

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-18-45](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-18-45)**Теоретические и экспериментальные исследования****Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан**Абаев Заурбек Камболатович¹, Шилдкамп Мартин², Валиев Азамат Джониевич¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)» (ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»). Владикавказ, Российская Федерация

² Некоммерческая организация «Smart Shelter Research» (SSR). Алфен-ан-де-Рейн, Нидерланды

Аннотация: *Введение.* Действующие нормы Российской Федерации запрещают возведение зданий из природного камня в сейсмических районах. Для восстановления и реконструкции исторических зданий, сооружений и объектов культурного наследия, расположенных в сейсмоопасных регионах, необходимо, в первую очередь, определить сейсмические воздействия на данные сооружения. Примеры определения сейсмической силы в основании сооружения с расчетными параметрами для зданий со стенами из тяжелого природного камня в литературе отсутствуют.

Материалы и методы. Проведены расчеты и анализ сейсмических требований для двух объектов исследования: здания дома и школы со стенами из природного камня, которые обычно строятся в Непале. Проведено детальное сравнение нормативных документов трех стран: Федеративной Демократической Республики (ФДР) Непал, Российской Федерации и Республики Таджикистан (РТ).

Результаты. Представлено подробное сравнение формул для определения сейсмической силы в основании сооружения и распределения сейсмических сил; представлены сравнения плотностей материалов, сейсмических весов, сейсмического районирования, собственных периодов колебаний, спектров отклика, коэффициентов ответственности и комбинаций сейсмических нагрузок. Наблюдаются большие различия между подходами и коэффициентами. Далее, используя метод эквивалентной поперечной силы (*ELF*) и упрощенный спектральный метод (*S-Modal*), рассчитываются сейсмические силы для расчетного пикового ускорения грунта $0,2 g$, а также рассматривается влияние различных вариантов критических комбинаций нагрузок на продольные и поперечные силы и моменты. Особое внимание уделяется возможным разночтениям и толкованиям отдельных положений нормативных документов РФ и РТ, в связи с чем в настоящем исследовании также предложены определения метода двойного (МДП) и единичного приложения (МЕП) коэффициентов сочетаний.

Выводы. В целом можно заметить, что системы «тяжелая кладка – легкое перекрытие» ведут себя при сейсмическом воздействии иначе, чем большинство других несущих систем. Учитывая наблюдения, сделанные в данной работе, применимость традиционных методов *ELF* и *S-Modal* для зданий из тяжелой кладки вызывает некоторые сомнения. Однако рассмотренные нормы не предусматривают использование модифицированных подходов, учитывающих эти различия. В завершении работы содержится призыв к международному сотрудничеству в рамках исследовательского проекта *SMARTnet*. Настоящая работа также призывает инженерные и академические сообщества РФ и стран СНГ начать конструктивную дискуссию о необходимости корректировки и уточнения некоторых противоречивых положений нормативной документации, а также предложить возможные пути её модернизации.

@ З.К. Абаев, М. Шилдкамп, А.Д. Валиев, 2022

Ключевые слова: кладка из природного камня, параметры сейсмических требований, сейсмические нормы, сейсмическая сила в основании сооружения, сейсмический вес, комбинации нагрузок, максимальное ускорение грунта

Для цитирования: Абаев З.К., Шилдкамп М., Валиев А.Д. Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 18–45.

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-6-18-45](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-18-45)

Theoretical and experimental studies

Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan

Zaurbek Abaev¹, Martijn Schildkamp², Azamat Valiev¹

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU). Vladikavkaz, Russian Federation

²Non-profit organization «Smart Shelter Research» (SSR). Alphen aan den Rijn, Netherlands

Abstract. Introduction: The current norms for construction in seismic areas in the Russian Federation prohibit the construction of buildings with natural stone walls, but for the restoration and reconstruction of historic buildings located in earthquake-prone regions, seismic demand of such structures should be determined. Full base shear seismic demand analyses with calculated examples for heavy stone masonry buildings are not present in the literature.

Materials and methods: To address this shortcoming, analyses and calculations are performed on nominally reinforced natural stone walls house and school designs, as typically built in Nepal. A detailed comparison of the seismic codes of the three countries Nepal, Russian and Tajikistan was carried out.

Results: This paper compares the base shear formulas and the inertia forces distributions of these codes, as well as material densities, seismic weights, seismic zoning, natural periods of vibration, response spectra, importance factors and seismic load combinations. Large differences between approaches and coefficients are observed. Then, by following Equivalent Lateral Force method (ELF) and simplified modal analysis (S-modal) the base shear and story shears are calculated for a design peak ground acceleration of 0.20 g, as well as the effects of critical load combinations on the forces and moments acting on the lateral-resisting elements. Particular attention is paid to possible discrepancies and interpretations of certain provisions of the normative documents of the Russian Federation and Tajikistan. This study also proposes a new terminology to emphasize the differences between two countries: the methods of double (DCA) and of single application (SCA) of the combination coefficients.

Conclusions: Overall, it is observed that heavy-masonry–light-floor systems with negligible diaphragm action behave different under seismic motion than most other building typologies. Given the observations in this paper, the applicability of conventional ELF and S-Modal methods for heavy masonry buildings is questionable. The codes however do not introduce modified approaches that address these differences. The paper ends with an appeal for global collaboration under the research project SMARTnet. Further, the paper aims to start discussions within the Russian community and neighboring countries about possible revisions and improvements of certain inaccuracies and ambiguities in the various norms.

Keywords: natural stone walls, seismic demand parameters, seismic codes, base shear, seismic weight, load combinations, peak ground acceleration

For citation: Abaev Z.K., Schildkamp M., Valiev A.D. Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 18–45 (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-6-18-45](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-18-45)

ВВЕДЕНИЕ

В период с 2007 по 2012 годы голландская неправительственная организация *Smart Shelter Foundation (SSF)* построила сейсмостойкие школы со стенами из природного камня в Непале, которые пережили землетрясение в районе Горкха в 2015 году без каких-либо значительных повреждений. Данные сооружения проектировались, следуя принципу «неинженерного сейсмического проектирования». Термин «неинженерный» применительно к зданиям означает: «те, которые спонтанно и неофициально строятся в различных странах в традиционной манере, без какого-либо или с незначительным вмешательством квалифицированных архитекторов и инженеров» [1].

Авторами [2–5] был проведен детальный сравнительный анализ нормативно-технической и научной литературы по строительству зданий со стенами из природного камня в сейсмоопасных регионах нескольких десятков стран, в результате которого были выявлены существенные отличия в расчетных предпосылках и допущениях, правилах проектирования и конструирования. Особое место уделялось проблеме проектирования «неинженерных» сооружений, которые почти не упоминаются в литературе, в связи с чем авторы начали долгосрочную исследовательскую программу с целью обновления знаний и повышения сейсмостойкости зданий из природного камня, включая подробный анализ затрат и обзор особенностей проектирования в сейсмических нормах и нормах по проектированию зданий из каменной и армокаменной кладки по всему миру.

Для представления положений и подходов, принятых в РФ в ноябре 2021 года, в данную программу в рамках проекта «Сравнение и уточнение ручных расчетов с компьютерными имитационными моделями для создания надежного метода сейсмического проектирования зданий из природного камня с цементным раствором» наряду с 20 исследователями со всего мира были приглашены исследователи из Северо-Кавказского горно-металлургического института, г. Владикавказ [6]. В настоящей работе представлены результаты совместного исследования, отмечены некоторые неточности и двусмысленности, имеющиеся в нормах Российской Федерации и Республики Таджикистан, а также содержится призыв к началу конструктивной дискуссии по поводу необходимости корректировки некоторых положений норм.

