [3]:

- адаптивные;
- стационарные.

Причем стационарные системы могут иметь или не иметь возвращающую силу, действующую на сейсмоизолированные части сооружения.

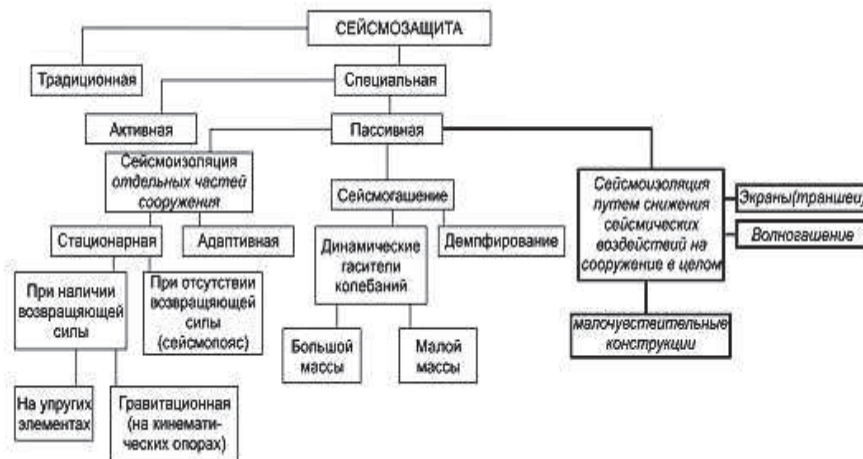


Рис. 1. Дополненная классификация систем сейсмозащиты по принципу их работы (по проф. Абовскому Н. П., Сибирский федеральный университет)

Стационарные системы сейсмоизоляции [3].

1. Здания с гибким нижним этажом – устройства сейсмоизоляции при наличии возвращающей силы. Гибкий этаж может быть выполнен в виде каркасных стоек, упругих опор, свай и т. п. (рис. 2). Конструкция состоит из гибких опор, выполненных из пакета упругих стержней небольшого диаметра, размещенных между надземной и подземной частями здания.

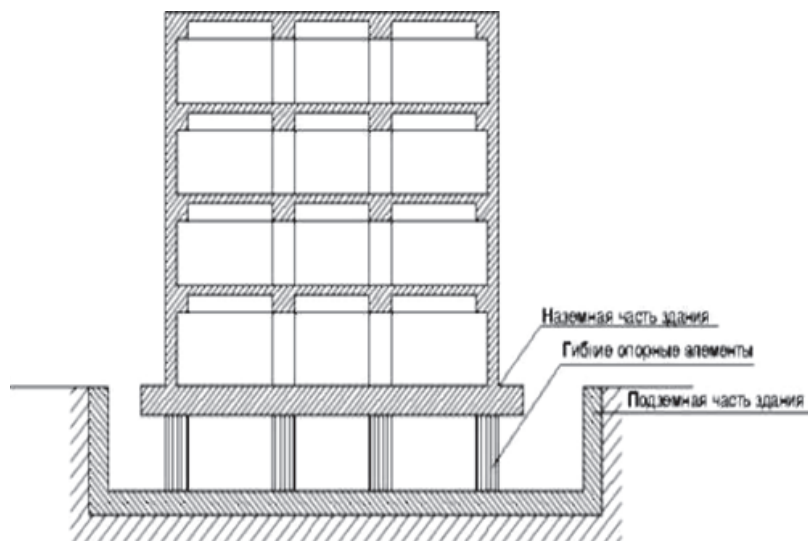


Рис. 2. Здание с гибким нижним этажом

2. Упругие опорные элементы в виде подвесок использованы в здании по проекту Ф. Д. Зеленькова в Ашхабаде (рис. 3).

3. Здания на резинометаллических опорных частях получили широкое распространение за рубежом: в Японии, Англии, Франции (рис. 4). Исследования сооружений на резинометаллических опорах указывают на их высокую надежность, однако стоимость самих фундаментов оказывается значительной и может достигать 30% от стоимости здания.

