

Беляев В. С., д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,  
Костарев В. В., канд. техн. наук,  
Васильев П. С., гл. специалист,  
Кульцел А. В., д-р – инженер, гл. специалист,  
Бондарев Д. Е., канд. техн. наук, гл. специалист  
(ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», г. Санкт-Петербург)

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ХАРАКТЕР СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*В статье описаны различные системы сейсмоизоляции. Рассмотрены недостатки современного нормативного документа СП 14.13330.2018 в части учета остаточных пластических деформаций при расчете с использованием коэффициента редукции  $K_1$  и в части учета эффектов второго рода (ни-дельта эффекта). Игнорирование эффектами второго рода представляет большую опасность для сооружений с первым гибким этажом. Описаны недостатки «горизонтальных» систем сейсмоизоляции по сравнению с современной системой BCS (Base Control System) – системой, способной обеспечить снижение сейсмических нагрузок как от горизонтальной компоненты сейсмического воздействия, так и от вертикальной. Представлено техническое решение в виде динамического гасителя колебаний, способного снизить как горизонтальные, так и вертикальные сейсмические нагрузки по всей высоте высотного жилого здания при воздействии трехкомпонентного сейсмического воздействия.*

*Ключевые слова: ни-дельта эффект, эффект второго рода, BCS, base control system, ДГК, динамический гаситель колебаний, вертикальная компонента сейсмического воздействия, сейсмоизоляция, пространственный характер сейсмического воздействия*

### Введение

Согласно действующим российским нормам СП 14.13330.2018 [1] методы и средства обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений включают четыре основные группы инженерных мероприятий. Первая из них предусматривает выполнение специальных проектных требований при разработке строительных конструкций, оборудования, инженерных коммуникаций, минимизирующих возможность отказа (разрушения) элементов и систем зданий и сооружений и безусловно предотвращающих их неуправляемое катастрофическое разрушение. Вторая группа включает обоснование рационального выбора объемно-планировочного решения зданий и сооружений для снижения требуемой проектной сейсмостойкости конструкций и оборудования, облегчения условий непрерывного функционирования или ускорения восстановления объекта. В третью группу входят инженерно-строительные мероприятия, предусматривающие применение систем сейсмоизоляции для регулирования сейсмической реакции строительных и не строительных кон-

струкций, раскрепление оборудования, ограничение деформаций инженерных коммуникаций и изменение свойств прилегающей грунтовой среды для трансформации сейсмического воздействия землетрясения. Появление третьей группы проектных требований в нормативных документах многих стран, например, США [2] и Японии [3], в последнее десятилетие вызвано насущной необходимостью снижения ущерба от землетрясений вследствие практически всеобщего повышения расчетной интенсивности проектных землетрясений при сохранении неопределенности сейсмического прогноза. Целесообразность использования конкретных мероприятий из этой, дополнительной к первым двум, группы определяется на основе технико-экономического анализа. Важной составляющей нормативных требований является также проведение регулярного контроля за состоянием строительных конструкций, оборудования и инженерных коммуникаций (четвертая группа), без данных которого оценка фактической сейсмостойкости объектов невозможна.

Традиционное сейсмическое проекти-

рование (первая и вторая группа инженерных мероприятий) имеет целью защиту человеческих жизней и ограничение уровня ущерба. Сейсмические нормы [1] – [3] требуют, чтобы заметные повреждения не появлялись при землетрясениях малой и умеренной интенсивности. В то время как при сильных землетрясениях требуют только отсутствия обрушения, допуская существенные повреждения. На основе этой концепции упругий спектр, который соответствует реальным ускорениям строительных конструкций, модифицирован для получения проектного спектра. В этом спектре действующие ускорения понижаются посредством коэффициентов ( $K_1$  и  $K_\psi$  в российских нормах [1]), которые зависят от объема допускаемых повреждений зданий и сооружений и их способности к рассеиванию энергии. Снижение уровня спектральных ускорений может быть очень существенным (до 4-5 раз и более), если строительная конструкция способна повреждаться рациональным образом с учетом нескольких элементов, предупреждая обрушение. Этот принцип не является универсальным, несмотря на широкое применение в сейсмостойком

проектировании, поскольку не учитывает сейсмическую реакцию не строительных элементов, оборудования и коммуникаций. Вполне очевидно, что сохранность этих компонентов зданий и сооружений в значительной степени определяет способность стратегически важных объектов, таких как сооружения гражданской обороны, связи и управления, мосты, госпитали и т.д., сохранять работоспособность во время (и немедленно после) землетрясения. Это относится и к объектам высокого риска (АЭС, химпроизводства и т.д.), которые должны удовлетворять высоким требованиям безопасности.