Особую актуальность вопрос оценки сейсмостойкости зданий и сооружений из природного камня имеет для республик Северного Кавказа. Согласно данным Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации [7] в них расположено 575 башен, из них 239 в Чеченской Республике, 201 в Республике Дагестан, 71 в Республике Ингушетия, 56 в Республике Северная Осетия-Алания и 8 в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесских Республиках. Несмотря на то, что башни Северного-Кавказа имеют различное функциональное назначение (жилые, боевые, совмещенные) и построены согласно различным архитектурно-строительным традициям (осетинские, вайнахские и т.п.), всех их объединяет использование в качестве основного строительного материала местного природного камня [8–10]. Большинство подобных сооружений разрушены либо почти полностью, либо частично, поэтому актуальным становится вопрос их восстановления и реконструкции в соответствии с действующими нормативными документами.

Действующие нормы на строительство в сейсмических районах [44] в РФ (далее – СП РФ) запрещают возведение зданий из природного камня. Несмотря на то, что большое число работ посвящено сравнению нормативных документов различных стран в области сейсмостойкого строительства (к примеру, США, Европы, Японии и Новой Зеландии, Индии, Пакистана, Азербайджана и др.) [1–19], можно выделить несколько присущих им особенностей.

Во-первых, большинство исследований сосредоточены на отдельных позициях, формулах или параметрах проектирования в рамках норм (например, [20], где сравниваются восемь азиатских стран), но они не охватывают полный процесс проектирования конкретного типа здания. Во-вторых, если и приводятся примеры расчетов, то почти исключительно для средне- и высокоэтажных зданий с железобетонными или стальными каркасами [21,22].

Однако сравнения сейсмических норм для несущих каменных конструкций, такие как [23,24], встречаются реже, тогда как сравнений, включающих сейсмические расчеты для каменной кладки, кроме представленных в [2], не найдено. В связи с вышеизложенным в настоящем исследовании предлагается провести сравнительный анализ расчетных положений для определения сейсмических сил для двух зданий из природного камня – жилого дома и школы, построенных в Гималайском регионе ФДР Непал.

Цель данной работы состоит из трех частей: 1. рассмотреть процесс проектирования зданий из природного камня в соответствии с буквальным применением сейсмических норм выбранных стран (ФДР Непал, Республика Таджикистан, РФ) чтобы определить верхние и нижние границы сейсмических требований; 2. провести систематическое сравнение формул для определения сейсмической силы в основании сооружения, их отдельных параметров и критериев распределения сейсмических сил, а также плотности материалов, преобразования веса в сейсмические нагрузки, сейсмического районирования, категории грунта, собственных периодов колебаний, спектров реакции, ответственности здания и комбинаций сейсмических нагрузок, 3. внести предложения и рекомендации о модернизации отечественных норм для последующего обсуждения в среде академического и инженерного сообществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В статье рассматриваются два объекта исследования: 1) горная школа, построенная фондом *SSF*, перенесшая землетрясение в районе Горкха в 2015 году без существенного ущерба; 2) проект сельского дома, типичного для рассматриваемого региона, опубликованный в каталоге проектов по реконструкции после землетрясений, подготовленном Департаментом городского развития ФДР Непал [25].

Здания спроектированы таким образом, что имеют сопоставимый вес (общая постоянная нагрузка), что является справедливой отправной точкой для всех предстоящих (и будущих) сравнений. Двухэтажный дом с верандой имеет стены толщиной 450 мм (рис. 1а); школа с тремя классами – одноэтажная, с толщиной стен 350 мм и расстоянием между поперечными стенами 6 м (рис. 1б). Оба здания возведены на сплошном каменном цоколе, обрамленном железобетонной стяжной балкой и заполненным утрамбованным грунтом (общая высота цоколя 450 мм), имеют легкие деревянные полы и крыши, а стены усилены горизонтальными монолитными железобетонными поясами. Проемы и углы/пересечения стен не обрамлены вертикальными монолитными сердечниками и арматурными стержнями.

В настоящем исследовании проводится сравнение основных положений нормативных документов ФДР Непал, РТ и РФ.

Особенности проектирования и работы объектов исследования

Конфигурация зданий правильная, без резких изменений и срезов, с равномерным распределением стен по плану здания. Объекты исследования не имеют нерегулярностей по высоте. В двухэтажном доме все стены выровнены непосредственно друг над другом (без разрывов), чтобы обеспечить четкие и прямые пути передачи нагрузки на фундамент. Проемы в стенах – небольшие, выровненные по горизонтали и по высоте, расположены прямо друг над другом на обоих этажах, с одним преднамеренным исключением во внутренней стене для анализа последствий этого отклонения. Кроме того, оба этажа имеют почти одинаковое распределение массы, с одинаковой прочностью и боковой жесткостью элементов, сопротивляющихся горизонтальным воздействиям.

Небольшая асимметрия плана дома из-за веранды не способствует его кручению. Соотношение размеров плана этажа школы также попадает под установленные пределы, где соотношение длины и ширины не должно превышать 3:1, как указано в нормах проектирования для кладки с низкой прочностью в Непале и 4:1 согласно нормам РФ (п. 6.17.18 СП РФ). Простые и регулярные здания, такие, как выбранные объекты исследования, подвержены меньшим неопределенностям при прогнозировании их сейсмического поведения, что отражается в выборе метода анализа, объясненного далее.

Предполагается, что легкие деревянные перекрытия будут работать как гибкие диафрагмы. Диапазон гибкости определяет «жесткость диафрагмы, при которой стены ведут себя так, как будто они являются изолированными элементами, а увеличение гибкости диафрагмы не влияет на поведение стены» [26]. Гибкие диафрагмы не обладают преимуществами жестких (например, железобетонных плит), такими как перераспределение горизонтальных сейсмических сил между различными элементами бокового сопротивления (пропорционально их жесткости), увеличение пространственной жесткости конструкций и устойчивости стен из плоскости. Легкие диафрагмы не увеличивают способность стен выдерживать изгибающий момент и сдвигающие усилия, так как дополнительные осевые напряжения незначительны, но они имеют преимущество в том, что не создают значительных дополнительных сил инерции, а также эффектов кручения.

Учитывая все вышесказанное, рассматриваемые здания, характеризующиеся тяжелыми жесткими стенами и легкими гибкими диафрагмами, ведут себя иначе, чем большинство обычных конструкций (таких как каркасные здания). Основное отличие заключается в том, что большая часть сейсмических сил создается массой тяжелых каменных стен, в то время как вклад легких диафрагм практически незначителен (97,5 против 2,5 % массы). Важным отличием от жестких диафрагм является то, что в случае гибких диафрагм силы инерции перекрытия распределяются на вертикальные поперечные стены пропорционально грузовым площадям. Кроме того, общая устойчивость, предотвращение опрокидывания и расслоения стен повышается за счет включения непрерывных железобетонных поясов на разных уровнях, а также за счет ограниченных размеров плана, использования цементного раствора и включения сквозных камней в кладку. В связи с этими соображениями и допущениями, непосредственное внимание в данном исследовании уделяется проверке предельной прочности (внутренние силовые факторы, жесткость в плоскости), которая, как ожидается, будет определяющей.

