

УДК 624.075

ИМАРАТТАРДЫ СЕЙСМОКҮЧТӨНДҮРҮҮНҮ ДОЛБООРЛОО ЖАНА КОНСТРУКЦИЯЛОО БОЮНЧА КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНДАГЫ АБАЛ

Светлана Николич-Бржев¹, Улугбек Турдалиевич Бегалиев²

¹Британ Колумбия Университети, Ванкувер, Канада, svetlana.brzev@gmail.com,

²Эл аралык инновациялык технологиялар университети, Бишкек, Кыргыз Республикасы, utbegaliev@mail.ru

Дүйнө жүзүндөгү сейсмокоркунучтуу аймактарда тургузулган имараттарды сейсмокүчтөндүрүү тажрыйбасы көбөйүүдө. Учурдагы долбоорлоо жоболорунда берилген сейсмокоркунуч деңгээлдери көптөгөн эски тамдарды долбоорлоодо каралган эмес. Андан тышкары, бир топ конструкциялар (мисалга алсак, арматурасыз кыш дубалдар), темирбетон же металл конструкцияларынан имараттарды долбоорлоого караганда, башынан эле жер титирөөгө чыдамсыз болууда. Кыргыз Республикасына жаңылык катарында киргизилген перфоменс долбоорлоо жана пушвер анализдеринин негизинде көтөрүүчү конструкцияларды эффективдүү күчтөндүрүүнү долбоорлоо жана конструкциялоо сунушталды.

Ачкыч сөздөр: сейсмокүчтөндүрүү, мектеп, учурдагы имараттар, перфоменс долбоорлоо, пушвер анализ.

УДК 624.075

СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ СЕЙСМОУСИЛЕНИЯ ЗДАНИЙ В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Светлана Николич-Бржев¹, Улугбек Турдалиевич Бегалиев²

¹Университет Британской Колумбии, Ванкувер, Канада, svetlana.brzev@gmail.com,

²Международный университет инновационных технологий, Бишкек, Кыргызская Республика, utbegaliev@mail.ru

Во многих сейсмоопасных регионах мира накоплен значительный опыт сейсмоусиления зданий существующей застройки. При проектировании большинства старых зданий не был учтен уровень сейсмической опасности, предусмотренный действующими нормами проектирования; кроме того, некоторые типы конструкций (например, неармированная каменная кладка) изначально более подвержены воздействию землетрясений по сравнению с другими конструкциями, такими как правильно спроектированные здания из железобетонных и стальных конструкций. Предлагается осуществлять эффективное усиление несущих конструкций зданий на основе перфоменс проектирования и пушвер анализа, которые являются для Кыргызской Республики нововведением.

Ключевые слова: сейсмоусиление, школа, существующие здания, перфоменс проектирование, пушвер анализ.

SITUATION OF DESIGN AND CONSTRUCTION FOR RETROFITTING OF BUILDINGS IN THE KYRGYZ REPUBLIC

Svetlana Nikolic-Brzev¹, Ulugbek Turdalievich Begaliev²

¹University of British Columbia, Vancouver, Canada, svetlana.brzev@gmail.com,

²International University of Innovation Technologies, Bishkek, Kyrgyz Republic, utbegaliev@mail.ru

There is a significant experience related to seismic retrofitting of existing buildings in many earthquake-prone regions of the world. Majority of older existing buildings were not designed to the seismic hazard level expected by current design codes; also, some structural types (like unreinforced masonry) are inherently more vulnerable to earthquake effects than others, e.g. well-designed reinforced concrete (RC) and steel buildings. It should be noted that seismic retrofitting of school buildings has been performed in several countries. It is proposed to effective strengthening of structures on the basis performance-design and pushover analyses, whis are an first time innovation for Kyrgyz Republic.

Key words: seismic retrofitting, school, existing buildings, performnance-design, pushover analyse.

Введение

Сейсмоактивность в Центральной Азии давно признана одной из самых высоких в мире. По некоторым оценкам, значительная часть территории Кыргызской Республики подвергнется землетрясениям магнитудой не менее 7,5 по шкале Рихтера (что соответствует интенсивности сотрясений 9 баллов по шкале MSK-64). На территории Кыргызской Республики произошло несколько разрушительных землетрясений, включая Суусамырское землетрясение 1992 года (магнитудой 7,3). В период с 1 июня 2009 года по 30 сентября 2010 года в стране произошло 2 398 землетрясений магнитудой не менее 6.

Особое беспокойство вызывает сейсмическая уязвимость зданий школ, поскольку большинство таких зданий в стране построены по методу неармированной каменной кладки и в значительной мере подвержены воздействию землетрясений. В 2012 и 2013 году в рамках инициативы по повышению сейсмической безопасности школ в Кыргызской Республике было проведено комплексное исследование при поддержке Детского фонда Организации Объединенных Наций (ЮНИСЕФ) и других организаций. Кыргызский научно-исследовательский и проектный институт сейсмостойкого строительства (КНИИПСС, в настоящее время — Государственный институт сейсмостойкого строительства и инженерного проектирования, ГИССиИП) провел оперативную сейсмическую оценку 806 детских садов (дошкольных учреждений) и 2 222 школ. На основании методического документа ЮНИСЕФ все исследованные здания были разделены на группы с низким, средним и высоким уровнем безопасности в зависимости от сейсмической опасности и типа конструкции. В ходе оценки было выявлено, что более 80% всех исследованных детских садов и школ имеют «Низкий уровень сейсмической безопасности». В целом, девять из десяти дошкольных и школьных учреждений не соответствуют стандартам прочности конструкций и нуждаются в скорейших усилениях несущих и ненесущих конструкций.

В ответ на это Министерство образования разработало государственную программу по внедрению мер защиты и повышению уровня безопасности учебных заведений. Правительство Кыргызской Республики впоследствии утвердило Государственную программу «Безопасные школы и дошкольные учреждения Кыргызской Республики» (2015-2024 гг.). Программа направлена на решение вопросов реконструкции и усиления зданий учебных заведений для повышения их сейсмической устойчивости и безопасности.

В рамках Проекта градостроительства Всемирный банк поддержал экспериментальное усиление нескольких зданий образовательных учреждений для повышения их сейсмической безопасности и энергоэффективности. Пилотный проект предусматривает усиление шести типовых зданий школ в регионах, находящихся в зоне осуществления проекта, и направлен на улучшение положения порядка 5 000 учащихся.

Официальным нормативным документом по сейсмостойкому строительству и проектированию новых зданий и сейсмоусилению зданий существующей застройки в Кыргызской Республике является СНиП КР 20-02:2009 или новые СН КР 20-02:2018. Методология оценки сейсмической безопасности зданий в Кыргызской Республике описана в СНиП 22-01-98 КР, который служит основой для проведения оценки сейсмостойкости всех зданий существующей застройки в Кыргызской Республике, включая здания школ. Хотя сейчас действуют уже СН КР 22-02:2018, однако в настоящее время в Кыргызской Республике нет действующих норм сейсмоусиления зданий существующей застройки в отличие от многих других стран и регионов. Например, нормы сейсмической оценки и сейсмоусиления зданий существующей застройки приняты в Европейском союзе (EN 1998-3:2005), США (ASCE/SEI 41-13) и Японии (*Японская строительная ассоциация по предотвращению разрушений*, 2001). Также доступны отдельные подробные руководства, например, руководство FEMA 547 (2006) в США, руководство Международной федерации по железобетону (2003) в Европе и руководство *Японской строительной ассоциации по предотвращению разрушений* (2001) в Японии.