### Расчет по деформированной схеме. «Пи-дельта» эффект и его учет в различных нормативных документах

Важно отметить очень большой недостаток современных отечественных норм. К сожалению, существующий свод правил [1] в отличие от всех остальных мировых строительных норм (Еврокод 8 [4], Нормы Казахстана [5], UBC [6], ASCE [2], BCJ [7] и др.), предусматривая снижение сейсмических нагрузок при помощи коэффициента редукции  $K_1$  для конструкций способных претерпевать пластические деформации, **не предписывает увеличивать** в той же степени ответные сейсмические нелинейные перемещения. Неучет увеличения горизонтальных остаточных перемещений может приводить к значительным ошибкам в расчетах и существенной неконсервативности оценки сейсмостойкости сооружения. Логика учета коэффициента  $K_1$  следующая: при сильном землетрясении мы можем допустить развитие пластических деформаций так, чтобы не было достигнуто обрушение ни части, ни здания в целом. Кинетическая энергия землетрясения должна перейти в энергию пластических деформаций конструкций (в тепловую энергию). Проще говоря, конструкция поглощает энергию землетрясения и тем самым снижает сейсмическую нагрузку. **Обратной стороной такого эффекта являются необратимые значительные пластические горизонтальные деформации.** Если к этому добавить наличие вертикальной компоненты сейсмического воздействия,

то произойдет значительное увеличение вертикальной нагрузки, которая, в свою очередь, увеличит изгибающие моменты в вертикальных элементах. Данные эффекты называют «пи-дельта» эффектами или эффектами второго рода (порядка). Для нас кажется очевидным, что, основываясь на данных положениях (очевидных и наглядных), инженер-проектировщик должен проводить расчет с учетом геометрической нелинейности (по деформированной схеме) (рисунок 1).

Можно сказать, что **расчеты, выполненные по СП 14.13330.2018** [1] с учетом коэффициента редукции  $K_1$ , являются неверными, так как сильно занижают горизонтальные остаточные неупругие перемещения. Такие эффекты второго рода по своему вкладу в динамическую реакцию проявляются по-разному в зависимости от конструктивной схемы здания. Наиболее уязвимыми являются здания с первым гибким нижним этажом. Следует обратить внимание, что во время многих землетрясений, включая последнее в Турции в феврале 2023 года, здания **именно такого типа** разрушились по «блинной» (pancake type of destruction) схеме (когда этажи складываются один на другой).

Если мы обратимся к СП 14.13330.2018 [1], то в нем, во-первых, не сказано об учете увеличения перемещений при учете коэффициента редукции  $K_1$ , во-вторых, в пункте 5.4 перечислены всего четыре позиции, когда необходимо учитывать вертикальную компоненту сейсмического воздействия это: горизонтальные и наклонные консольные конструкции; рамы, арки, фермы, пространственные покрытия зданий и сооружений пролетом 24 м и более; сооружения при расчете на устойчивость против опрокидывания или против скольжения; каменные конструкции.



Рисунок 1 – Эффекты второго рода – «Пи-дельта» эффект

Приведем для сравнения положения из Еврокода 8 [4]. Пункт 4.3.3.5.2 предписывает учитывать вертикальную компоненту (если ускорения в данном направлении превышают 0,25g) сейсмического воздействия также и для сейсмоизолированных зданий (base-isolated structures). Пункт 4.4.2.2 предписывает учитывать эффекты второго рода («пи-дельта» эффект) в зависимости от выполнения критерия: коэффициент чувствительности к межэтажному смещению (interstorey drift sensitivity coefficient) должен быть меньше 0,1, чтобы инженер-проектировщик мог данный эффект не учитывать. Пункт 4.3.4 при выполнении упругого расчета **предписывает увеличивать смещения**, вызванные расчетным сейсмическим воздействием, **умножением перемещений** (полученных посредством линейного расчета на основании расчетного спектра) **на коэффициент поведения** (displacement behaviour factor), на которой изначально снижены сейсмические нагрузки. Коэффициент поведения  $q$  в Еврокоде 8 – это аналог нашего коэффициента  $K_1$ , взятый в обратном отношении.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что зачастую в инженерной практике при расчете по линейно-спектральной методике инженер-проектировщик обычно просто умножает нормативный спектр на коэффициент редукции  $K_1$ , получает заниженный спектр и оценивает перемещения, ошибаясь в 16 раз (!).

### Последствия сильных землетрясений

В случае зданий общегражданского назначения сейсмические события последних лет продемонстрировали, что использование современных технологий традиционного проектирования может успешно ограничить повреждение основных строительных конструкций во время интенсивных землетрясений. Однако зарегистрированный при обследованиях, например, [8] – [10], ущерб для несущих строительных и не строительных элементов оказался весьма значительным, очень дорогостоящим и часто приводил к гибели людей.



Рисунок 2 – Разрушения в результате землетрясения в Турции (2023 г.)

После землетрясения 1994 г., Northridge стоимость восстановления нежилых помещений для зданий и сооружений составила 6,3 млрд долларов, из которых только 1,1 млрд долларов из-за разрушения строительных конструкций, остальные потери связаны с повреждением не строительных элементов. В частности, 88% пациентов из 13 госпиталей были эвакуированы вследствие выхода из строя систем энерго- и водоснабжения, лифтов, санитарно-технического оборудования, в том числе операционного, потолочных систем. При землетрясении 2010 г., Darfield, которое вызвало подобные повреждения, потери оценены в 5 млрд новозеландских долларов. Необходимо подчеркнуть, что в последние годы, согласно японским нормам [7], объекты типа госпиталей строятся только с применением дополнительных инженерных мероприятий третьей группы, в частности масштабным применением систем сейсмоизоляции (СИС). В России также в последнее время появилась практика использования СИС для защиты крупных госпиталей.