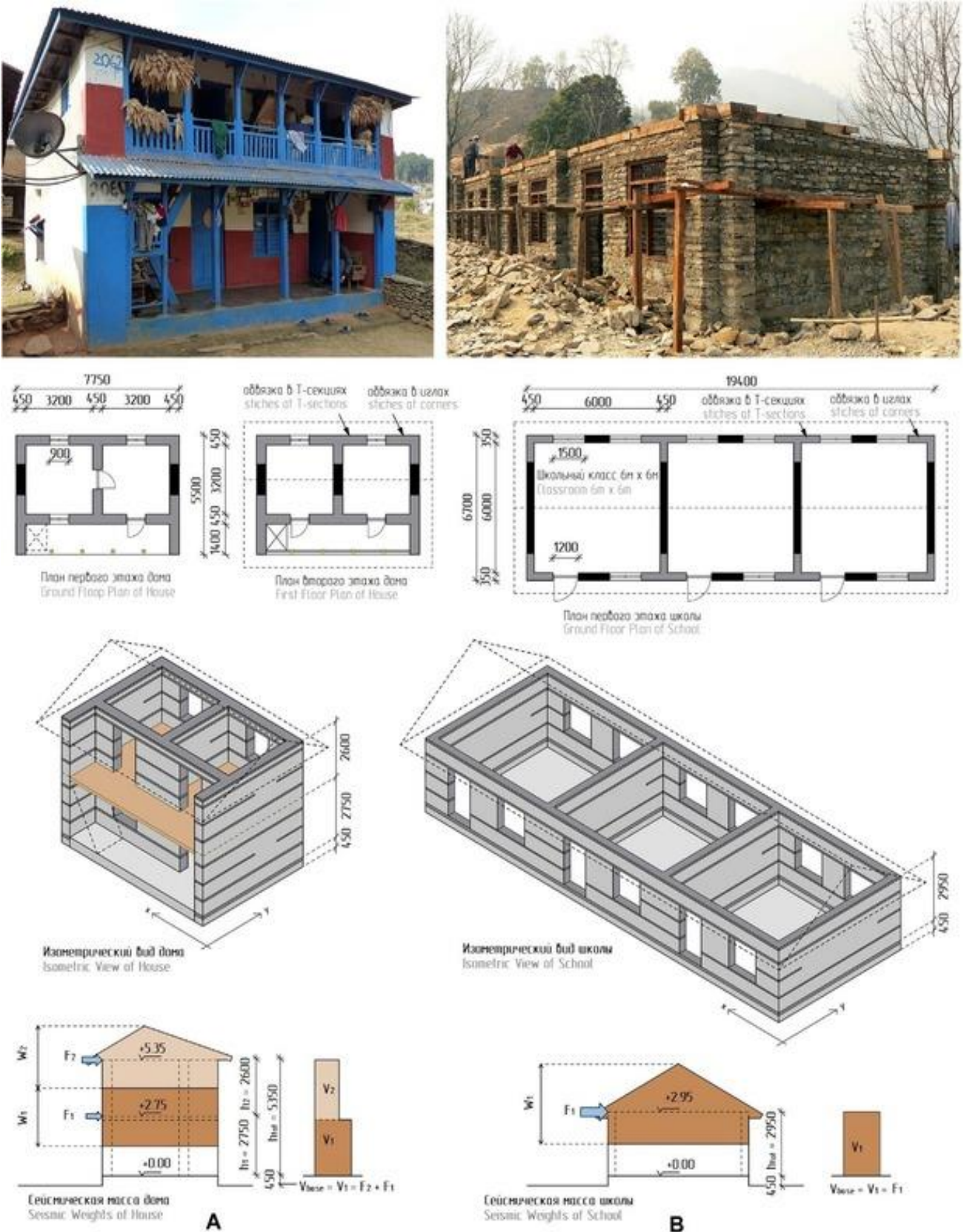


Рисунок 1 – Объекты исследования: а) двухэтажный дом с верандой б) одноэтажная школа с тремя классами (адоптировано из [2])

Figure 1 – Case study designs based on typical constructions in Nepal: a) two-story house with verandah b) one-story school with three classrooms (adopted from [2])

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1) Нагрузки и воздействия

Постоянные нагрузки

Наиболее важным фактором, определяющим силы инерции при землетрясении в здании, является его масса. В сельских и горных районах используются, как правило, тяжелые строительные материалы. Для обоих зданий собственный вес (DL – от англ. *Dead Load*) несущих и ненесущих элементов, определяется в соответствии с национальными нормами «Нагрузки и воздействия» [27, 28, 29]. Для более корректного сравнения результатов для РТ и РФ приняты одинаковые значения плотностей материалов (плотность каменной кладки, бетонов, растворов и древесины выражается в кН/м^3 , а собственный вес фанеры и кровельных листов – в кН/м^2) с учетом соответствующих коэффициентов надежности по нагрузке γ_f . Плотность кладки определялась как суммарная плотность камней и раствора из соотношения 70–30 % с последующим добавлением слоев оштукатуривания +5% для дома и +7 % для школы. Значения плотностей материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Плотности материалов

Table 1 – Densities of materials

Страна Country		Непал Nepal	РФ и РТ Russia and Tajikistan		
Материалы Materials	Ед. изм. Unit	Плотность, ρ^4 Density	Плотность, $\rho^{5,6}$ Density	γ_f	$\rho \times \gamma_f$
Песчаник бутовый Sandstone masonry	кН/м^3 kN/m^3	22,00	22,46	1,1	24,71
Железобетон Reinforced concrete	кН/м^3 kN/m^3	23,48	24,52	1,1	26,97
Раствор/штукатурка Mortar/plaster	кН/м^3 kN/m^3	20,40	17,65	1,3	22,95
Конструктивная древесина Construction wood	кН/м^3 kN/m^3	5,05	4,9	1,1	5,39
Фанера Plywood	кН/м^2 kN/m^2	0,065	0,093	1,3	0,121
Кровельные листы Roofing sheets	кН/м^2 kN/m^2	0,045	0,045	1,3	0,059

Примечание.

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f принимаются согласно п.7.2 СП 20.13330.2016.

Отдельно следует рассмотреть вопрос преобразования в сейсмические массы в отечественных нормах. В таблице 5.1 СП РФ и таблице 2, прил. 4 СНИП РТ 22-07-2018 [30] (далее СНИП РТ) представлены коэффициенты сочетаний нагрузок n_s , равные 0,9; 0,8 и 0,5 для постоянных, временных длительных и временных кратковременных соответственно. Согласно п. 6.5 СП 20.13330.2016 данные коэффициенты используются в особом сочетании нагрузок. Однако, открытым, с нормативной точки зрения, остается вопрос: какую долю статической массы преобразовывать в сейсмическую при построении расчетной динамической модели (РДМ)? В пособии по проектированию каркасных промзданий [31] представлены примеры определения сейсмических нагрузок с коэффициентами сочетаний, применяемыми при сборе нагрузок, однако этап составления сочетаний нагрузок не показан. В другом источнике [32] нагрузки также определяются с учетом коэффициентов сочетаний, однако уже не используются при составлении сочетаний. Часть практикующих инженеров [33], а также некоторые разработчики программного обеспечения [34] рекомендуют использовать коэффициенты из таблицы 5.1 дважды: первый раз, для преобразования статических загружений в динамические, второй – непосредственно в особом

сочетании нагрузок. Тем не менее, некоторые из указанных источников рекомендуют использовать всю статическую массу при составлении РДМ, иными словами, применяют коэффициент преобразования равный 1,0.

Подобные разночтения и противоречия обусловлены отсутствием в нормативной литературе строгого определения «коэффициента преобразования». Авторы предлагают введение четкой терминологии для коэффициента преобразования и коэффициента сочетаний, поскольку очевидно, что наличие подобных определений либо официальных рекомендаций по преобразованию статической массы, следует считать целесообразным. В настоящем исследовании предлагается использовать следующие определения, подчеркивающие отличия между отмеченными подходами: *метод двойного приложения (МДП)* и *метод единичного приложения (МЕП)* коэффициентов сочетаний.

В настоящем исследовании для РФ применяется МДП с использованием коэффициентов сочетаний из таблицы 5.1 СП РФ, для РТ – МЕП с использованием коэффициентов из таблицы 4 СНиП РТ, реализованный в работе [2], в которой коэффициенты сочетаний использовались единожды на этапе сбора нагрузок и не учитывались при составлении комбинации нагрузок (см. далее).

Авторы призывают коллег и читателей поделиться своим мнением по данному вопросу.

Временные нагрузки и общий сейсмический вес

Общий сейсмический вес (W_{tot}) обычно определяется как сумма постоянной нагрузки (DL) плюс части временной нагрузки (LL) и снеговой нагрузки (SL), для которых коэффициенты сочетания приведены в сейсмических нормах или соответствующих нормах «Нагрузки и воздействия». Все сейсмические нормы указывают что ветровые нагрузки не учитываются одновременно с нагрузками от землетрясений. В обоих зданиях первый этаж построен без соединения между цоколем и полом, поэтому LL первого этажа исключается, так как нагрузки передаются непосредственно на грунт основания.