Инженеры Кыргызской Республики имеют в распоряжении несколько внутренних технических документов по этой теме, включая книгу Урановой С.К. в КНИИПСС (1996), разработанный в Кыргызской Республике и описывающий способы сейсмоусиления зданий, и каталог, разработанный в Советском союзе Госстроем СССР (1987), Харьковским Промстройинипроектом (1992) и ЦНИИСК им. Кучеренко (1984).

Во многих сейсмоопасных регионах мира накоплен значительный опыт сейсмоусиления зданий существующей застройки. При проектировании большинства старых зданий не был учтен уровень сейсмической опасности, предусмотренный действующими нормами проектирования; кроме того, некоторые типы конструкций (например, неармированная каменная кладка) изначально более подвержены воздействию землетрясений по сравнению с другими конструкциями, такими как правильно спроектированные здания из железобетонных и стальных конструкций. Следует отметить, что в некоторых странах уже было проведено сейсмоусиление зданий школ. Например, многие кирпичные здания школ были разрушены во время землетрясения в Лонг-Бич в 1933 году (магнитудой 6,2). После землетрясения в штате Калифорния был принят Закон Филда, предписывающий проектировать здания государственных школ с учетом требований сейсмостойчивости, использовать армированную кладку и контролировать качество работ при строительстве всех новых школ. После принятия этого закона ни одно здание школы в Калифорнии не обрушилось во время землетрясения. Кроме того, продолжается осуществление программы сейсмоусиления зданий школ в штате Британская Колумбия, Канада, при поддержке правительства штата. Правительство Ирана также провело сейсмоусиление зданий школ в стране. В Центральной Азии сейсмоусиление зданий школ уже было проведено в Узбекистане. Следует также отметить инициативы по сейсмоусилению зданий школ в Перу и Непале.

В силу недостаточности опыта в сфере сейсмоусиления в Кыргызской Республике возникла необходимость разработать практическое пособие по проектированию и конструированию сейсмоусиления зданий школ Бржев и Бегалиев, 2018. Но для

правильного понимания зарубежных норм, необходимо четко знать терминологию и методы расчетных анализов и проектирования.

Подходы к проектированию в сейсмостойком строительстве

В настоящее время многие международные нормы проектирования в сейсмостойком строительстве предписывают применять подход к проектированию новых зданий на *воздействие сейсмических сил* (или прочностных характеристик). В рамках такого подхода несущие конструкции проектируются с учетом заданных прочностных характеристик на воздействие сейсмических сил. Значения таких сейсмических сил получают в результате линейно-упругого расчета с учетом параметров сейсмической опасности, типа и материала несущей конструкции и т.д. Максимальные перемещения в здании, вызванные землетрясениями, не должны быть за пределами, установленные нормами проектирования. Положения СНИП КР 20-02:2009 рекомендуют использовать подход, основанный на действии сейсмических сил, для проектирования сейсмостойких зданий и других сооружений.

В течение последних трех десятилетий появилась альтернативный подход проектирования на воздействия сейсмических сил — *проектирование несущих конструкций зданий по заданным параметрам* (далее – *перфоменс проектирование*). Целью такого подхода является обеспечение *фактически заданных характеристик* конструкции на определенном уровне сейсмической опасности. Заданные параметры являются показателем прогнозируемого повреждения несущих и ненесущих элементов при землетрясении и обычно определяются количественными показателями неупругих (пластических) деформаций (кручений, перемещений) несущих элементов (например, пластические шарниры в железобетонных или стальных балках).

Подход к проектированию зданий на воздействие сейсмических сил основан на линейном расчете, который подразумевает упругое поведение конструкции во время колебания грунтового основания при землетрясениях. Суммарная сейсмическая сила, действующая на сооружение, также известная как сдвигающая сила в основании, определяется путем снижения значения упругой сейсмической силы с использованием коэффициента изменения силы (также известного как коэффициент поведения). Предполагается, что при снижении значений сейсмической силы с использованием коэффициента, учитывающего изменение силы, конструкция проявит нелинейное поведение и подвергнется неупругим деформациям прежде, чем произойдет разрушение. Этот коэффициент применяется для определения предполагаемой пластичности конструкции, т.е. способности конструктивных элементов нелинейно деформироваться во время землетрясения. Некоторые конструкции, например, неармированная каменная кладка, являются хрупкими по своей природе, следовательно значение их коэффициента, учитывающего изменение силы, близко к единице. При этом считается, что железобетонные и стальные конструкции должны быть пластичными, поэтому для таких конструкций предусмотрено более высокое значение коэффициента, учитывающего изменение силы.

Согласно СНИП КР 20-02:2009, поправочный коэффициент K_2 равен обратному значению коэффициента, учитывающего изменение силы. Значения коэффициента K_2 варьируются от 0,2 до 0,5 и зависят от конструктивного решения и материала, т.е. значения будут разными для каркасных или стеновых конструктивных схем. Низкие значения коэффициента K_2 применяются к решениям, которые считаются обладающими большей потенциальной пластичностью.

На рисунке 1 показано, как можно рассчитать значение сейсмической силы исходя из максимальной упругой сейсмической силы, применив коэффициент K_2 , учитывающий изменение силы (поправочный коэффициент).

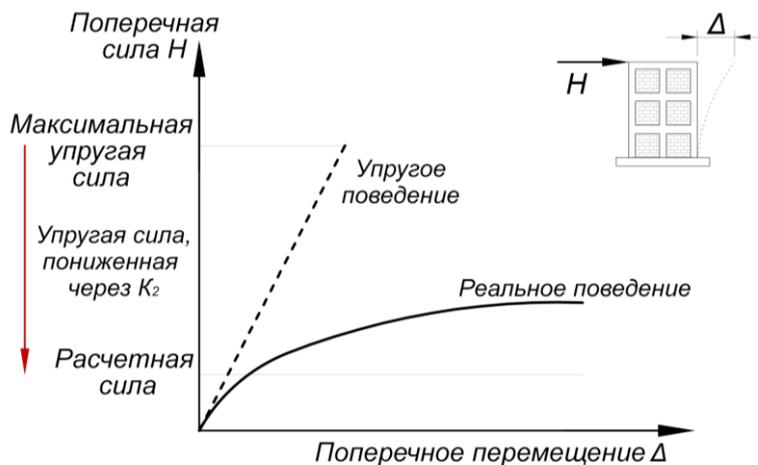


Рисунок 1. Упругая и расчетная сейсмические силы (на основе материалов Мерти, 2010)

В новых СН КР 20-02:2018 этот же коэффициент задан как коэффициент поведения. Применение подхода к проектированию сейсмостойких сооружений на основе воздействия сейсмических сил оправдано для новых зданий, когда разработчики могут проконтролировать конфигурацию здания, разработку конструктивной схемы, качество материалов и строительных работ. Здания существующей застройки могут иметь один или несколько дефектов сейсмостойкости и обычно не отвечают требованиям действующих норм проектирования в сейсмостойком строительстве. Дефекты сейсмостойкости зависят от конструктивного решения, строительных материалов и возраста здания. В большинстве случаев здания существующей застройки не обладают достаточной потенциальной пластичностью, т.е. они не смогут выдержать значительные нелинейные деформации до момента разрушения. Возможно, недостаточную пластичность не удастся определить при помощи подхода на воздействие сейсмических сил из-за использования линейного расчета, при котором одинаковые коэффициенты, учитывающие изменение силы, применяются к новым и существующим зданиям, построенным на основе одного конструктивного решения и с использованием одинаковых материалов.