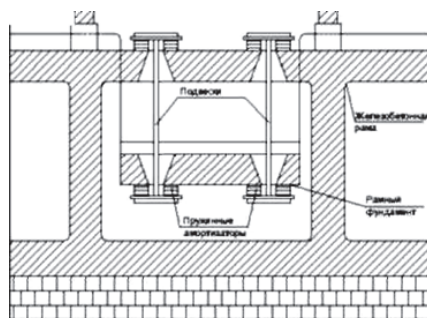


Рис. 3. Схема фундамента подвесного типа

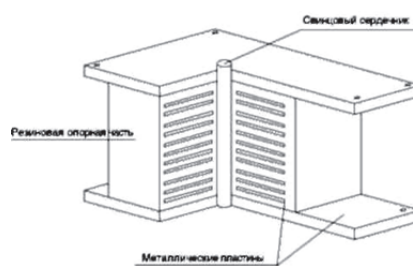


Рис. 4. Антисейсмическая опора

4. Серьезной проблемой при проектировании сооружений на упругих опорах явилась сложность обеспечения их прочности при значительных

взаимных смещениях сейсмоизолированных частей фундамента. Это послужило причиной широкого распространения кинематических опор при сооружении сейсмоизолирующих фундаментов. Здания на гравитационных кинематических опорах были построены в Севастополе, Навои, Алма-Ате, Петропавловске-Камчатском. На рис. 5 подвижные опорные части в виде эллипсоидов вращения размещены между надземной частью здания и фундаментом. Принцип действия такой конструкции состоит в том, что во время землетрясения центр тяжести опор поднимается, в результате чего образуется гравитационная восстанавливающая сила. При этом колебания здания происходят около положения равновесия, и их начальная частота и период зависят от геометрических размеров опор [5, 6].

Необходимо отметить, что построенные фундаменты этого типа не имеют специальных демпфирующих устройств, и при длиннопериодных воздействиях силой более 8 баллов, согласно выполненным расчетам, возможно падение здания с опор. Это указывает на опасность фундаментов на кинематических опорах, если в них не предусмотрены дополнительные демпфирующие элементы.

При значительном объеме строительства зданий и сооружений с сейсмоизоляцией на упругих кинематических опорах до настоящего времени отсутствуют данные об их поведении при землетрясениях, а имевшие место разрушения таких зданий указывают на необходимость детального обоснования их сейсмостойкости.

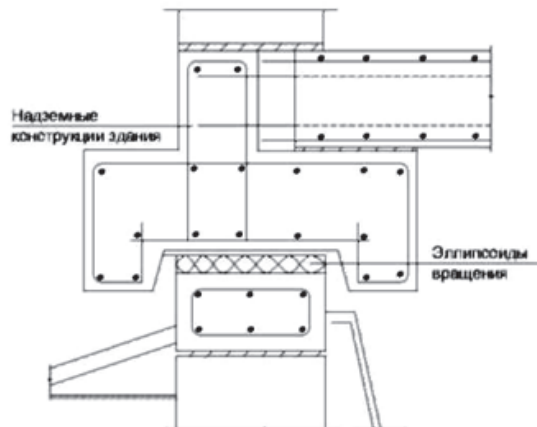


Рис. 5. Сейсмоизоляция гравитационного типа

Сейсмоизоляция, не обеспечивающая возвращающей силы, действующей на сейсмоизолированные части конструкции, реализуется путем устройства скользящего пояса. Одно из наиболее известных технических решений такого типа – сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle и Electricité de France.

Конструкция антисейсмической фрикционной опоры показана на рис. 6. Опора, поддерживающая верхнюю фундаментную плиту, состоит из фрикционных плит, армированной прокладки из эластомера (неопрена), нижней фундаментной плиты, бетонной стойки, опирающейся на нижнюю фундаментную плиту. Жесткость опор в вертикальном направлении примерно в 10 раз выше, чем в горизонтальном. К настоящему времени с применением сейсмоизолирующих опор указанного типа построены здания АЭС в г. Круа (Франция) и в г. Кольберг (ЮАР).

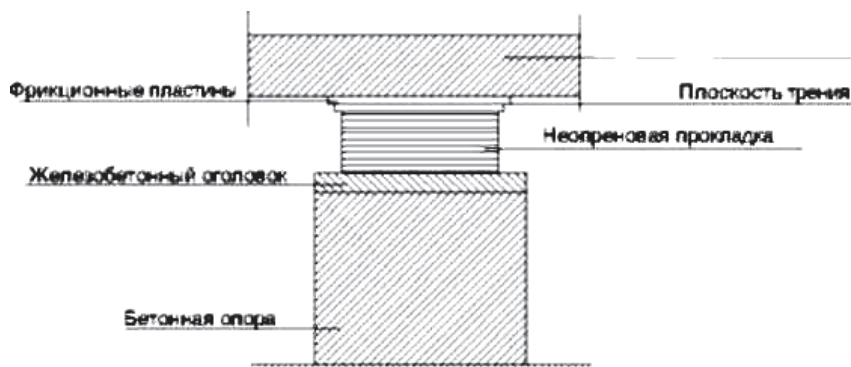


Рис. 6. Сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle

Сейсмоизолирующий фундамент фирмы Spie Batignolle является классическим примером сейсмоизоляции с последовательным расположением упругих и демпфирующих элементов. При относительно слабых воздействиях, когда горизонтальная нагрузка на опорную часть не превосходит сил трения, система работает в линейной области; при увеличении нагрузки сила трения преодолевается и происходит проскальзывание верхней фундаментной плиты относительно нижней. При этом удается в несколько раз снизить нагрузки на оборудование и здание.