Разрушительное землетрясение в Японии 2011 г. с магнитудой 9,1 (Tohoku Great Earthquake), сопровождавшееся сильным цунами, привело к большой техногенной аварии на АЭС «Фукусима». Но надо учитывать, вопреки распространенному мнению, цунами унесло около 24000 жизней, что несопоставимо с жертвами ядерной аварии на АЭС, в результате которой погибло всего 2 человека при ликвидации последствий землетрясения и нарушения ими базовых правил техники безопасности. В целом ущерб экономике, транспорту и инфраструктуре, за исключением вопросов, связанных с ликвидацией аварии на АЭС, составил порядка 300 млрд долларов.

Землетрясения, произошедшие в феврале 2023 года в Турции и Сирии (рисунок 2) с магнитудой 7,5-7,8, привели к гибели более 55000 человек, более 100000 человек пострадали. Полностью разрушенными оказалось более 6000 зданий. К концу февраля 2023 года было обследовано более 830000 получивших повреждения зданий, в результате чего установлено, что не менее 100000 не подлежат восстановлению и должны быть снесены в кратчайшие сроки. Существенные повреждения получили 25000 строений. Непосредственно в зоне землетрясения порядка 1,5 млн человек остались без крова, в целом районе бедствия проживает более 13 млн человек. По предварительным оценкам потенциальный размер ущерба составляет от 84 до 104 млрд долларов. Вместе с тем, установлено, что все девять сейсмоизолированных больниц почти не получили повреждения и продолжали работать в нормальном режиме, что было особенно важно в связи с громадным числом пострадавших.

При оценке общего ущерба от землетрясений важную долю составляют страховые выплаты страховыми компаниями пострадавшему населению и бизнесу. В этом плане чрезвычайно важна вероятностная оценка возможных потерь от землетрясений, одной из важнейших составляющих которой является, так называемая «стоимость человеческой жизни», включающая все затраты государства на человека от рождения и до получения им собственного заработка и, соответственно, образом рассчитываются возможные потери от его гибели. Например, в соответствии с данными N. Newmark [11] стоимость человеческой жизни в США в конце 60-х гг. при расчете ущерба от землетрясений оценивалась при-

мерно в 300 тыс. долларов. К настоящему времени эта базовая условная величина для оценки возможных потерь от землетрясений и других катастроф событий выросла примерно в 30 раз, что и определяет бурное развитие современных технологий и СИС для защиты от землетрясений по всему миру.

#### Эффективность систем сейсмоизоляции при действии трехкомпонентного сейсмического воздействия

По существующим представлениям среди дополнительных инженерных мероприятий третьей группы действий в условиях высокоинтенсивных землетрясений наиболее эффективным средством сейсмозащиты как основных строительных конструкций, так и несущих строительных и нестроительных компонентов, персонала, оборудования и систем жизнеобеспечения является сейсмоизоляция зданий и сооружений. Базовая идея сейсмоизоляции заключается в полном разделении верхней строительной конструкции и взаимодействующего с грунтом фундамента горизонтальным слоем изолирующих устройств. Под влиянием изолирующего слоя динамическая реакция верхней конструкции при землетрясении видоизменяется путем понижения собственной частоты ее колебаний и увеличением демпфирования для ограничения действующих сейсмических ускорений и сейсмических перемещений. Необходимо отметить, что в течение многих лет преобладающей гипотезой проектирования и конструирования систем сейсмоизоляции (СИС) для объектов разного назначения было обеспечение защиты от горизонтальных составляющих сейсмического воздействия сильных землетрясений путем снижения уско-

рений поступательных горизонтальных колебаний верхней защищаемой части сооружения за счет параллельно сдвиговых деформаций (перемещений) опорных сейсмоизолирующих устройств. При этом предполагалась возможность рассмотрения изолируемой части здания как твердого тела, влияние вертикальной составляющей воздействия на движение которого считалось незначительным. Простота принципа функционирования и значительные преимущества применения вызвали появление большого количества технических решений СИС. К настоящему времени целый ряд СИС после детальной проектной разработки, расчетных и экспериментальных исследований готов для широкого практического применения во всем мире. По имеющимся данным к 2014 г. объектов с СИС в 30 странах мира было более 20000. В области гражданского и промышленного строительства количество новых и восстанавливаемых конструкций с сейсмоизоляцией фундамента возрастает очень быстро, особенно в районах с повышенной сейсмоактивностью в последние годы.

Как следствие, возможность поа-

дания натуральных зданий и сооружений с СИС в зону действия сильных землетрясений увеличивается, и реализуются условия для получения данных о фактической эффективности их применения, а также для проверки адекватности методик проектирования, принятия гипотез и допущений.