Нормы проектирования в сейсмостойком строительстве со временем меняются, и эти изменения обычно приводят к увеличению значения сейсмических сил ввиду более жестких требований и более глубокого понимания сейсмической опасности в стране или регионе. Следовательно, большинство зданий существующей застройки не соответствуют требованиям к прочности при воздействии сейсмических сил, определенным на основании действующих норм проектирования в сейсмостойком строительстве. Дефекты сейсмостойкости (с точки зрения пластичности и прочности) можно увидеть уже в примерах сейсмоусиления, которых планируем представить на других научных статьях.

В некоторых случаях в результате применения подхода проектирования на воздействие сейсмических сил с использованием линейного расчета может оказаться, что здание существующей застройки имеет дефекты сейсмостойкости. При этом перфоменс проектирование в сочетании с нелинейным расчетом может подтвердить приемлемые характеристики сейсмоустойчивости. Нелинейный расчет дает возможность более реалистично оценить требуемую несущую способность пластических конструкций. По результатам пушвер анализа конструкция может демонстрировать приемлемые характеристики в условиях определенной сейсмической

опасности. Перфоменс проектирование также позволяет более гибко подойти к определению «приемлемых характеристик» здания существующей застройки. Поэтому проектировщики использовали перфоменс проектирование и пушвер анализ на сейсмические воздействия для оценки зданий существующей застройки (Бржев и Шерстобитофф, 2004; Мпамратсикос, Нашимбене, Петрини, 2008; Фардис, Шетакис и Стрепелиас, 2013). Нелинейный расчет позволяет лучше понять неупругое поведение и механизм разрушения конструкции в отличие от линейного расчета. Такое понимание имеет решающее значение на этапе выбора подходящей схемы усиления исходя из прогнозируемого механизма разрушения усиленного здания.

В рамках подхода к проектированию на действие сейсмических сил используется линейный расчет сейсмических воздействий, применимый к зданиям, которые в силу достаточной прочности способны сохранять упругие свойства при воздействии расчетных сейсмических сил, и зданиям с правильной геометрией и распределением жесткости и массы. Линейные расчеты вызванных землетрясением сил и перемещений для других зданий могут быть неточными (FEMA 274, 1997).

В некоторых нормах проектирования указано, как определить ограничения для использования методов линейного расчета при восстановлении зданий существующей застройки после землетрясений (п. 7.3.1.1 ASCE/SEI 2014). Их целью является подтверждение низкого прогнозируемого уровня нелинейности, который можно установить при помощи соотношения требуемой - фактической несущей способности для ответственных элементов конструкции. Такое соотношение представляет собой соотношение внутренних усилий или изгибающего момента под воздействием нагрузки от собственного веса, сейсмических нагрузок и расчетной прочности конструктивных элементов. Неупругое поведение конструктивного элемента может при превышении расчетного значения соотношении требуемой - фактической несущей способности 1,0. Согласно положениям Стандарта ASCE/SEI 41-13 (ASCE/SEI 2014), линейные методы расчета используются, когда соотношение требуемой - фактической несущей способности ответственных элементов конструкции не превышает 2,0. Многие старые здания имеют дефекты несущей способности элементов их конструкции. Они не отвечают требованиям действующих норм проектирования, поэтому использование линейно-упругого расчета для оценки их сейсмической безопасности и разработки необходимых схем усиления может быть нецелесообразным.

Ограничения применения подхода к проектированию на действие сейсмических сил в контексте оценки сейсмостойкости и усиления зданий существующей застройки описаны в разных источниках (Фардис, 2009; FEMA 274, 1997; ASCE/SEI, 2014).

Проектирование несущих конструкций зданий по заданным параметрам

Перфоменс проектирование основывается на *фактических заданных характеристиках*, установленных для определенного уровня сейсмической опасности. Значения заданных параметров определяются исходя из деформаций (например, при кручении и перемещениях) несущих и ненесущих элементов. Применение данного подхода основано на перемещениях, которые считаются основной причиной повреждений при землетрясениях. Перфоменс проектирование можно использовать при проектировании новых зданий, а также для оценки сейсмостойкости и усиления существующих зданий. Существует несколько вариантов применения перфоменс проектирования, описанных в разных нормах и правилах по проектированию.

Методы оценки сейсмостойкости и усиления на основе перфоменс проектирования используются при принятии проектных решений на основании предполагаемых характеристик функционирования здания во время землетрясения с учетом краткосрочных издержек и разрушений в сравнении с выгодами от усиления. Способ

сейсмической оценки перфоменс проектированием считается наиболее эффективным для информирования лиц, принимающих решения, о сейсмоусилении конструкции здания. Как ожидается, использование такого способа обеспечит принятие более надежных и экономически выгодных решений в отношении усиления конструкций. Метод перфоменс проектирования был описан во многих литературах, включая публикации Фардиса (2009), Кюннета (2006), Наима (2001) и Международной федерации по железобетону (2003).

При оценке сейсмостойкости перфоменс проектированием часто возникает необходимость применения нелинейного расчета конструкций. В некоторых странах нормы проектирования сейсмостойких сооружений предписывают использовать нелинейный метод расчета для оценки сейсмостойкости и усиления зданий существующей застройки, например, Стандарт ASCE/SEI 41-13 в США (Американское общество инженеров-строителей, 2014) и Еврокод 8 (Часть 3), который использовался в Европейском союзе (EN 1998-3:2005). Салливан, Пристли и Кальви (2012) разработали типовые нормы для проектирования конструкций на основе перемещений.

Уровни сейсмостойкости и требуемые характеристики сейсмостойкости

Предполагаемую сейсмостойкость здания можно описать несколькими способами, включая i) степень повреждения здания, влияющую на безопасность пользователей здания во время и после землетрясения; ii) стоимость и практическую возможность восстановления здания до состояния, в котором оно находилось до землетрясения; iii) период времени, в течение которого здание не будет функционировать из-за проводимых ремонтных работ; и iv) экономические, архитектурные и исторические последствия для сообщества.