Несмотря на ряд достоинств сейсмоизолирующего фундамента Spie Batignolle, рассмотренная конструкция имеет ряд недостатков. Критический анализ французского решения имеется, в нем, в частности, отмечается, что выполненные теоретические расчеты фундамента производились на высокочастотные воздействия, при этом взаимные смещения фундаментных плит не превосходили 20 см. В качестве конструктивных недостатков фундамента следует отметить невозможность избежать неравномерного давления на опоры при строительстве на нескальных грунтах, отсутствие средств регулирования сил трения, сложность смены прокладок во время эксплуатации [3].

В адаптивных системах сейсмоизоляции динамические характеристики сооружения необратимо меняются в процессе землетрясения, «приспосабливаясь» к сейсмическому воздействию. Особенности работы такой сейсмоизоляции детально исследованы в работах Я.М. Айзенберга [1,

2]. В нижней части здания между несущими стойками нижнего этажа установлены связевые панели, отключающиеся при интенсивных сейсмических воздействиях, когда в спектре воздействия преобладают периоды, равные или близкие к периоду свободных колебаний сооружения. После отключения панелей частота свободных колебаний падает, период колебаний увеличивается, происходит снижение сейсмической нагрузки. При низкочастотном воздействии период собственных колебаний здания со связевыми панелями значительно ниже величин преобладающих периодов колебаний грунта, поэтому резонансные явления проявляются слабо и связевые панели не разрушаются (рис. 7).

Применение выключающихся связей наиболее эффективно в том случае, когда уверенно прогнозируется частотный состав ожидаемого сейсмического воздействия. В качестве недостатков необходимо отметить, что после разрушения выключающихся связей во время землетрясения необходимо их восстановление, что не всегда практически осуществимо. Кроме того, как известно, в некоторых случаях в процессе землетрясения в его заключительной стадии происходит снижение преобладающей частоты воздействия. Вследствие этого возможно возникновение вторичного резонанса и потеря несущей способности конструкций здания. В этом случае требуется применение конструктивных мероприятий, что приводит к дополнительным затратам на строительство [1].

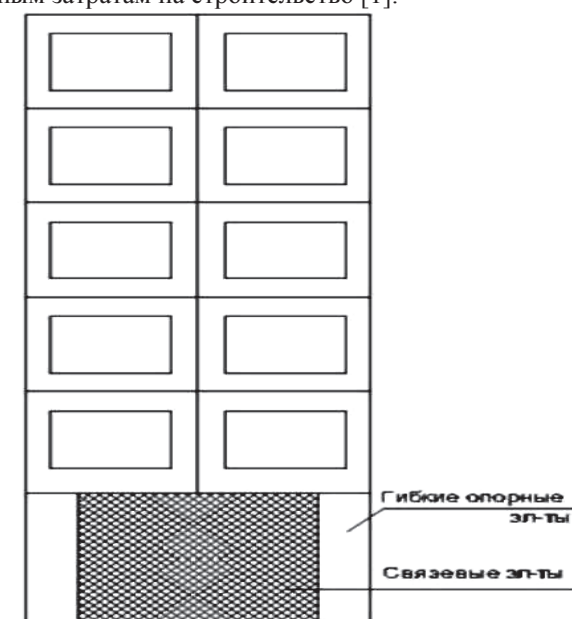


Рис. 7. Пример конструктивного решения зданий с выключающимися связями
Результаты исследований. В системах сейсмогашения, включающих

демпферы и динамические гасители, механическая энергия колеблющейся конструкции переходит в другие виды энергии, что приводит к демпфированию колебаний, или перераспределяется от защищаемой конструкции к гасителю.

В системах сейсмоизоляции обеспечивается снижение механической энергии, получаемой конструкцией от основания, путем отстройки частот колебаний сооружения от преобладающих частот воздействия.

Нетрадиционный подход к сейсмозащите нацелен на полную изоляцию от сейсмических воздействий всей системы «здание–фундамент» при сохранении и использовании естественных свойств слабых грунтов. В этом случае происходит отделение здания не от фундамента, а от основания, которое служит источником сейсмического возбуждения [5].