В связи с тем, что до 1989 г. существующие конструкции с СИС не подвергались большому землетрясению, а экспериментальные исследования были ограничены проверкой функционирования СИС на масштабированных моделях, полная оценка корректности основной гипотезы отсутствовала по объективным причинам. Два обстоятельства, помимо отмеченного резкого увеличения количества зданий и сооружений с СИС в сеймоопасных районах, существенно повлияли на расширение базы данных о поведении сейсмоизолированных объектов и фактической эффективности СИС разных типов. Прежде всего, это введение в действие специалистами ряда стран, особенно Японии, США и Китая, развитой сети автоматических станций мониторинга и регистрации параметров сейсмических

колебаний грунта и конструкций зданий, в том числе сейсмоизолированных. Первые, пригодные для анализа данные регистрации сейсмических колебаний натуральных зданий с СИС получены при землетрясении 1994 г., Northridge (США). Следует отметить, что эти данные и показания последующих сильных землетрясений чрезвычайно важны для верификации методов расчета и нормативной основы проектирования зданий с СИС.

В качестве примера в таблице 1 [8] представлены данные регистрации трехкомпонентного движения конструкций восьми зданий с СИС при землетрясении 2011 г., Tohoku.

Часть СИС включали комбинацию сейсмоизолирующих устройств: эластомерных опор, фрикционно-маятниковых, скользящих опор и демпферов с различными гистерезисными механизмами.

Общее заключение по материалам обследования зданий с СИС после сильных землетрясений подтверждает достаточную эффективность снижения горизонтальных нагрузок на строительные конструкции сейсмоизолированных зданий, зарегистрирована их сохранность

Т а б л и ц а 1 – Данные регистрации трехкомпонентного движения конструкции здания с СИС

Этажность	Тип системы сейсмоизоляции	Δ, км	Расположение датчиков	Максимальное ускорение, см/с <sup>2</sup>			Смещение системы изоляции, см
				X	Y	Z	
9	ВДЭО + МД	172	фундамент	289	251	235	15,7
			1 этаж	121	144	374	
			крыша	142	170	524	
2	НЭО + СЭО + СКО + МД	178	фундамент	582	756	446	24,6
			1 этаж	176	213	516	
			крыша	155	185	621	
3	СЭО + СКО + МД	184	фундамент	411	334	324	5,8
			1 этаж	184	226	463	
			крыша	154	157	581	
7	НЭО + СЭО + СД	334	фундамент	327	233	122	6,8
			1 этаж	92	76	198	
			крыша	126	91	243	
4	ВДЭО	382	фундамент	100	79	84	4,2
			1 этаж	76	89	87	
			крыша	100	77	90	
12	НЭО + СЭО	386	фундамент	104	91	58	5,1
			1 этаж	55	41	62	
			крыша	94	82	104	
6	НЭО + СЭО	401	фундамент	86	104	34	5,2
			1 этаж	58	65	49	
			крыша	63	68	55	
6	НЭО + СЭО	457	фундамент	136	120	47	25,2
			1 этаж	58	134	47	
			крыша	63	67	48	

Обозначения:  
 НЭО – опоры из натурального эластомера;  
 ВДЭО – опоры из высокодемпфирующего эластомера;  
 СЭО – свинцово-эластомерные опоры;  
 СКО – скользящие опоры;  
 МД – демпферы из металла;  
 СД – демпферы из свинца.



Рисунок 3 – Система BCS (Base Control System) в монтажном (а) и рабочем (б) положении.  
Пружинные блоки для вибро- или сейсмоизоляции. Фирма GERB. Демпферы (ВД).  
(Российская разработка ООО «ЦВС», ТУ 4192-001-20503039-01)

во всех случаях. Однако вертикальная составляющая сейсмических колебаний грунта регулярно возрастает в 2-2,5 раза на верхних этажах здания. Действие ослабленных горизонтальных и усиленных вертикальных сотрясений в изолированных зданиях приводит к снижению общей эффективности СИС и повреждению строительных элементов.

С учетом случайного характера появления сильных землетрясений формирование достаточно большого объема представительных материалов объективно затруднено. Существенным дополнением к ним являются показания стендовых испытаний натурных зданий с СИС на сеймоплатформе E-Defense (Япония). Эта сеймоплатформа грузоподъемностью 1500т обеспечивает возможность проверки практической сейсмостойкости крупных строительных конструкций и оборудования в условиях детального воспроизведения амплитудных и временных характеристик действия высокоинтенсивных многокомпонентных сейсмических нагрузок. В период 2010-2015 гг. на сеймоплатформе E-Defense проведены испытания типовых 4-, 5- и 10-этажных натурных зданий с различными СИС. Несмотря на реальные ограничения стендовой постановки испытаний (массы и размеров имитируемого образца – натурного здания с СИС, жесткого крепления нижней части опор или фундаментной плиты здания к поверхности сеймоплатформы) при проведении опытов получен большой объем экспериментальных данных в условиях вариации параметров трехкомпонентного сейсмического возбуждения, соответствующего воздействию принятых при проектировании этих зданий землетрясений.