Характеристики функционирования здания во время землетрясения определяются свойствами несущих и ненесущих элементов конструкции. Конструктивные характеристики служат для описания состояния несущих элементов, таких как балки, колонны, стены, фундаменты и т.д. Конструктивные характеристики чаще всего являются важным аспектом сейсмоусиления, поскольку недостаточные конструктивные характеристики или обрушение могут привести к чрезвычайно тяжелым последствиям для безопасности пользователей здания. При этом повреждение или разрушение ненесущих элементов, таких как перегородки, витражи, вытяжные трубы, книжные полки, могут также нанести существенный ущерб и причинить травмы пользователям здания.

Важно разделить эти два понятия: уровень функционирования и требуемая функциональная характеристика.

Термин *Уровень функционирования (Performance level)* означает физическое состояние здания, его способность функционировать и защищать жильцов и их имущество, а также возможное влияние на стоимость ремонтных работ и/или замены.

Термин *Требуемая функциональная характеристика (Performance objective)* определяет, какие уровни функционирования считаются удовлетворительными для указанной сейсмической опасности на стройплощадке. Пример требуемой функциональной характеристики: предполагается, что здание будет сильно повреждено, но не обрушится при интенсивности сотрясений, соответствующей сильному землетрясению.

В большинстве строительных норм и правил прямо или косвенно прописаны *требуемые функциональные характеристики*. Например, предполагается, что правильно спроектированное и построенное здание должно:

- a) выдержать незначительное сейсмическое колебание грунта без ущерба;

б) выдержать умеренное сейсмическое колебание грунта без ущерба для несущих конструкций, но с возможным ущербом для ненесущих конструкций;

с) выдержать сильное сейсмическое колебание грунта интенсивностью, равной максимальной интенсивности, прогнозируемой для стройплощадки, без обрушения, но с возможным ущербом для несущих и ненесущих конструкций.

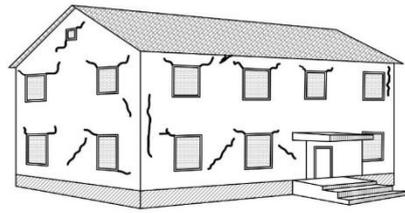
Требуемая функциональная характеристика с) отражает предполагаемые характеристики конструкции во время расчетного сейсмического воздействия, для которого она была спроектирована, в соответствии с большинством международных норм проектирования в сейсмостойком строительстве.

Существует несколько возможных уровней функционирования, включая непосредственное пребывание, безопасность жизни людей и предотвращение обрушения (см. рисунок 2). Большинство международных проектно-конструкторских стандартов содержат указания в отношении следующих трех уровней функционирования:

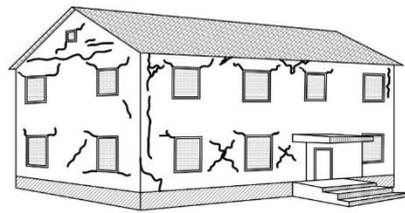
Непосредственное пребывание (Immediate Occupancy). Фактически обеспечено упругое поведение с незначительным восстановимым ущербом для несущих конструкций и незначительным ущербом для ненесущих конструкций (*больницы, центры экстренной помощи и любые другие объекты, которые должны продолжать функционировать после землетрясения*).

Безопасность жизни людей (Life Safety). Ущерб для несущих и ненесущих элементов конструкций может быть значительным, но риск травм или увечий минимален, и жильцам доступен выход из здания. Несущие элементы могут быть сильно повреждены, например, значительное растрескивание бетонных и каменных элементов, пластическая деформация стали. Ненесущие элементы также могут быть повреждены. На этом уровне функционирования может понадобиться серьезный ремонт зданий (*ожидается, что большинство жилых зданий продолжат функционировать на этом уровне*).

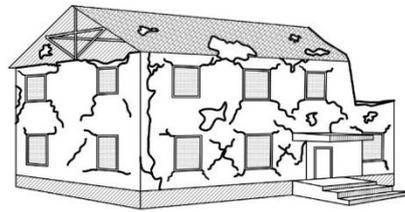
Предотвращение обрушения (Collapse Prevention). Здание находится на грани обрушения, безопасность жизни людей обеспечена не полностью. Несущие элементы сильно повреждены, их показатели находятся на предельном уровне, может иметь место значительное разупрочнение и потеря жесткости. Ремонт может оказаться невыполнимым (*этот уровень функционирования может быть приемлемым для некоторых зданий существующей застройки*).



a)



b)



c)

Рисунок 2. Уровни сейсмостойкости и соответствующие повреждения кирпичных зданий: а) непосредственное пребывание; б) безопасность жизнедеятельности; и с) предотвращение обрушения (на основании работ Грюнталя, 1998)

В большинстве норм проектирования в сейсмостойком строительстве безопасность жизнедеятельности определяется как обязательное требование для новых зданий и в некоторых случаях для зданий существующей застройки. Приемлемые характеристики функционирования несущих и ненесущих элементов конструкции на различных уровнях функционирования могут быть определены с точки зрения перемещений, внутренних сил или напряжений, ускорений и т.д. Более подробная информация представлена в Руководствах FEMA (2000) и ASCE/SEI (2014).

Следует отметить, что запас сейсмостойкости будет разным для хрупких и пластичных конструкций. На рисунке 3 показано, что все уровни функционирования хрупкой конструкции находятся в упругой зоне, а уровни функционирования пластичной конструкции — в нелинейной (неупругой) зоне. Поэтому у пластичной конструкции перемещения будут более сильными до момента разрушения (точка F). Хрупкая конструкция более прочная, то есть ее прочность выше, но ее перемещения будут намного меньше по сравнению с пластичной конструкцией.



Рисунок 3. Иллюстрация возможных уровней функционирования (стойкости) для пластичных и хрупких конструкций (Руководство Международной федерации по железобетону, 2003)

Предполагается, что характеристики функционирования новых зданий школ должны соответствовать уровню безопасности жизни людей или более высокому уровню функционирования (например, уровню непосредственного пребывания). Согласно СНиП КР 20-02:2009, у зданий школ более высокий коэффициент ответственности $K_1 = 1,2$, чем у других зданий (1,0). Таким образом для школ косвенно устанавливаются более высокие расчетные показатели сейсмостойкости. Следует отметить, что самое высокое значение K_1 (1,5) имеют общественные здания и сооружения, такие как театры и спортивные арены.

Методы нелинейного расчета

Методы нелинейного расчета на сейсмические воздействия обычно используются в контексте с перфоменс проектированием. Эти методики в основном служат для более реалистичного отображения сейсмического поведения здания с большой нагрузкой за пределами упругой зоны поведения (по сравнению с методами линейного расчета). Используя методы нелинейного расчета, можно определить критические участки здания, потенциально подверженные серьезным деформациям и повреждениям, которым нужно уделить особое внимание на стадии проектирования или усиления. Такие методы позволяют получить более реалистичные оценки нагрузок на потенциально хрупкие элементы и более реалистичные оценки деформаций пластичных элементов конструкции, которые предположительно подвергнутся неупругой деформации (по сравнению с методами линейного расчета).