Использование устройства должно быть эффективно как при наличии, так и при отсутствии сеймики, защищая от неравномерных деформаций грунтов и практически от полного спектра сейсмических воздействий и повторяемости. Нетрадиционное защитное устройство является неотъемлемым элементом системы «здание–фундамент», которая конструируется как пространственное многосвязное здание замкнутого типа.

Одним из примеров эффективных вариантов такого подхода является применение пространственных фундаментных платформ (ПФП) на скользящем слое, объединенных с верхним строением в здание замкнутого типа (рис. 8). Скользящий слой под ПФП препятствует возникновению больших горизонтальных сейсмических воздействий за счет снижения тангенциальных (сдвиговых) связей между ПФП и основанием [5].

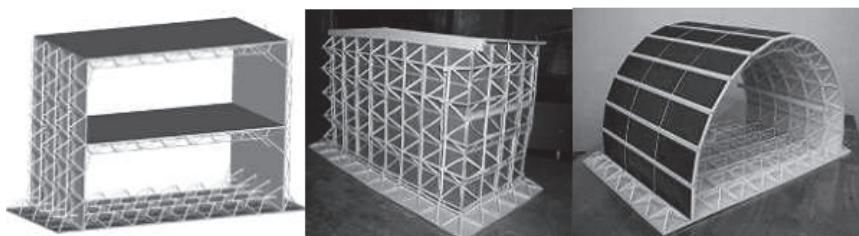


Рис. 8. Примеры многосвязных зданий замкнутого типа, объединенных с ПФП

Разработанные ПФП благодаря большой жесткости обладают повышенной распределительной способностью и оказывают малое давление на основание, даже при строительстве на слабых грунтах. Также малочувствительны к неравномерным деформациям грунтов, включая локальные просадки. Опыт исследования и проектирования ПФП показал, что использование свай под ПФП не требуется. Мощная сейсмическая волна проскальзывает под ПФП на скользящем слое. Опасность несимметричных,

крутильных и других сейсмических воздействий снижена. Устойчивость здания может быть обеспечена за счет размеров ПФП [5]. Однако специальные методы сейсмозащиты во многих случаях позволяют снизить затраты на усиление и повысить надежность возводимых конструкций. В последние десятилетия в Японии, США, Новой Зеландии, странах СНГ предложены десятки различных технических решений специальной сейсмозащиты зданий и инженерных сооружений. Многие из этих предложений реализованы на практике [7].

Сегодня Российская Федерация занимает второе место в мире по количеству построенных сооружений с системами сейсмоизоляции – 550 объектов, включая 70 сейсмоизолированных мостов [7, 9].

Япония, благодаря правительственной программе поддержки научных исследований по разработке инновационных технологий сейсмоизоляции зданий и выходу в свет норм проектирования сейсмоизолированных сооружений, вышла на первое место в мире по количеству построенных изолированных объектов – свыше 3000 – с высоким технологическим уровнем сейсмоизоляции. В 2000 г. системы сейсмоизоляции стали использовать при сооружении высотных зданий, под искусственными площадками для большой группы зданий, в небольших частных деревянных домах и др. Кроме того, сейсмоизоляция стала использоваться при оборудовании мест, предназначенных для произведений искусства, автоматических складов хранения товаров и оборудования, на маяках [7].

По количеству использования систем сейсмоизоляции в сооружениях Китай сегодня занимает третье место в мире. Общее количество сейсмоизолированных сооружений достигло 490, из них 270 зданий с надземной частью из кирпичной кладки. Сооружено 9 железнодорожных и автодорожных мостов с различными системами сейсмоизоляции. Особенно активно сейсмоизоляция применяется в теплых зданиях [7].

Оригинальным решением стало предложение создать сейсмически изолированную искусственную площадку в виде платформы. Была запроектирована и построена двухэтажная железобетонная каркасная платформа, предназначенная для размещения на ней оборудования и средств технического обслуживания железнодорожного вокзала и терминала метрополитена и обеспечения поглощения шума от движения поездов. Размер платформы составляет 1500 м в ширину и 2000 м в длину. Слой с резинометаллическими опорами расположен на верхнем этаже платформы. Над платформой построено 50 жилых домов. Общая площадь всех изолированных жилых домов около 480000 м², что составляет самую большую в мире площадь с использованием сейсмоизоляции. Исходя из результатов расчета и экспериментальных исследований, использование изоляции между этажами явилось наилучшим вариантом из предложенных методов обеспечения сейсмостойкости сооружения в целом [7].

В США построено около 100 сейсмоизолированных зданий.