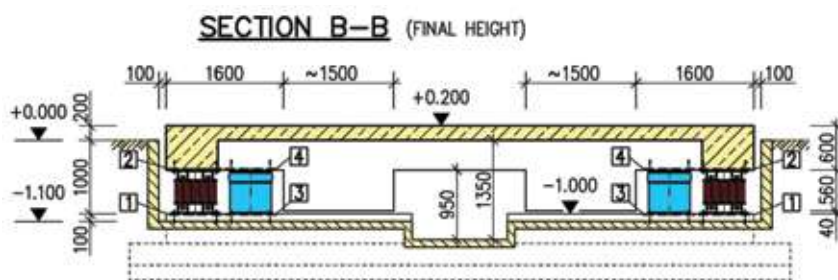


Рисунок 4 – Поперечный разрез здания. Пример установки системы BCS между фундаментом и надземной частью здания

В состав испытаний входила также имитация идеализированного двухкомпонентного нагружения.

В результате методически организованных испытаний при опытном сравнении сейсмической реакции каждого из зданий при наличии СИС и при жестком закреплении его фундамента к сеймоплатформе выявлен ряд существенных отклонений в сторону ухудшения функционирования всех горизонтальных СИС от проектных показателей при наличии в стендовом воздействии сильной или даже умеренной вертикальной составляющей. Значение коэффициента передачи сейсмических колебаний от фундамента зданий составляет по горизонту 0,85-1,05, по вертикали его величина в середине поэтажных перекрытий достигала 6-8 раз и более. Следует отметить, что эти эффекты проявляются во всех случаях испытанных образцов:

- пятиэтажного здания со стальным каркасом (здание с гибкой конструктивной схемой), сейсмоизолированного гибридной (свинцово-эластомерные опоры и скользящие гибридные опоры) системой и системой с фрикционно-маятниковыми опорами;
- зданий с более жесткой конструк-

тивной схемой, четырехэтажного здания с железобетонным каркасом с СИС на высокодемпфирующих эластомерных опорах, десятиэтажного здания с железобетонным каркасом на скользящих опорах из чугуна.

В целом материалы обследований и анализа сейсмостойкости зданий и сооружений с СИС при землетрясениях и данные полномасштабной проверки сейсмической реакции натурных зданий с СИС на сеймоплатформе E-Defense (см., например [12] – [14]) указывают на объективно существующие ограничения эффективности функционирования горизонтальных СИС при реальных трехкомпонентных воздействиях землетрясения. Эти ограничения и особенности поведения зданий с горизонтальной сейсмоизоляцией независимо от типа сейсмоизолирующих опор должны учитываться при проектировании. Для зданий и сооружений повышенной ответственности (системы МЧС, управления и информации, госпитали и объекты транспорта и т.п.) и, особенно, АЭС и крупных опасных химпроизводств целесообразно применение трехкомпонентных систем сейсмоизоляции. Из всех существующих разработок СИС наиболее



Рисунок 5 – Испытания системы BCS на специальном вибростенде ООО «ЦВС» (г. Санкт-Петербург)

эффективной и надежной представляется система BCS (Base Control System) – контроль сейсмических перемещений фирмы GERB. (рисунки 3, 4). Сравнительный анализ зданий, расположенных на различных типах сейсмоизоляции, представлен в работе [15].

Разработки применительно к условиям строительства блока ВВЭР-1200 на площадке с повышенной сейсмичностью выполнены в настоящее время специалистами фирмы «ЦКТИ-Вибросейсм» (г. Санкт-Петербург) совместно с фирмой GERB (Германия) (рисунок 5). Процесс оптимизации статических и динамических характеристик предложенной пружинно-демпферной трехкомпонентной СИС показал, что предпочтительной является система с первой собственной частотой в горизонтальном направлении 1,0-1,5 Гц, в вертикальном направлении 2,0-2,5 Гц и демпфированием 20% от критического. Расчетное снижение горизонтальных ответных ускорений составляет до пяти раз, вертикальных ускорений до двух раз, относительные перемещения в угловых опорах не превышают 60 мм. Подробнее о системе BCS и проведенных испытаниях можно ознакомиться в данных работах [16] – [18].

#### Эффективное средство для снижения сейсмических нагрузок в высотных зданиях. Динамический гаситель колебаний

Как обеспечить сейсмозащиту высотных зданий? В таблице 6.1 СП 14.13330.2018 [1] приведена предельная высота (этажность) здания, планируемого к строительству, в зависимости от конструктивной схемы и сейсмичности площадки. Например, для здания, выполненного из монолитного железобетона, предельная высота: 75, 70, 57 м для 7-, 8- и 9-балльной зон соответственно. Для крупнопанельных железобетонных зданий предельная высота будет меньше: 57, 50, 43 м. Для панельных зданий такое понижение предельной высоты является следствием того факта, что панельные здания обладают податливостью (по сравнению с жесткими монолитными зданиями) за счет шарнирного опирания плит друг на друга. **Примечание 5 к указанной таблице позволяет построить здания выше предельной высоты, но с учетом применения специальных систем сейсмозащиты** (сейсмоизоляции или дополнительного демпфирования) для снижения сейсмических нагрузок.