Главной особенностью нелинейного расчета является возможность смоделировать нелинейное поведение основных конструктивных элементов, которое обычно описывается предопределенным соотношением напряжение–деформация или усилие–деформация. К методам нелинейного расчета относятся нелинейный динамический метод и упрощенный нелинейный статический метод (пушвер анализ).

Нелинейный динамический метод включает нелинейный расчет с применением акселерограмм. Числовую модель здания обрабатывают с использованием нескольких сейсмограмм естественных или искусственных землетрясений. Расчет с применением

акселерограмм выявляет воздействие колебаний высших мод. Этот подход позволяет получить значение максимального общего перемещения в результате землетрясения для определенной сейсмограммы.

Ограничением использования нелинейного динамического метода служит чувствительность к незначительным изменениям в допущениях относительно характера записи движения грунта, используемой при расчете, или нелинейного поведения жесткости элементов. Например, две записи движения грунта с одинаковым спектром реакции могут дать абсолютно разные результаты в отношении распределения и величины упругости, рассчитанной для конструкции. Для повышения надежности этого подхода необходимо провести несколько расчетов с использованием различных допущений. Считается, что для использования нелинейного динамического метода необходим обширный опыт и умение разобраться в ситуации.

В рамках упрощенного нелинейного статического метода, также известного как Пушвер Анализ (*Pushover Analysis*), используются упрощенные нелинейные способы оценки деформаций, вызванных землетрясением. Пушвер анализ более трудозатратен с точки зрения проведения расчетов, чем линейный статический метод, однако он позволяет получить более четкое представление о предполагаемом нелинейном поведении конструкции и более полную информацию по конструкторско-планировочному решению здания. Принципиальные и практические аспекты применения пушвер анализа при проектировании сейсмостойких сооружений или сейсмоусиления конструкций будут рассмотрены в следующем разделе.

Методы нелинейного расчета были приведены во многих изданиях, включая публикации Дейерлейна, Рейнхорна и Уилфорда (2010), Фардиса (2009) и Наима (2001).

Расчет упрощенным нелинейным статическим методом (пушвер анализом)

Принцип пушвер анализа заключается в приложении статической горизонтальной силы к расчетной модели конструкции до тех пор, пока не будут достигнуты фактические показатели. Проводится постоянный мониторинг деформаций и внутренних сил здания при поперечном перемещении конструктивной модели. Пушвер анализ представляет собой метод, основанный на перемещениях, где основным параметром расчета является поперечное перемещение здания (d), обычно проверяемое на уровне покрытия. На рисунке 4 а) представлено здание, подвергаемое постепенно возрастающей поперечной нагрузке. Результирующая нагрузка равна сейсмической сдвигающей силе в основании V . На соответствующей диаграмме соотношения нагрузки и перемещения (b) показаны упругая (линейная) и неупругая (нелинейная) реакции в виде *кривой несущей способности*. Кривая несущей способности отражает сдвигающую силу в основании как функцию общего перемещения конструкции (как правило, на уровне покрытия) и представлена на рисунке 5. Кривая несущей способности является ключевым результатом расчета пушвер анализа и описывает сейсмостойкость здания в условиях допустимого распределения поперечной нагрузки. *Критическое перемещение* представляет собой точку на кривой несущей способности, которая определяет максимально возможное перемещение в конструкции на определенном уровне сейсмической опасности (следовательно эта точка устанавливает соотношение между сейсмостойкостью здания и сейсмической опасностью). Расположение критического перемещения относительно заданных уровней функционирования на кривой несущей способности, например, относительно уровня безопасности жизни людей, показывает, была ли достигнута заданная функциональная характеристика. Например, критическое перемещение, представленное на рисунке 5, выходит за рамки перемещений, соответствующих уровню безопасности жизни людей, следовательно

функциональность такой конструкции соответствует уровню предотвращения обрушения.

При проведении пушвер анализа численная модель здания подвергается воздействию монотонно увеличивающейся поперечной нагрузке до тех пор, пока не будет достигнуто критическое перемещение цели или здание не обрушится (ASCE/SEI 41-13, FEMA 356, FEMA 273). Критическое перемещение можно рассчитать любым методом, учитывающим нелинейное поведение и эффект затухания. В рамках ASCE/SEI 41-13 (ASCE/SEI 2014) для оценки критического перемещения используется метод коэффициента перемещения. Критическое перемещение также можно определить по методу спектра несущей способности, также известному как метод спектров реакций ускорений-перемещений (ADRS) (ATC-40, 1996).

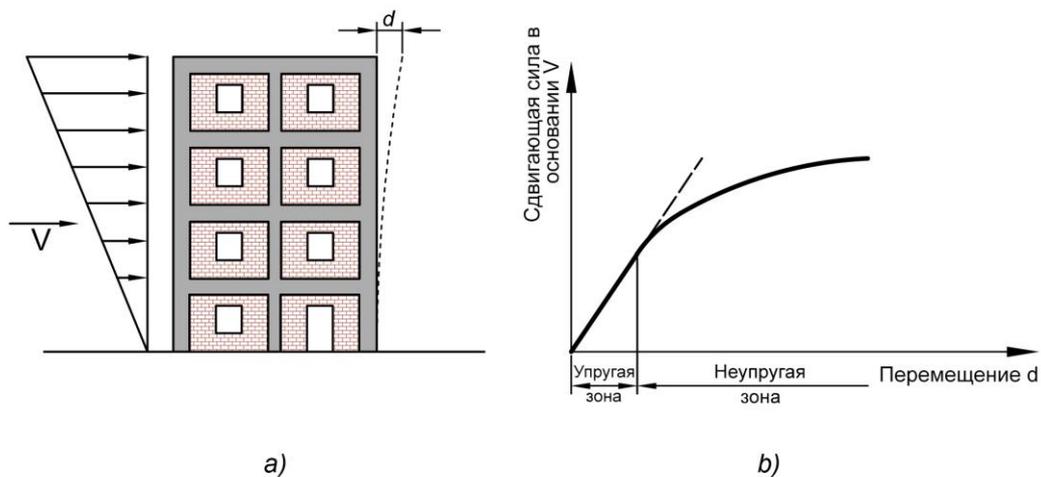


Рисунок 4. Расчет на основе пушвер анализа (на основании работы Меслема, 2014)

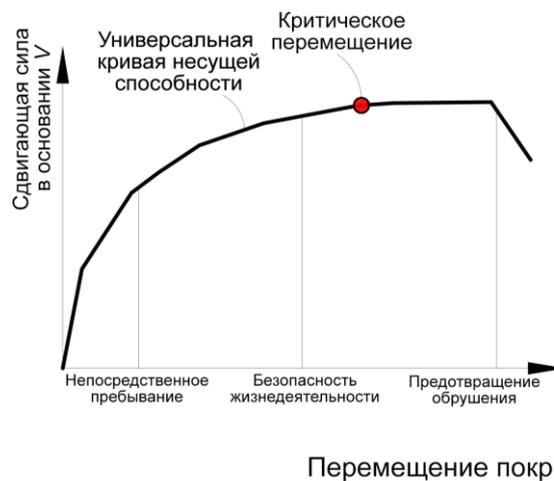


Рисунок 5. Образец кривой несущей способности для здания с указанием возможного критического перемещения относительно установленных уровней функционирования

Пушвер анализ имеет две основные особенности: а) нелинейное поведение нагрузка–деформация отдельных компонентов и элементов моделируется непосредственно в численной модели, и б) сейсмическое воздействие измеряется на основании критического перемещения. Пушвер анализ позволяет инженеру-конструктору определить стадии наиболее вероятного прогрессирующего разрушения здания и механизм окончательного разрушения. Пушвер анализ особенно полезен для исследования зданий существующей застройки, поскольку с его помощью можно

определить потенциально слабые участки конструкции и прогрессирующее повреждение основных элементов конструкции.