Несмотря на то, что согласно нормам РФ и Республики Таджикистан снеговая нагрузка SL всегда включается в расчет, в Непале она не учитывается вовсе. Однако, следует отметить, что в соседней Индии ее учет ограничен только тяжелыми условиями, например, когда расчетная снеговая нагрузка превышает $1,5 \text{ кН/м}^2$, иными словами – слой свежего снега в 1,5 м или 75 см слежавшегося снега [35].

Такой сильный снегопад происходит, как правило, на больших высотах, которые часто мало населены, где плоские крыши более распространены, чем скатные, из-за высокой скорости ветра, и люди заботятся о том, чтобы как можно быстрее удалить тяжелые снеговые мешки. Исходя из вышесказанного, а также для возможности сравнения с референтным расчетом для Непала, в настоящем исследовании снеговая нагрузка SL не учитывается.

Согласно п. 8.2.1 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» временные равномерно распределенные нагрузки, представленные в п. 8.3, являются кратковременными, т. е. коэффициент сочетаний нагрузок для них $n_c = 0,5$. Нормативный документ Республики Таджикистан МСН 20-02-2013 являясь, по сути, идентичным российскому, тем не менее, нигде не указывает на долю длительности распределенных нагрузок (таблица 7.2), подчеркивая лишь их конструктивную принадлежность (на плиты перекрытий, лестницы). Несмотря на то, что таблица 2, прил. 4 (коэффициенты сочетаний) СНиП РТ устраняет указанную неопределенность, также определяя нагрузки на перекрытия как кратковременные (аналогично таблице 5.1 СП РФ), авторы настоящей работы на этапе консультаций и подготовки материала столкнулись с другой интерпретацией длительности временных нагрузок для Республики Таджикистан, весьма распространенной среди инженеров и академического сообщества, а именно как длительно действующих ($n_c = 0,8$). Авторы работы также приглашают коллег и читателей к дискуссии по данному вопросу.

Различные интерпретации доли длительности временных равномерно распределенных нагрузок могут, по-видимому, объясняться тем, что в более ранних редакциях СНиП «Нагрузки и воздействия» (2011 г. и 1985 г.) слово «кратковременных» также было опущено.

В настоящем исследовании для значений равномерно распределенной временной нагрузки для РФ используется коэффициент сочетаний $n_c = 0,5$. Для РТ рассчитывается вариант с использованием коэффициента сочетаний $n_c = 0,8$ [2]. Значения временных нагрузок представлены в таблице 2.

Сейсмические веса W (на уровне i -го этажа) условно объединяются на вершине обоих зданий и на уровне первого этажа дома. Поскольку цоколь плотно заполнен грунтом, он рассматривается как часть грунта, поэтому уровень $\pm 0,000$ м начинается на вершине цоколя (рис. 1). Нормы Непала специально описывают распределение весов от середины высоты этажа на соответствующие уровни выше и ниже. Нижняя половина стен первого этажа не учитывается в W_{tot} , что означает, что для дома более 25 % от общего DL (минус цоколь) не учитывается в сейсмическом весе, а для школы почти 50 %.

Для РФ и Республики Таджикистан распределение производится в соответствии с коэффициентом, зависящим от формы деформаций зданий η_k :

– для РФ:

$$\eta_{ik} = \frac{x_k \sum_{j=1}^n m_j x_j}{\sum_{j=1}^n m_j x_j^2} \quad (1)$$

где m_j – масса здания или сооружения, отнесенная к узловой точке j ,
 x_k и x_j – расстояния от точек k и j до верхнего обреза фундаментов.

– для РТ:

$$\eta_{ik} = \frac{x_k \sum_{j=1}^n Q_j x_j}{\sum_{j=1}^n Q_j x_j^2} \quad (2)$$

где m_j – вес здания или сооружения, отнесенный к узловой точке j ,
 x_k и x_j – расстояния от точек k и j до верхнего обреза фундаментов.

Распределение сейсмического веса для дома и школы представлены в таблице 3.

Таблица 2– Временные нагрузки

Table 2 – Live loads

Страна Country		Непал Nepal		РФ Russia		РТ Tajikistan	
Временная нагрузка Live Load	Ед. изм. Unit	C_{comb}	LL	n_c^1	$LL \times \gamma_f$	n_c^2	$LL \times \gamma_f$
– на первом этаже – on first floor	кН/м ² kN/m ²	0,3	2,0	0,5	1,5 × 1,3	0,8	1,5 × 1,3
– на веранде – on verandah 1st floor	кН/м ² kN/m ²	0,3	3,0	0,5	4,0 × 1,2	0,8	4,0 × 1,2

Примечание.

γ_f – коэффициенты надежности по нагрузке, принимаемые согласно п. 8.2.2 СП 20.13330.2016.

2) Определение сейсмической силы в основании сооружения

В данном разделе анализируются и сравниваются методы расчета и соответствующие формулы для определения сейсмической силы в основании сооружения, приведенные к виду метода эквивалентной поперечной силы или эквивалентному статическому методу [36] для расчета по первой группе предельных состояний кладки из природного камня объектов исследования.

Цель данного анализа – определить, какой нормативный документ является наиболее толерантными или наиболее консервативными по отношению к данному методу. В духе «неинженерного сейсмического проектирования» основное внимание уделяется упрощенному подходу, выполняемому, по возможности, путем ручных расчетов.

Критерии работоспособности и предельные состояния

Для проектирования и проверки конструкций большинство современных норм определяют так называемые *Performance Objectives* – критерии (уровни) работоспособности и устанавливают предельные состояния для проверки конструктивных элементов.

Критерии работоспособности определяются как соотношение между ожидаемой сейсмической опасностью (расчетный уровень землетрясения) и приемлемым ущербом (уровень эффективности здания, или предельное состояние). Рекомендуемые расчетные уровни предназначены для «частых, случайных, редких и очень редких землетрясений», исходя из вероятности превышения в течение срока службы здания и/или интервала повторяемости, в то время как рекомендуемые критерии работоспособности обычно делятся на «полностью работоспособные, работоспособные, безопасные для жизни и близкие к обрушению».

Две группы предельных состояний: 1) абсолютные предельные состояния (*Ultimate Limit States – ULS*) которые ведут к полной непригодности и эксплуатации или к полной (частичной) потере несущей способности, 2) функциональные предельные состояния (*Serviceability Limit States – SLS*) затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций или уменьшающие их долговечность [37-44].

Российские нормы (п. 5.2 СП РФ) выделяют две расчетные ситуации – Расчетное землетрясение (РЗ) и Контрольное землетрясение (КЗ). Основная цель расчета на действие РЗ недопущение частичной или полной потери эксплуатационных свойств («Не-обрушение», *No-collapse, ULS*), на действие КЗ – оценка общей устойчивости, неизменяемости, однородности конструкций сооружения («Ограничение повреждений», *Damage limitation*). Нормы Республики Таджикистан не определяют четких критериев работоспособности, выделяя лишь сами методы расчета – спектральный и прямой динамический метод (п. 14 СНиП РТ), а также области применения данных методов.