Как известно, сейсмоизоляция, устанавливаемая между фундаментом и основной частью здания, имеет свои ограничения в применении. Как правило, устройства сейсмоизоляции устанавливают в зданиях с первой собственной частотой выше 1 Гц. Высотные здания, как правило, имеют частоту собственных колебаний ниже 1 Гц и, таким образом, способны фильтровать опасные высокочастотные составляющие сейсмического воздействия. Для высотных зданий необходимы другие устройства для снижения сейсмических нагрузок. Одними из таких устройств является динамический гаситель колебаний (ДГК). ДГК является устройством пассивного контроля динамической реакции здания или сооружения. Как правило, устройство данного типа устанавливаются в верхней части здания (в уровне покрытия или верхнего технического этажа). В общем случае ДГК представляет собой отдельное устройство, состоящее из элемента, в котором концентрируется масса, соединенная подвесной или пружинной системой и демпферами,

с основной конструкцией здания. При динамическом возбуждении часть энергии колебаний основной конструкции передается на массу ДГК, которая начинает совершать колебания в резонансном, противофазном, режиме. Энергия при этом рассеивается демпфирующими элементами. Благодаря такой работе, сейсмическая нагрузка на здание снижается. Параметры ДГК обычно предварительно расчетным путем оптимизируются и назначаются на стадии проектирования, чтобы обеспечить максимальное снижение сейсмической нагрузки. Как правило, ДГК настраивается на основную частоту здания или сооружения, так как первая форма колебаний обычно имеет наибольшее участие в результирующей динамической реакции. Тем не менее, в случаях, когда первая форма колебаний не является доминирующей в отклике конструкции (особенно при широкополосных частотах возбуждения) ДГК может быть настроен на другую частоту.

Динамический гаситель колебаний ООО «ЦВС» состоит из пружинных блоков, подпирающих плиту покрытия здания, и высоковязких демпферов ВД, обеспечивающих затухание (рисунок 6).

Данное решение позволяет значительно снизить сейсмическую нагрузку по всей высоте здания. На рисунке 7 приведен график уменьшения абсолютных ускорений для жилого монолитного здания с 33 этажами, планируемого к строительству в 9-ти балльной сейсмически опасной зоне. Высота здания – 105 м.

Преимущество данного решения состоит в том, что оно не требует транспортировки массы ДГК на последний этаж здания. Можно использовать в качестве массы собственную часть конструкции – плиту покрытия. Вторым важным пре-

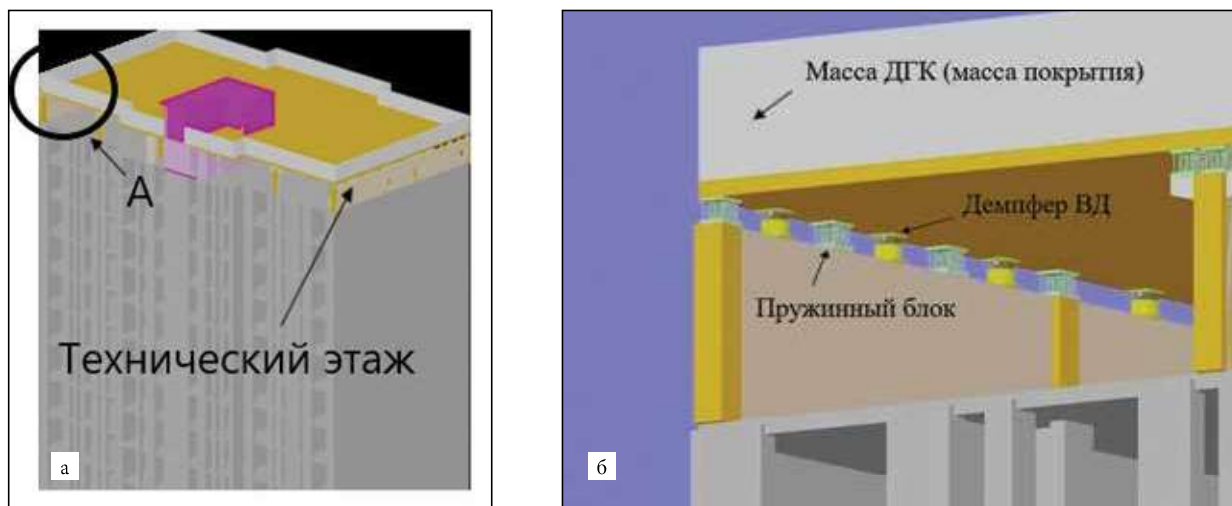


Рисунок 6 – Общий (а) и укрупненный (б) вид высотного здания

имуществом данной системы является **способность изолировать здание от вертикальной компоненты сейсмического воздействия**, о важности которой говорилось выше. На рисунке 8 представлены спектры абсолютных ускорений последнего этажа здания с системой ДГК и без.