Использование сейсмоизоляции в США ограничивается главным образом сооружениями, к которым предъявляются повышенные требования сейсмостойкости. Применение технологии регулирования сейсмической реакции более популярно при устройстве мостов, чем при возведении зданий. Так, в Северной Америке изолировано более 205 мостов (Соединенные Штаты, Канада, Мексика и Пуэрто-Рико) [7].

В настоящее время Италия занимает пятое место по количеству объектов, построенных с системами сейсмоизоляции. Всего 330 сооружений. В процессе проектирования и строительства находится большое количество зданий с системами изоляции. Среди них больницы, школы, жилые дома и исторические памятники. Кроме того, системы изоляции, изготовленные в Италии, были разработаны и установлены на нескольких сооружениях в других странах [7].

Последние несколько лет сейсмическая изоляция очень интенсивно развивается в Армении, которая является пионером использования сейсмоизоляции среди развивающихся стран. Технология сейсмоизоляции находит широкое применение при возведении новых жилых зданий, школ, больниц и при усилении существующих сооружений [7].

Армения – одна из первых стран, где усиление существующих зданий было выполнено с использованием сейсмоизолирующих устройств в основании и на покрытии зданий без выселения жильцов. В настоящий момент в республике разрабатываются проекты, и осуществляется строительство нескольких 10–20-этажных зданий многофункционального назначения с системами сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор.

Следует также отметить большой интерес применения в сооружениях систем сейсмоизоляции и регулирования сейсмической реакции на Тайване, в Новой Зеландии, Турции, Чили, Греции, Португалии, Мексике, Иране [7].

Выводы

Развитие инструментальной сейсмологии, углубление понимания целей и критериев антисейсмического проектирования, методов динамики сооружений, компьютеризация исследований, появление новых материалов – все это стало основой для создания современной, научно обоснованной теории сейсмоизоляции и для широкого применения сейсмоизоляции на практике.

Применение сейсмоизоляции и сеймогашения при правильном проектировании может значительно повысить такие характеристики как:

- надежность зданий;
- сохранность и надежность оборудования;
- экономические показатели зданий;
- отсутствие необходимости восстановительных работ после сильных землетрясений;
- комфорт для жителей.

Следует отметить, что традиционно методы и устройства сейсмоизоляции отдельных частей, например, верхнего строения от фундамента покрытия от стен и т. п.) получили многообразные решения. В то же время методы и устройства, снижающие сейсмическое воздействие на систему в целом, разработаны недостаточно.

В сейсмических регионах мира возрос интерес к обеспечению сейсмостойкости зданий с использованием инновационных технологий. В настоящий момент более 4500 сооружений в мире (главным образом, мосты, виадуки и здания) защищены от землетрясений посредством сейсмической изоляции и другими современными пассивными системами регулирования сейсмической реакции, и их число все время возрастает [7].

Расширилась область применения сейсмоизоляции. Сейсмоизоляцию стали использовать для таких сооружений, как исторические памятники, высотные здания, искусственные площадки для нескольких зданий, а также для одно- и двухэтажных домов. Кроме того, начали применять сейсмоизоляцию для защиты оборудования, такого, как автоматические складские системы хранения аппаратуры, на маяках, а также для защиты произведений искусства [7].

Доля проектирования и строительства сейсмоизолированных зданий по отношению к традиционным антисейсмическим еще мала, но уже заметна тенденция роста их числа в сейсмически опасных районах.

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я.М. Айзенберг – М.: Стройиздат, 1976. – 232 с.
2. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция высоких зданий / Я.М. Айзенберг // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2007. – №4. – С. 41–43.
3. Арутюнян А.Р. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений / А.Р. Арутюнян // Инженерно-строительный журнал, 2010. – № 3. – С. 56–60.
4. Воробьев В.Г. Задание расчетной сейсмостойкости зданий и сооружений на основе методов теории риска и теории надежности с учетом планируемого срока их службы / В.Г. Воробьев // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2008. – Вип. 69. – С. 168–175.
5. Конструктивная сейсмобезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях: препринт / под ред. Н.П. Абовского. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2009. – 186 с.
6. Сейсмостойкость зданий и сооружений: учебное пособие / сост. Л.С. Чигринская. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2009. – 107 с.
7. Смирнов В.И. Инновационные системы сейсмозащиты зданий и сооружений в Российской Федерации и за рубежом / В.И. Смирнов // Официальный раздел. БСТ.12, 2009. – С. 21–23.
8. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин – СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.
9. Сейсмостойкость: Центр исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iskik.ru/ciss/lss.html>.