Таблица 3– Распределение сейсмического веса (массы)

Table 3 – Distribution of seismic weights (masses)

Страна Country		Непал Nepal	РФ (0,9 + 0,5) ¹ Russia (0.9 + 0.5)			РТ (0,9 + 0,8) ¹ Tajikistan (0.9 + 0.8)		
Общий сейсмический вес, Total seismic weight, W_{tot}	Ед. изм. Unit	W	W	η_i	$(\eta_i \times W)$	W^d	η_i	$(\eta_i \times W)$
Дом / House, W_2 (5,35 м+)	кН kN	367,9	374,3	1,332	498,7	374,3	1,339	501,4
Дом / House, W_1 (2,75 м+)	кН kN	736,2	767,8	0,685	525,8	793,6	0,689	546,4
Дом / House, W_{tot}	кН kN	1104,1	1142,1		1024,5	1167,9		1047,8
Дом / House, $W_{tot,house}^3$	%	74,9	68,7		89,70 ²	70,3		89,71 ²
Школа / School, $W_1 = W_{tot}$ (2,95 м+)	кН kN	725,1	740,1	1,00	740,1	740,1	1,00	740,1
Дом / House, $W_{tot,school}^3$	%	52,6	47,5		100,0 ²	47,5		100,0 ²

Примечания:

1. Сейсмический вес, коэффициент, зависящий от формы деформаций зданий η и распределенный сейсмический вес $\eta_i \times W$ с учетом применения коэффициентов преобразования для постоянной и временной нагрузок.

2. Процент активной сейсмической массы, определяемый как отношение суммы распределенных масс к общей массе, согласно нормам принимаемый не менее $\eta_{tot,house} = 0,90$ (90 %) и $\eta_{tot,school} = 1,0$ (100 %).

Для рассматриваемого примера для дома:

$$\%_{(0,9+0,5)} = \frac{(\eta_2 \cdot m_2) + (\eta_1 \cdot m_1)}{m_2 + m_1} = \frac{(1,332 \cdot 374,3) + (0,685 \cdot 767,8)}{374,3 + 767,8} \cdot 100\% = 89,70\%.$$

$$\%_{(0,9+0,8)} = \frac{(\eta_2 \cdot Q_2) + (\eta_1 \cdot Q_1)}{Q_2 + Q_1} = \frac{(1,339 \cdot 374,3) + (0,689 \cdot 793,6)}{374,3 + 793,6} \cdot 100\% = 89,71\%.$$

3. Процент общего сейсмического веса для дома $W_{tot,house}$ и школы $W_{tot,school}$ в сравнении с общим весом DL (без цоколя).

В настоящем исследовании рассматривается обобщенный случай проверки первого предельного состояния и уровня работоспособности, соответствующего безопасному для жизни.

Сравнение критериев работоспособности представлено в таблице 4.

Определение расчетного землетрясения

Согласно нормам Непала для проверки абсолютного предельного состояния рассматривается «редкое землетрясение», которое характеризуется 10% вероятностью превышения (*probability of exceedance, PE*) заданного уровня сейсмичности в течение 50 лет ($10\%PE_{50y}$) или средним периодом между землетрясениями (*return period, RP*) 475 лет (RP_{475}).

Согласно п. 4.3 СП РФ такое землетрясение соответствует карте общего сейсмического районирования (ОСР-2015) «А» с единственным отличием в интервале между землетрясениями 500 лет (RP_{500}). Следует, однако, подчеркнуть, что согласно таблице 4.2 СП РФ здание школы должно проектироваться в соответствии с картой «В», поэтому для школы $5\%PE_{50y}$ и RP_{1000} .

Подход, примененный в нормах Республики Таджикистан не основан на вероятностном подходе: в Приложении 3 СНиП РТ представлена карта ОСР Республики Таджикистан со значениями нормативной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64.

Методы расчета на сейсмическое воздействие

Методы расчета на сейсмическое воздействие включают в себя линейные (упругие) методы, такие как метод эквивалентной поперечной силы (*Equivalent Lateral Force, ELF*) и модальный анализ спектра реакций, а также нелинейные (неупругие) методы, такие как нелинейный статический (*Pushover*-анализ) и расчет во временной области с использованием инструментальных или синтезированных акселерограмм. Следуя принципу «неинженерного сейсмического проектирования» основное внимание уделяется статической линейной процедуре, которая идеализирует конструкцию как систему с одной степенью свободы и основным периодом колебаний. Движение грунта при землетрясении заменяется внешними («эквивалентными») статическими горизонтальными силами, которые равны силе в основании сооружения. Как правило, массы принимаются сосредоточенными в уровне этажа, а силы, действующие на этаж, используются для определения перемещений и внутренних силовых факторов. Расчет максимальной силы в основании сооружения по эквивалентному статическому методу также позволяет провести более наглядное сравнение рассматриваемых нормативных документов.

Таблица 4 – Критерии работоспособности для расчета по первому предельному состоянию

Table 4 – Performance objectives for Ultimate Limit State verifications

Страна Country	Критерий работоспособности Performance objective	Расчетное землетрясение Earthquake design level	Метод расчета Method	Ограничения и конструктивные требования Conditions and structural requirements
Непал Nepal	Сохранение жизни (<i>life-safety</i>)	10% PE_{50y} или RP_{475}	Эквивалентный статический метод (<i>ELF</i>)	$H < 15$ м и $T_1 < 0,5$ с (не рекомендуется для школ)
РФ Russia	– Не-обрушение (<i>no-collapse</i>) для дома и школы. – Ограничение повреждений (<i>damage limitation</i>) для школы.	– 10% PE_{50y} или RP_{500} (карта ОСР-2015 “А”) для дома – 5% PE_{50y} или RP_{1000} (карта ОСР-2015 “В”) для школы	– Упрощенный модальный анализ (<i>S-Modal</i>) для дома и школы – Расчет во временной области для школы	$H \leq 5$ этажей $T_1 < 0,4$
РТ Tajikistan	Сохранение жизни (<i>life-safety</i>)	Шкала интенсивности MSK-64	– Упрощенный модальный анализ (<i>S-Modal</i>)	$H \leq 5$ этажей $T_1 < 0,4$

Основным условием использования эквивалентного метода является то, что здания должны быть правильной формы как в плане, так и по высоте. Для обоих рассматриваемых зданий эти условия выполнены. Нормы Непала также устанавливают следующие ограничения по высоте $H < 15$ м и периода основного тона колебаний $T_1 < 0,5$ сек.

Российские и таджикские нормы требуют проведения модального анализа спектра реакций (называемого спектральным или линейно-спектральным методом), согласно которому сейсмический вес на каждом уровне умножается на коэффициент, зависящий от формы деформаций зданий η_{ik} , который учитывает смещения на разных уровнях этажа для различных форм колебаний. Однако для простых зданий ($H \leq 5$ этажей и $T_1 < 0,4$) согласно п. 5.8 СП РФ и п. 25 СНиП РТ допускается использовать только первую форму колебаний (упрощенный модальный анализ, *S-Modal*). В этом случае анализ *S-Modal* становится аналогичным методу *ELF*, с той лишь разницей, что *S-Modal* включает уменьшенную часть общего сейсмического веса.

Однако следует иметь в виду, что *ELF* рассчитывает максимальную силу в основании сооружения, вследствие чего этот метод имеет тенденцию завышать ее значения для короткопериодных зданий из-за включения полного сейсмического веса, в отличие от модального анализа спектра отклика, который объединяет эффективные веса всех форм колебаний, из которых эффективный вес первой формы обычно составляет 60–80% от общего сейсмического веса [45]. Для каменной кладки рекомендуется включать 90% эффективной (или эквивалентной) сейсмической массы [39], что согласуется с методом *S-Modal* в РФ и РТ, где для дома учитывается 89,7% сейсмической массы (см. таблица 3).