#### Заключение

1. СП 14.13330.2018 [1] обладает существенными недостатками, которые могут приводить к серьезной недооценке сейсмической опасности для зданий и сооружений. Данный документ требует коренной переработки;

2. Анализ прошедших сильных землетрясений выявил, с одной стороны, гораздо большую сейсмозащищенность зданий и сооружений с СИС, но с другой

стороны, показал малую эффективность современных «горизонтальных» СИС (свинцово-эластомерные опоры, скользящие опоры), по сравнению с системой пространственной сейсмоизоляции – Base Control System (BCS);

3. Для сокращения общих людских и материальных потерь от землетрясений и других катастроф необходимо развивать методы вероятностной оценки риска и страхования возможного ущерба и людских потерь;

4. Динамический гаситель колебаний является эффективным средством для снижения как горизонтальной, так и вертикальной сейсмической нагрузки в высотных зданиях. Применение данных устройств в принципе может позволить построить здание с высотой, превыша-

ющей предельные величины, указанные в таблице 6.1 СП 14.13330.2018 [1];

5. СИС BCS и инженерное решение в виде ДГК способны значительно снижать как горизонтальные, так и вертикальные ускорения, вызванные трехкомпонентным сейсмическим воздействием.

#### Библиография

1. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах»
2. American Society of Civil Engineers (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* // ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, USA.
3. Architectural Institute of Japan (2001). *Recommendation for the Design of Base Isolated Structures*.
4. EN 1998-1 (2004), Eurocode 8: Design of

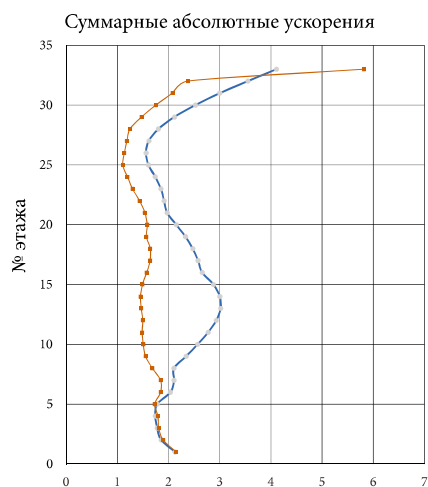


Рисунок 7 – Максимальные абсолютные суммарные ускорения по высоте здания. Оранжевая линия – здание, оснащенное ДГК (верхняя точка – масса ДГК), синяя – здание без ДГК

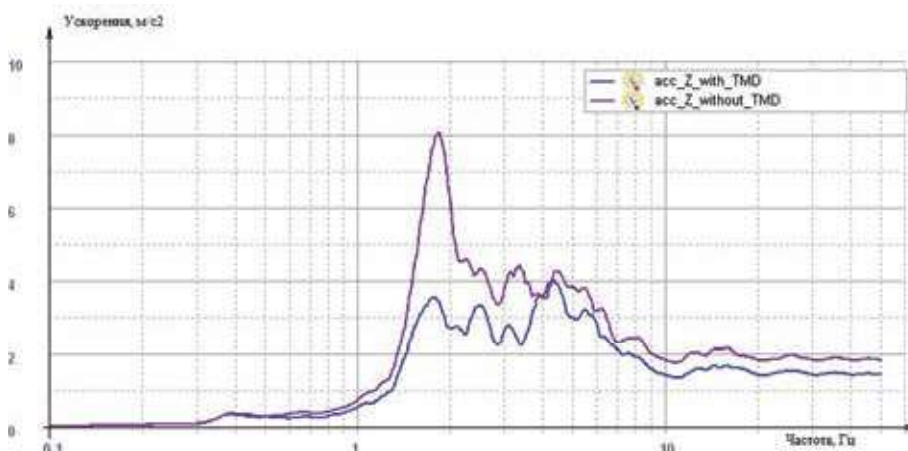


Рисунок 8 – Спектр ( $\xi = 0,05$ ) абсолютных вертикальных ускорений последнего этажа. Синяя линия – здание, оснащенное ДГК, фиолетовая – здание без ДГК

structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings

5. СП РК 2.03-30-2017\* Строительство в сейсмических зонах

6. Uniform Building Code (UBC) 1997

7. BCJ. Structural provisions for building structures. 1997 edition – Tokyo: Building Center of Japan. – 1997 [in Japanese]

8. M. Iiba et al. (2013). Behavior of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan).

9. T. Fujita (2005). State of the Art on Application of Seismic Isolation to Civil and Industrial Structures in Japan // Proc. of the 9th WCSI. Kobe (Japan).

10. K. Morita, M. Takayama (2017). Behavior of Seismically Isolated Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake // Proc. of the

2017 NZSEE conf. New Zealand.

11. N.M. Newmark. Fundamentals of earthquake engineering (Civil engineering and engineering mechanics series. Import, January 1, 1971.

12. T. Sasaki et al. (2012). NEES/E-Defense Base-Isolation Tests: Effectiveness of Friction Pendulum and Lead-Rubber Bearings Systems // Proc. of the 15 WCEE Conf. Lisboa (Portugal).

13. S. Furukawa et al. (2013). Comparison of Vertical Dynamic Response Characteristics of Two Base-isolated Buildings based on Full-scale Shaking Table Test // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan).