Ограничением для использования пушвер анализа является его неспособность учитывать воздействие более высоких форм колебаний, поэтому этот метод не подходит для расчета высотных зданий, на которые более высокие формы колебаний могут оказывать существенное воздействие.

Объяснение принципов и применения метода пушвер анализа приводится в некоторых технических литературах, включая FEMA 273 и 274 (1997), ATC-40 (1996), работы Кюннета (2006), Наима (2001) и Фардуса (2009).

Расчет несущих элементов здания на сейсмические воздействия

Здание состоит из несущих и ненесущих конструктивных элементов. Несущие элементы являются частью системы сопротивления вертикальным или поперечным силам. К ненесущим элементам относятся все заполнения и ограждения, прикрепленные к несущим конструкциям здания, но не являющиеся частью несущей конструкции (Портер, 2005). Ненесущие элементы включают стационарные элементы здания, такие как архитектурные, механические, электрические и сантехнические системы и компоненты. Кроме того, к ненесущим элементам также относится обстановка, например, мебель, оборудование и осветительные приборы. Ненесущими элементами конструкции зданий школ являются потолки, освещение, окна, офисное оборудование, компьютеры, кондиционеры, электрооборудование и все, что хранится на полках (например, книги в библиотеке) или висит на стенах.

Во время землетрясения ненесущие элементы могут сдвинуться, отцепиться, упасть и опрокинуться, что может привести к травмам и гибели людей, серьезным повреждениям и временному прекращению функционального использования здания. Например, оконное стекло может разбиться, осколки могут попасть в классную комнату или коридор, из-за чего могут пострадать и/или погибнуть люди. Осветительные приборы могут упасть и сломаться, если они не закреплены страховочной цепью. Стекланные контейнеры с химическими веществами, хранящиеся в лабораториях, могут опрокинуться и разбиться, из-за чего могут образоваться токсичные испарения. Трубопровод может прорваться, и все здание будет затоплено. Книжные шкафы и незакрепленные полки могут упасть. Документально подтверждена сейсмическая уязвимость ненесущих элементов, ставшая причиной значительных финансовых потерь и травм во время прошедших землетрясений (Као, Сун, Аманда, 1999), представлены несколько отчетов по результатам исследований, связанных с землетрясениями в США, например, землетрясение 1994 года в Нортридже, Калифорния (магнитудой 6,7) (Наим, 1999; МакКевитт, Тимлер и Ло, 1995) и землетрясение 2001 года в Нискволли, Вашингтон (магнитудой 6,8) (Филиатраулт и соавт., 2001). Повреждения и потери, вызванные ненадлежащим функционированием ненесущих элементов, были также изучены после землетрясения 2010 года в Мауле, Чили (магнитудой 8,8) (Миранда и соавт., 2012). Во время землетрясения в 1999 году в Коджаэли, Турция, 8 000 из 80 000 пострадавших получили травмы из-за незакрепленных отдельно стоящих шкафов (Петал, 2004). Тагави и Миранда (2003) разработали детальную базу данных сейсмических повреждений и расходов, вызванных ненесущими элементами.

Сейсмическая реакция ненесущих элементов описана в стандарте ATC (1999) и работах Наима (2001). Исходя из прогнозируемого поведения во время землетрясений ненесущие элементы можно разделить на *подверженные деформациям* и *подверженные действию ускорения*. Если сейсмостойкость несущего элемента зависит от межэтажных перемещений несущей конструкции (отклонение), элемент считается подверженным деформациям (например, перегородки и стеклянные витражи).

Сейсмобезопасность подверженных деформациям элементов обеспечивается путем ограничения межэтажного отклонения несущей конструкции или способности несущего элемента выдержать ожидаемые поперечные перемещения без повреждений.

Ненесущие элементы, не подверженные деформациям, как правило, подвержены действию ускорения, в результате чего они перемещаются или опрокидываются. Например, механическое оборудование, прикрепленное к полу, подвержено действию ускорения колебания. Сейсмобезопасность элементов, подверженных действию ускорения, обеспечивается удерживающими устройствами, предотвращающими перемещение, опрокидывание или обрушение. Силы и перемещения возникают в ненесущих элементах из-за раскачивания здания во время землетрясения. Сейсмические силы, воздействующие на ненесущие элементы, зависят от ускорения грунта в основании здания, соотношения ускорения перекрытия в месте расположения ненесущего элемента и ускорения грунта, а также динамического усиления, вызванного резонансом между поведением ненесущего элемента и здания (ASCE/SEI 41-13, 2014). В большинстве случаев действие этих сил приходится на центр инерции ненесущего элемента, поэтому для определения перемещений и внутренних сил для проектирования или усиления можно рассчитать эквивалентную статическую силу. Это приблизительный / упрощенный метод расчета, рекомендованный отдельными международными нормами проектирования в сейсмостойком строительстве. Одним из допущений упрощенного метода является линейное изменение ускорения перекрытия в зависимости от высоты здания на основании предполагаемой реакции при первой форме колебания здания. Если речь идет о зданиях со значительной реакцией высших форм, использование этого допущения может привести к переоценке ускорений на верхних этажах. В этом случае потребуется провести модальный расчет спектра реакций, чтобы оценить изменение ускорений перекрытий. Линейные динамические расчеты, такие как модальный расчет спектра реакций или анализ записи землетрясений, а также нелинейный расчет являются усовершенствованными методами расчета, учитывающими динамическое поведение здания. Усовершенствованные методы расчета рекомендуется использовать при проектировании ограничительных устройств для оборудования, подверженного воздействию сейсмических сил и перемещений, или если масса ненесущего элемента может повлиять на реакцию конструкции при сейсмических воздействиях (например, минимум 10% от общей массы конструкции) (CSA S832-14, 2014).