Поперечная сила в основании сооружения согласно эквивалентному статическому методу

Определяется максимальная поперечная сила, возникающая в основании сооружения в результате сейсмических воздействий. В большинстве нормативных документов формулы для расчета силы в основании сооружения представлены в виде коэффициента сейсмического ускорения, приложенного в центре масс сооружения и определяемого в долях ускорения силы тяжести (g), которая также должна быть умножена на общий сейсмический вес сооружения (W_{tot}). Большинство формул построены (или могут быть записаны) аналогичным образом и выражают силу в основании сооружения как функцию спектрального ускорения, которое должно быть уменьшено на

коэффициент, учитывающий особенности конструкции (коэффициент поведения конструкции). Спектральное ускорение является результатом пикового ускорения грунта (PGA) в подстилающем слое ($PGA_{подстилающий}$), которое сначала усиливается напластованными грунтами (пиковое ускорение грунта на уровне поверхности $PGA_{поверхность}$), а затем изменяется конструкцией в зависимости от ее основного периода колебаний T . Спектральное ускорение строится в виде упругого (нередуцированного) спектра реакции как функция T для данного профиля площадки; в дальнейших сравнениях скальная порода принимается за эталонный грунт. Спектр упругой реакции затем уменьшается на коэффициент поведения конструкции, который в общем случае учитывает присущие неупругие свойства системы бокового сопротивления конструкции, такие как пластичность, избыточная прочность и рассеивание энергии, хотя для каменной кладки они, как ожидается, будут минимальными. В большинстве норм это называется спектром расчетной реакции, но, чтобы избежать путаницы в терминологии, в данной работе используется термин «уменьшенный (неупругий) спектр реакции» (по сравнению с неуменьшенным (упругим) спектром реакции). Сила в основании сооружения может быть также дополнительно увеличена из-за ответственности конструкции. Это приводит к следующему концептуальному представлению поперечной силы в основании сооружения для проверки по первому предельному состоянию:

$$\text{Сила в основании} = \frac{(PGA_{подстил.} \cdot \text{грунт}) \cdot \text{спектральное ускорение}}{\text{поведение конструкции}} \cdot \text{ответственность} \cdot \text{сейсмический вес},$$

где $(PGA_{подстил.} \cdot \text{грунт}) \cdot \text{спектральное ускорение} = \text{спектральное ускорение}$,

$$(PGA_{подстил.} \cdot \text{грунт}) = PGA_{поверхность}.$$

В таблице 5 представлены формулы для расчета поперечной силы в основании сооружения, переписанные в соответствии с концептуальной формулой, представленной выше. В последнем столбце указаны дополнительные требования или ограничения. Так как упрощенный модальный анализ рассматривает только первую форму колебаний, он может быть концептуально переписан с учетом того, что сейсмический вес (Q_{tot}) не полностью включен (для дома), путем умножения на коэффициент зависящий от формы деформации ($\eta_k Q_k$) в качестве дополнительной константы ($\eta_{tot, дом} = 0,90$ и $\eta_{tot, школа} = 1,0$, см. таблица 3 и таблица 8).

Все компоненты концептуальной формулы предоставлены в последующих пунктах. Для каждой формулы необходимо определить расчетное пиковое ускорение грунта (PGA) для возможности сравнения воздействия на конкретное сооружение, вызванное грунтовыми условиями и конструктивными характеристиками, как это предписывается нормами для различных уровней сейсмичности. Все соответствующие значения и коэффициенты, которые используются для сравнений, представлены в таблицу 8.

Грунтовые условия

Поскольку местные грунтовые условия оказывают значительное влияние на пиковое ускорение грунта и форму спектра отклика [45], необходимо определить референтный грунт основания сооружения.

В нормах Непала выделяют 4 класса грунтов, используя различные параметры: 1) твердые породы и жесткие грунты (тип A) – прочность на сжатие без ограничения (в кПа), 2) мягкие грунты (тип C) – по стандартным значениям испытания на проникающую способность (N_{SPT} в ударах/30 см) или – по прочности на сдвиг в увлажненном состоянии (s_u в кПа). Строительство на слабых грунтах (типа D) следует избегать.

В нормах РФ (таблица 4.1) и РТ (приложение 4, таблица 1) классифицируются по средней скорости распространения поперечных волн для 30-метровой толщи ($v_{s,30}$ в м/с), СП РФ также вводит дополнительный параметр «сейсмическая жесткость» равный произведению плотности грунта на скорость распространения поперечных волн ($\rho \cdot V_s$).

В настоящем исследовании в качестве эталонного грунта основания принимается скальный грунт с $v_{s,30}$ около 750–800 м/с, что соответствует типу A в Непале и категории грунта по

сейсмическим свойствам I в РФ и РТ. Следует также отметить, что скальный грунт является наилучшим возможным вариантом, но тот факт, что большая часть зданий из природного камня располагается в горных районах, не обязательно означает, что все участки имеют благоприятные почвенные условия, поэтому местные грунтовые условия всегда должны рассматриваться в каждом конкретном случае.

Таблица 5 – Концептуальные формулы для расчета по первому предельному состоянию

Table 5 – Conceptual base shear formulas for ULS-verification

Страна Country	Поперечная сила в основании Base shear	Обобщенная формула, для расчета по первому предельному состоянию Combined and re-written for ULS verification	Требования и ограничения Requirements and restrictions
Непал Nepal	$V = C_d(T_1) \cdot W$, $C_d(T_1) = C(T_1) / (R_\mu \cdot \Omega_u)$	$V = \frac{Z \cdot C_h(T_1)}{R_\mu \cdot \Omega_u} \cdot I \cdot W$	$C(T_1) = C_h(T_1) \cdot Z \cdot I$ $F_i = \frac{W_i \cdot h_i}{\sum_i^n W_i \cdot h_i} \cdot V$
РФ Russia	$S_{ik} = K_0 \cdot K_1 \cdot S_{0ik}$ $S_{0ik} = m_k^j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot \eta_{ik}$	$S_{ik} = \frac{A \cdot \beta_i}{1 / (K_1 \cdot K_\psi)} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik} \cdot m_k$	$\eta_{ik} = \frac{x_k \cdot \sum_{j=1}^n m_j \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n m_j \cdot x_j^2}$
РТ Tajikistan	$S_{ik} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot S_{0ik}$ $S_{0ik} = Q_k \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot \eta_{ik}$	$S_{ik} = \frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{1 / (K_2 \cdot K_\psi)} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik} \cdot Q_k$	$\eta_{ik} = \frac{x_k \cdot \sum_{j=1}^n Q_j \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n Q_j \cdot x_j^2}$

Обозначения в таблице 5:

V – полная горизонтальная сила в основании;

$C_d(T_1)$ – расчетный коэффициент сейсмического отклика;

$C(T_1)$ – расчетное горизонтальное ускорение упругого спектра;

$Z = A$ – фактор сейсмического зонирования и расчетное ускорение основания;

S_{ik} и S_{0ik} – расчетная сейсмическая нагрузка для i -й формы колебаний в уровне k ;

$C_h(T_1)$ и β_i – коэффициент спектрального усиления и коэффициент динамичности;

K_3 – коэффициент, учитывающий высоту зданий и сооружений;

$R_\mu = K_1$ (РФ) = K_2 (Таджикистан) – коэффициент редукции, коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции и допускаемые повреждения;

K_ψ – коэффициент, учитывающий способность здания и сооружения к рассеиванию энергии;

Ω_u – коэффициент перегрузки;

$I = K_0$ (РФ) = K_1 (Таджикистан) – коэффициент, учитывающий степень ответственности зданий и сооружений;

$W = Q_k = m_k$ – сейсмический вес, сейсмическая масса;

h_i – высота расположения сейсмического веса от уровня приложения сейсмического воздействия (обреза фундамента);

η_{ik}, x_k, x_i – см. формулы 1 и 2.

Расчетное пиковое ускорение грунта

Интенсивность ожидаемого движения грунта на данном участке (сейсмичность площадки строительства) выражается в виде расчетного пикового ускорения грунта (PGA). Расчетные уровни землетрясений определяются нормами либо через установленные значения PGA , соответствующие

определенному сейсмическому районированию, либо путем интерполяции карт контуров сейсмической опасности, либо через таблицу координат конкретного объекта. Сейсмические зоны и соответствующие им *PGA* показаны в таблице 6.

Непал назначает коэффициент сейсмического районирования (*Z*) для выбранных основных локаций, или же *Z* определяется путем приблизительной интерполяции между контурными линиями карты сейсмического районирования. В нормах РФ и Республики Таджикистан значения *PGA* относятся к сейсмичности площадок, где за эталон принята категория грунта II. Например, сейсмичность площадки 9 равняется $A = 0,40 g$. Однако на скальном грунте (категория I) разрешается использовать расчетные значения на один уровень интенсивности меньше, таким образом, зона 9 становится зоной 8 с $A = 0,20 g$. Фактически это означает, что на скальном грунте сила в основании сооружения уменьшается наполовину.