14. K. Kajiwara et al. (2017). 2015 Three-dimensional Shaking Table Test of a 10-story Reinforced Concrete Building on the E-Defense // Proc. of the 16 WCEE Conf. Santiago (Chile).

15. Dan M. Ghiocel, Victor Kostarev, Alex Kultsep, Peter Nawrotzki. A study on seismic ssi analysis of a base-isolated storage structure

founded on firm soil // Abstract: SMiRT 2610-15 July 2022 in Berlin/Potsdam, Germany Special Session: Seismic Isolation.

16. Peter Nawrotzki, Victor Kostarev, Daniel Siepe, Frank Barutzki, Victor Salcedo. 3D seismic isolation systems for the nuclear industry layout, design & qualification // Transactions, SMiRT-26 Berlin/Potsdam, Germany, July 10-15, 2022 Division V.

17. Dan M. Ghiocel. Sensivity studies for nuclear island founded on piles including effects of seismic motion spatial variation and local nonlinear soil behavior // Transactions, SMiRT-25 Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019 Division III.

18. P. Vasilyev. Methods of calculation of the reactor building with seismic isolation system under dynamic loads // Transactions, SMiRT-22 San Francisco, California, USA – August 18-23, 2013 Division III.

eng

Belyaev V. S., Kostarev V. V., Vasiliev P. S., Kultsep A. V., Bondarev D. E.

## MODERN METHODS OF SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT THE SPATIAL NATURE OF SEISMIC IMPACT

This paper shows different types of systems of base isolation (BI). Disadvantages of the Russian building codes SP 14.13330.2018 connected with considering plastic deformations in case of using in analysis the coefficient of reduction  $K_1$  were shown. Disadvantages of the horizontal system of base isolation in comparison with the modern BI system – BCS (Base Control System) were shown. BCS provides reduction of horizontal and vertical loads caused by spatial seismic excitation. Paper presents an engineering solution for mitigation of response of structure caused by seismic excitations. Tuned mass damper can significantly reduce horizontal and vertical accelerations along the entire height of the high-rise residential building.

Keywords: pi-delta effect, second order effects, BCS, base control system, CVS, TMD, tuned mass damper, vertical component of seismic excitation, base isolation, spatial seismic excitation

### References

1. SP 14.13330.2018 «SNiP II-7-81\* Stroitel»stvo v sejsmicheskikh rajonah» (in Russian)

2. American Society of Civil Engineers (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures // ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, USA.

3. Architectural Institute of Japan (2001). Recommendation for the Design of Base Isolated Structures.

4. EN 1998-1 (2004), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings

5. SP RK 2.03-30-2017\* Stroitel»stvo v sejsmicheskikh zonah (in Russian)

6. Uniform Building Code (UBC) 1997

7. BCJ. Structural provisions for building structures. 1997 edition – Tokyo: Building Center of Japan. – 1997 [in Japanese].

8. M. Iiba et al. (2013). Behavior of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan).

9. T. Fujita (2005). State of the Art on Application of Seismic Isolation to Civil and Industrial Structures in Japan // Proc. of the 9th WCSI. Kobe (Japan).

10. K. Morita, M. Takayama (2017). Behavior of Seismically Isolated Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake // Proc. of the 2017 NZSEE conf. New Zealand.

11. N.M. Newmark. Fundamentals of earthquake engineering (Civil engineering and engineering mechanics series. Import, January 1, 1971.

12. T. Sasaki et al. (2012). NEES/E-Defense Base-Isolation Tests: Effectiveness of Friction Pendulum and Lead-Rubber Bearings Systems // Proc. of the 15 WCEE Conf. Lisboa (Portugal).

13. S. Furukawa et al. (2013). Comparison of Vertical Dynamic Response Characteristics of Two Base-isolated Buildings based on Full-scale Shaking Table Test // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan).

14. K. Kajiwara et al. (2017). 2015 Three-dimensional Shaking Table Test of a 10-story Reinforced Concrete Building on the E-Defense //

Proc. of the 16 WCEE Conf. Santiago (Chile).

15. Dan M. Ghiocel, Victor Kostarev, Alex Kultsep, Peter Nawrotzki. A study on seismic ssi analysis of a base-isolated storage structure founded on firm soil // Abstract: SMiRT 2610-15 July 2022 in Berlin/Potsdam, Germany Special Session: Seismic Isolation.

16. Peter Nawrotzki, Victor Kostarev, Daniel Siepe, Frank Barutzki, Victor Salcedo. 3D seismic isolation systems for the nuclear industry layout, design & qualification // Transactions, SMiRT-26 Berlin/Potsdam, Germany, July 10-15, 2022 Division V.

17. Dan M. Ghiocel. Sensivity studies for nuclear island founded on piles including effects of seismic motion spatial variation and local nonlinear soil behavior // Transactions, SMiRT-25 Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019 Division III.

18. P. Vasilyev. Methods of calculation of the reactor building with seismic isolation system under dynamic loads // Transactions, SMiRT-22 San Francisco, California, USA – August 18-23, 2013 Division III.