Стоимость ремонта, число жертв / смертельных случаев или временное приостановление функционального использования здания после землетрясения могут в значительной степени зависеть от некоторых ненесущих элементов. Перфоменс проектирование используется для точной оценки сейсмостойкости ненесущих элементов и прогнозирования возможных повреждений и потерь. На эту тему было проведено ряд исследований, и за последние несколько десятилетий были достигнуты определенные успехи (Портер и соавт., 2014; FEMA P-58-1, 2012; Тагави и Миранда, 2003). В рамках инициативы «Глобальная модель прогнозирования землетрясений» был предложен метод расчета для моделирования реакции конструкций, прогнозирования повреждений и стоимости ремонта несущих и ненесущих элементов в контексте сейсмоуязвимости типов зданий (Портер и соавт., 2012, 2014). В рамках проекта АТС-58 была разработана методика оценки сейсмостойкости несущих и ненесущих элементов отдельных зданий, которая учитывает невозможность точно спрогнозировать реакцию. Результаты такой оценки представлены в форме, отвечающей требованиям заинтересованных сторон при принятии решений (FEMA P-58-1, 2012).

Рекомендации по оценке сейсмических рисков и подходам к усилению ненесущих элементов зданий существующей застройки представлены в нормах проектирования

США ASCE/SEI 41-13 (2014), положения ASCE/SEI 31-03 (2003) содержат описание методик оценки сейсмостойкости и контрольные списки. В канадском стандарте CSA S832-14 (2014) описываются подходы к определению и оценке опасностей, обусловленных несущими элементами в новых зданиях и зданиях существующей застройки, предлагаются стратегии уменьшения потенциального ущерба. Еврокод 8, часть 1 (EN 1998-1:2004, 2004) содержит положения о проектировании сейсмостойких несущих элементов в новых зданиях.

В США (FEMA 241, 2015; CAL, 2011) и Японии (EFRC, 2005) были разработаны ряд руководств, в которых описываются методики сейсмоусиления несущих элементов в зданиях школ. Кроме того, в США было разработано общее руководство по снижению риска повреждений от несущих элементов (FEMA E-74, 2012).

Принципы проектирования в сейсмостойком строительстве для несущих элементов были включены в новых СН КР 20-02:2018. В нормах приведены положения об учете при расчетах на сейсмические воздействия, о закреплении несущих элементов, учет зазоров между несущими конструкциями для предотвращения или уменьшения обрушений при землетрясениях. В настоящее время действующие нормы не содержат требования по расчету и определению усилий в несущих элементах при сейсмическом воздействии.

Заключение

Предлагается разработать строительные нормы или пособия к ним по проектированию и конструированию сейсмоусиления зданий

Перфоменс проектирование можно использовать при проектировании новых зданий, а также для оценки сейсмостойкости и усиления существующих зданий.

Использование перфоменс проектирования обеспечит принятие более надежных и экономически выгодных решений в отношении усиления конструкций.

Пушвер анализ позволяет инженеру-конструктору определить стадии наиболее вероятного прогрессирующего разрушения здания и механизм окончательного разрушения.

Пушвер анализ особенно полезен для исследования зданий существующей застройки, поскольку с его помощью можно определить потенциально слабые участки конструкции и прогрессирование повреждений основным элементов конструкции.

Список литературы

1. ASCE/SEI (2014). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ASCE standard ASCE/SEI 41-13, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA. [Стандарт ASCE/SEI 41-13 (2014). Сейсмическая оценка и усиление зданий существующей застройки. Стандарт ASCE/SEI 41-13, Американское общество инженеров-строителей, Рестон, Вирджиния, США]
2. ASCE/SEI (2003). Seismic Evaluation of Existing Buildings. ASCE standard ASCE/SEI 31-03, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA [Стандарт ASCE/SEI (2003). Сейсмическая оценка зданий существующей застройки. Стандарт ASCE/SEI 31-03, Американское общество инженеров-строителей, Рестон, Вирджиния, США]
3. ATC (1999). Briefing paper 5 – Seismic Response of Nonstructural Components. Built to resist earthquakes, Applied Technology Council/SEAOC Joint Venture, Redwood City, CA, USA [Стандарт ATC (1999). Справочный документ 5 — Реакция несущих компонентов на сейсмические воздействия. Устойчивость к землетрясениям. Совместная работа Совета по прикладным технологиям и

- Ассоциации инженеров-проектировщиков строительных конструкций штата Калифорния, Редвуд, Калифорния, США]
4. ATC-40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40), Volume 1. Applied Technology Council, Redwood City, California, USA. [Стандарт АТС-40 (1996). Сейсмическая оценка и усиление бетонных строений (АТС-40), Том 1. Совет по прикладным технологиям, Редвуд-Сити, Калифорния, США]
 5. Brzev, S., Begaliev, U.T. (2018) Practical seismic design and construction manual for retrofitting schools in the Kyrgyz Republic. Светлана Бржев, Улугбек Бегалиев (2018) [Практическое пособие по проектированию и конструированию сейсмоусиления зданий школ в Кыргызской Республике]
 6. CSA S832-14 (2014). Seismic Risk Reduction of Operational and Functional Components of Buildings. Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada [CSA S832-14 (2014). Снижение сейсмических рисков для эксплуатируемых и функциональных компонентов зданий. Канадская ассоциация стандартов, Миссиссога, Онтарио, Канада]
 7. EFRC (2005). Case Studies of Seismic Nonstructural Retrofitting in School Facilities. Educational Facilities Research Center and National Institute for Educational Policy Research, Japan [EFRC (2005). Исследования сейсмоусиления несущих элементов зданий школьных учреждений. Центр исследования образовательных учреждений и Национальный институт исследований в области образовательной политики, Япония]
 8. EN 1998-3:2005 (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. Стандарт EN 1998-3:2005 (2005). [Еврокод 8: Проектирование строительных конструкций с учетом сейсмостойкости — Часть 3: Оценка и реконструкция зданий и мостов. Европейский комитет по стандартизации, Брюссель, Бельгия]
 9. EN 1998-1:2004 (2004). Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium [EN 1998-1: 2004 (2004). Еврокод 8: Проектирование строительных конструкций с учетом сейсмостойкости — Часть 1: Общие правила, сейсмические воздействия и правила для зданий. Европейский комитет по стандартизации, Брюссель, Бельгия]
 10. FEMA P-58-1 (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1 – Methodology. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA [FEMA P-58-1 (2012). Оценка сейсмостойкости зданий. Том 1 — Методология. Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям, Вашингтон, округ Колумбия, США]
 11. FEMA E-74 (2012). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA [FEMA E-74 (2012). Снижение рисков повреждений несущих элементов во время землетрясений — практическое руководство. Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям, Вашингтон, округ Колумбия, США]
 12. FEMA 241 (2015). Identification and Reduction of Nonstructural Earthquake Hazards in Schools. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA [FEMA 241 (2015). Определение и уменьшение опасности от несущих элементов во время землетрясений в зданиях школ. Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям, Вашингтон, округ Колумбия, США]
 13. FEMA 273 (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273). Washington D.C., USA. [FEMA 273 (1997). Руководство по