Период собственных колебаний

Спектральное ускорение сооружения в основном зависит от его основного (или собственного) периода колебаний T_1 (в секундах). Основными параметрами, влияющими на T_1 , являются вес и высота здания, а также жесткость элементов несущей системы зданий и их распределение в плане и по высоте. Чем выше здание, тем больше его T_1 ; чем тяжелее здание, тем больше его T_1 ; и чем жестче здание, тем меньше его T_1 . Как правило, для жестких одноэтажных зданий T_1 составляет около 0,05 с [40]. Большинство сейсмических норм предоставляют эмпирические формулы для определения характерного периода T_1 вдоль каждого основного направления здания.

Таблица 6 – Отношение между сейсмическими зонами, расчетным пиковым ускорением грунта и разрешенными методами расчета зданий из природного камня

Table 6 – Relation between seismic zones, design peak ground accelerations and allowed methods of analysis for natural stone walls

Непал Nepal				РФ и РТ Russia and Tajikistan			
PGA	Зона Zone	Z	Ан. Ан.	PGA	Балл Magnitude	A	Ан. Ан.
0,1	–	–	–	0,1	7	0,1	<i>s.mod</i>
0,2	–	–	–	0,2	8	0,2	<i>s.mod</i>
0,25	1	0,25	<i>ELF</i>	–	–	–	–
0,3	2	0,30	<i>ELF</i>	–	–	–	–
0,35	3	0,35	<i>ELF</i>	–	–	–	–
0,4	4	0,40	<i>ELF</i>	0,4	(9)	(0,4)	н.т.

Обозначения в таблице 6:

«Ан.» – метод анализа; *ELF* – эквивалентный статический метод; *s.mod* – упрощенный спектральный метод;

«н.т.» – анализ не требуется

В Непале используется приблизительная формула $T_1 = (k_t \cdot H^{3/4}) \cdot 1,25$, которая применима ко всем конструктивным системам при условии, что высота здания не превышает 40 м. Она применяется к обоим основным направлениям здания и в основном зависит от его высоты H , которая умножается на числовой коэффициент k_t , зависящий от типа конструкции. Высота ограничена высотой самой верхней части конструкции.

В нормах РФ и Республики Таджикистан не имеется формулы для расчета основного периода колебаний. В настоящем исследовании использовалась эмпирическая формула, представленная в [41]. Следует также отметить, что единственным определением высоты в СП РФ и СНиП РТ является расстояние от верха фундамента до соответствующей массы/уровня (см. формулы 1 и 2).

Поскольку вся масса зданий в рассматриваемых примерах находится именно в стенах, разумным является определение H по верху стен.

Сравнение уравнений и расчет основного периода колебаний для рассматриваемых зданий представлены в таблице 7.

Спектральное усиление

Форма спектра отклика (коэффициент динамичности β в РФ и РТ) показывает идеализацию того, как собственный период колебаний и демпфирование здания влияют на его реакцию при землетрясении с точки зрения максимального усиления PGA на поверхности. Форма спектра состоит, как правило, из 3–4 ветвей, из которых только первые два сегмента представляют интерес для рассматриваемых зданий. За короткопериодной реакцией, начинающейся с опорной точки (PGA) и линейно возрастающего спектрального ускорения, следует плато постоянного спектрального ускорения. На рисунке 2 показаны первые две ветви спектра отклика упругого (нередуцированного) грунта для скального грунта с 5% затуханием, для всех выбранных стран:

- для Непала: тип грунта – A , границы плато 0,1–0,5 с;
- для РФ: грунты I–II категории, границы плато 0,1–0,4 с;
- для Республики Таджикистан: грунты I категории, границы плато 0,1–0,35 с.

Коэффициент затухания, как правило, принимается равным $\zeta = 5\%$ для всех типов кладки. Значения коэффициента, учитывающего особенности работы конструкции (следующий раздел) в нормах обычно также калибруются для 5%. Однако данное утверждение может потребовать подтверждения в будущем, поскольку имеются лишь ограниченные данные о коэффициентах затухания для каменной кладки на известковых или грязевых растворах с большим разбросом результатов от 2 до 9% [41], тогда как для каменной кладки на цементном растворе подобных данных не найдено.

Таблица 7 – Сравнение уравнений и расчет основного периода колебаний для рассматриваемых зданий

Table 7 – Comparison of equations and calculations of Natural Periods of Vibration for the case study buildings

Страна Country	Уравнение Equation	Направление Direction	Дом / House			Школа / School		
			k_t	h (м)	T (с)	k_b, C_t	h (м)	T (с)
Непал Nepal	$T_1 = (k_t \cdot H^{3/4}) \cdot 1,25$	x, y	0,0500	5,35	0,220	0,0500	2,95	0,141
Страна Country	Уравнение Equation	Направление Direction	b (м)	H (м)	T (с)	b (м)	H (м)	T (с)
РФ и РТ Russia and Tajikistan	$T_1 = 0,0905\mu\sqrt{b}$, $\mu = H / b$	x	5,5	5,35	0,206	6,7	2,95	0,103
		y	7,75	5,35	0,174	19,4	2,95	0,061

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции (структурный фактор)

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции, позволяет снизить упругое спектральное ускорение, вводя нелинейные (неупругие) механизмы, присущие типологии конструкции и материалам здания, такие как текучесть, пластичность, избыточная прочность и свойства рассеивания энергии. Поэтому в нормах проводится четкое различие между неупругим неуменьшенным откликом (требующим отсутствия повреждений) и уменьшенным расчетным спектром (с допустимыми повреждениями, но без обрушения, для расчета по первой группе предельных состояний).

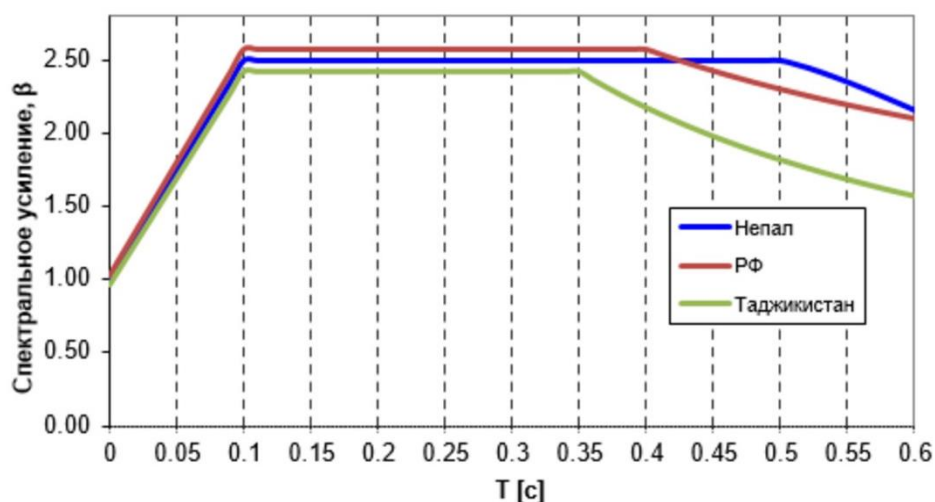


Рисунок 2 – Упругий спектр отклика с 5% затуханием

Figure 2 – Elastic response spectra for rock soil with 5% viscous damping

Диапазон неупругих деформаций каменной кладки, как правило, очень ограничен из-за относительной хрупкости раствора. Однако каменная кладка хорошего качества обладает значительной способностью к сдвигу и рассеиванию энергии, а также большой способностью к нелинейной деформации при умеренных уровнях повреждения [43]. Этот показатель может быть повышен еще больше за счет повышения прочности раствора, а также за счет включения непрерывных горизонтальных поясов для улучшения пространственной работы сооружения.