- восстановлению строений после землетрясения Национальной программы по снижению уровня сейсмической опасности (FEMA 273), г. Вашингтон, США]
14. FEMA 274 (1997). NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 274). Washington D.C., USA. [FEMA 274 (1997). Пояснения к Руководству по восстановлению сооружений после землетрясения Национальной программы по снижению уровня сейсмической опасности (FEMA 274), г. Вашингтон, США]
 15. FEMA 356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356). Washington D.C., USA. [FEMA 356 (2000). Предварительный стандарт и пояснения по восстановлению строений после землетрясения (FEMA 356), г. Вашингтон, США]
 16. Kao, Andrew S., Soong, T. T., and Amanda, V. 1999. Nonstructural damage database. Report MCEER-99-0014, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering, Buffalo, NY, USA [Као, Эндрю С., Сун, Т.Т. и Аманда, В. 1999. База данных повреждений от несущих элементов. Отчет MCEER-99-0014, Многопрофильный центр инженерной сейсмологии, Буффало, Нью-Йорк, США]
 17. Uranova S.K., КНИИПСС (1996). Проектирование зданий и сооружений в сейсмических районах, Бишкек, Кыргызская Республика
 18. Meslem, A. (2014). Nonlinear Static Analysis. Indo-Norwegian Training Programme on Nonlinear Modelling and Seismic Response Evaluation of Structures, Indian Institute of Technology Roorkee, India. [Меслем, А. (2014). Расчет нелинейным статическим методом. Индийско-норвежская учебная программа по нелинейному моделированию и оценке сейсмических реакций конструкций. Индийский институт технологий, Рурки, Индия]
 19. McKevitt, W.E., Timler, P.A.M., and Lo, K.K. 1995. Nonstructural damage from the Northridge earthquake. Canadian Journal of Civil Engineering, 22(2): 428-437 [МакКевитт, У.Э., Тимлер, П.Э.М. и Ло, К.К. 1995. Ущерб от несущих элементов во время землетрясения в Нортридже. Канадский журнал гражданского строительства, 22 (2): 428-437]
 20. Miranda E., Gilberto M., Rodrigo R., and Gokhan P. 2012. Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile Earthquake. Earthquake Spectra, 28(S1): S453-S471 [Миранда Е., Жильберто М., Родриго Р. и Гокхан П. 2012. Функциональность несущих элементов во время землетрясения в Чили 27 февраля 2010 года. Сейсмические спектры, 28 (S1): S453-S471]
 21. Naeim, F. (1999). Lessons learned from performance of nonstructural components during the January 17, 1994 Northridge earthquake--Case studies of six instrumented multistory buildings. Journal of seismology and earthquake engineering, 2(1): 45-57 [Наим, Ф. (1999). Уроки, извлеченные из функционирования несущих компонентов во время землетрясения 17 сентября 1994 года в Нортридже — исследования шести оснащенных многоэтажных зданий. Журнал сейсмологии и сейсмостойкого строительства, 2 (1): 45-57]
 22. Naeim, F. (2001). The Seismic Design Handbook, 2nd Edition, Kluwer Academic Publisher, USA. [Наим, Ф. (2001). Справочник по проектированию сейсмостойких конструкций. 2-е издание, издательство Kluwer Academic Publisher, США]
 23. Petal, M.A. (2004). Urban Disaster Mitigation and Preparedness: the 1999 Kocaeli Earthquake. Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, CA, USA [Петал, М.Э. (2004). Смягчение последствий стихийных бедствий в городах и готовность к ним: землетрясение в Коджаэли в 1999 году. Докторская диссертация, Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, Калифорния, США]

24. Porter, K., Farokhnia, K., Vamvatsikos, D. and Cho, I.H. (2014), Guidelines for component-based analytical vulnerability assessment of buildings and nonstructural elements, GEM Technical Report 2014-1, V1.0.0, 102 pp., GEM Foundation, Pavia, Italy [Портер, К., Фарохния, К., Вамватсикос, Д. и Чо, И.Х. (2014) Руководство по аналитической компонентной оценке уязвимости зданий и несущих элементов. Технический отчет GEM 2014-1, V1.0.0, 102 с., Глобальная модель прогнозирования землетрясений, Павия, Италия]
25. Porter, K.A., Farokhnia, K., Cho, I.H., Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D., Jaiswal, K., Wald, D., D'Ayala, D., Meslem, A., So, E., Kiremidjian, A.S. and Noh, H. (2012). Global Vulnerability Estimation Methods for the Global Earthquake Model, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal [Портер, К. А., Фарохния, К., Чо, И.Х., Россетто, Т., Иоанну, И., Грант, Д., Джейсваль, К., Вальд, Д., Д'айала, Д., Меслем А., Со, Э., Киремиджян, Э.С. и Но, Х. (2012). Методы оценки уязвимости для Глобальной модели прогнозирования землетрясений. Материалы 15-й Всемирной конференции по инженерной сейсмологии, Лиссабон, Португалия]
26. Porter, K.A. (2005). A Taxonomy of Building Components for Performance-Based Earthquake Engineering. PEER Report 2005/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA [Портер, К.А. (2005). Таксономия компонентов зданий для инженерной сейсмологии на основе заданных параметров. Отчет PEER 2005/03, Тихоокеанский центр исследований сейсмостойкости, Инженерный колледж, Калифорнийский университет, Беркли, Калифорния, США]
27. Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N., and Calvi, G.M. (2012). A Model Code for the Displacement-Based Seismic Design of Structures (DBD12), IUSS Press, Pavia, Italy. [Салливан Т.Дж., Пристли М.Дж.Н. и Кальви Дж.М. (2012). Типовые нормы для проектирования сейсмостойких конструкций на основе перемещений (DBD12). Издательство IUSS Press, Павия, Италия]
28. Taghavi, S., and Miranda, E. (2003). Response Assessment of Nonstructural Building Elements, PEER 2003/05, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Richmond, CA, USA [Тагави, С. и Миранда, Э. (2003). Оценка реакции несущих элементов здания, PEER 2003/05, Тихоокеанский центр исследований сейсмостойкости, Ричмонд, Калифорния, США]
29. СНиП 22-01-98 КР. Оценка сейсмостойкости зданий существующей застройки. Минархстрой Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика
30. СНиП КР 20-02:2009. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Государственное агентство по архитектуре и строительству при Правительстве Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика
31. СН КР 22-01:2018. Оценка сейсмостойкости зданий существующей застройки. Государственный институт сейсмостойкого строительства и инженерного проектирования Госстроя Кыргызской Республики и Международная Ассоциация экспертов по сейсмостойкому строительству, Бишкек, Кыргызская Республика
32. СН КР 20-02:2018. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Государственный институт сейсмостойкого строительства и инженерного проектирования Госстроя Кыргызской Республики и Международная Ассоциация экспертов по сейсмостойкому строительству, Бишкек, Кыргызская Республика
33. ЮНИСЕФ (2014 г.) Оценка безопасности школ и дошкольных образовательных организаций Кыргызской Республики: сводный отчет, Детский фонд ООН.
34. ЮНИСЕФ (2013 г.) Методология и инструментарий оценки безопасности школ и дошкольных образовательных организаций Кыргызстана, Детский фонд ООН.