Нормы Непала определяют коэффициент пластичности $R_u = 2,0$ для номинально армированной кладки (*nominally reinforced masonry, NMR*) с горизонтальными поясами и вертикальными арматурными стержнями, который должен быть умножен на коэффициент перегрузки $\Omega_u = 1,2$. Без вертикальных стержней предполагается, что $R_u \cdot \Omega_u = 2,0$.

Нормы Республики Таджикистан уменьшают спектр с помощью коэффициента редукции, учитывающего конструктивные решения зданий и сооружений ($K_2 = 1,45$ для каменной кладки) и коэффициента рассеивания энергии ($K_v = 1,0$), что составляет общее снижение $1 / (K_2 \cdot K_v) = 0,69$.

В РФ обобщенный коэффициент редукции можно записать в следующем виде $1 / (K_1 \cdot K_v) = 1 / (0,4 \cdot 1,0) = 2,5$, где $K_1 = 0,4$ коэффициент, учитывающий допустимые повреждения для каменной кладки, $K_v = 1,0$ – коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии.

Коэффициент, учитывающий степень ответственности зданий и сооружений

Последний компонент сейсмической силы представляется в виде коэффициента, учитывающего степень ответственности зданий и сооружений. Все нормы присваивают коэффициент 1,0 для обычных (жилых) зданий, и более высокий коэффициент от 1,1 (РФ) до 1,5 (Непал) для школ, так как они представляют больший риск из-за постоянного пребывания большого количества людей. Они также должны оставаться работоспособными после стихийного бедствия, например, после землетрясения в районе Горкха в 2015 году школы *SSF* выполняли функции пунктов первой помощи и временного убежища.

Нормы Таджикистана в значительной степени отклоняются от значений, указанных выше: коэффициент важности $K_1 = 0,25$ для домов и до $K_1 = 0,35$ для школ (больше на 40%).

Сравнение сейсмической силы в основании сооружения

Результаты сравнения сейсмической силы в основании сооружения со значениями всех компонентов представлены в таблице 8, в следующем виде: «Сила в основании = $PGA \cdot C_{RS} \cdot W$ », где коэффициент C_{RS} представляет собой «коэффициент усиления для зданий из кладки из природного

камня» – отношение максимального ускорения грунта к коэффициенту, учитывающему особенности работы конструкции (структурный фактор). Извлекая расчетную PGA и предполагая, что сейсмический вес является постоянным, можно легко сравнить данные коэффициенты для рассматриваемых стран. Анализируя коэффициенты в таблице 8, сразу очевидно, что Непал гораздо более консервативен, чем РФ и РТ, в отношении обоих зданий, рассматриваемых в исследовании. Также можно сделать вывод, что РФ на 9% более консервативен в отношении дома, а РТ, с другой стороны, на 15% более консервативен в отношении школы.

3) Расчет сейсмической силы в основании сооружения и распределение сейсмических сил

В данном пункте рассчитываются и анализируются сейсмические силы в основании сооружения, распределение сейсмических сил по этажам и перераспределение нагрузки на отдельные стены и простенки. Выбран средний уровень землетрясения $PGA = 0,2 g$, при котором разрешено строительство зданий из природного камня в Непале и Таджикистане.

В таблицах 8А–8Г показаны компоненты формул для расчета «коэффициента усиления для зданий из природного камня» с сейсмической опасностью $0,2 g$ для дома и школы, соответственно (см. таблицы 8В–8Г).

Распределение сейсмической силы по этажам

Первым шагом является расчет определения сейсмической силы в основании сооружения для $0,2 g$ с использованием формул для каждой страны, приведенных в таблице 5, коэффициентов C_{RS} из таблицы 8 и сейсмических весов из таблицы 3. В результате получаются усилия, представленные в таблицах 9–10, подтверждающие, что Непал более консервативен в отношении общей силы в основании сооружения V_{base} , Непал принят за референтную страну, а процентная разница между другими странами показана в третьей колонке. Силы в основании сооружения вертикально распределяются по верхнему уровню (F_2) и уровню первого этажа (F_1) дома с использованием формулы распределения для Непала, приведенной в таблице 5. В РФ и РТ эта последовательность обратная: сначала рассчитываются горизонтальные сейсмические силы для каждого уровня этажа отдельно, с учетом коэффициента распределения по уровням η_{ik} , которые затем добавляются к общей силе в основании.

Комбинации нагрузок и вертикальные сейсмические нагрузки

Нормы Непала включают только одну комбинацию, которая является одинаковой как для определения сейсмического веса и сейсмической силы в основании сооружения, так и для проверки участков стен.

В РФ и РТ для особого сочетания нагрузок используются коэффициенты сочетаний, представленные в таблице 5.1 СП РФ и таблице 2, прил. 4 СНиП РТ соответственно. Помимо этого, согласно п. 6.14.3 СП РФ и п. 143 СНиП РТ при расчете каменных конструкций необходимо учитывать одновременное действие горизонтальных и вертикальных сейсмических сил, при этом значение вертикальной нагрузки при расчетной сейсмичности 7–8 баллов должно быть 15% соответствующей вертикальной статической нагрузки. В нормах РФ вертикальная составляющая не учитывается в особом сочетании отдельно от горизонтальной, в то время как, согласно п. 27 СНиП РТ, следует учитывать два различных сочетания: горизонтальные сейсмические нагрузки с коэффициентом сочетаний равным 1,0 и вертикальную сейсмическую нагрузку с коэффициентом сочетаний равным 0,5 и наоборот. Также следует учитывать то, что вертикальная составляющая может быть направлена в обоих направлениях – вверх и вниз.

Таблица 8 - Сравнение формул для определения силы в основании сооружения для домов и школы

Table 8 - Comparison of conceptual base shear formulas for houses and schools

А. Дом A. House	Спектральное ускорение Spectral acceleration				Уменьшение Reduction		Ответственность Importance	$C_{RS,H}^3$
Страна Country	PGA	Грунт Soil	Усиление Amplification		Структурный фактор Behavior factor		I_H	
Непал Nepal	Z	A-C	$C_h(T)$	2,5	$R_\mu \Omega_u$	2,0	$I = 1,0$	1,25
РФ Russia	A	I	β_i	2,5	$1 / (K_1 K_\psi)$	$1 / (0,4 \cdot 1) = 2,5$	$K_0 = 1,0$	0,90 ¹
РТ Tajikistan	A	I	$\beta_i K_3$	2,5	$1 / (K_2 K_\psi)$	$1 / (1,45 \cdot 1) = 0,69$	$K_1 = 0,25$	0,82 ¹
Б. Школа B. School	Спектральное ускорение Spectral acceleration				Уменьшение Reduction		Ответственность Importance	$C_{RS,S}^3$
Страна Country	PGA	Грунт Soil	Усиление Amplification		Структурный фактор Behavior factor		I_H	
Непал Nepal	Z	A-C	$C_h(T)$	2,5	$R_\mu \Omega_u$	2,0	$I_H = 1,5$	1,88
РФ Russia	A	I	β_i	2,5 по оси x; 1,92 ² по оси y	$1 / (K_1 K_\psi)$	$1 / (0,4 \cdot 1) = 2,5$	$K_0 = 1,1$	1,10 ¹
РТ Tajikistan	A	I	$\beta_i K_3$	2,5	$1 / (K_2 K_\psi)$	$1 / (1,45 \cdot 1) = 0,69$	$K_1 = 0,35$	1,27 ¹
В. Сравнение коэффициентов усиления силы в основании сооружения для дома C. Comparison of base shear coefficients for house design								
Страна Country	Формула Base shear formula		Значения для объекта исследования Values for case study house			Сила в основании сооружения $= C_{RS,tot}^4 \cdot W$ Base shear $= C_{RS,tot}^4 \cdot W$		
Непал Nepal	$\frac{(Z \cdot C_h(T_1))}{(R_\mu \Omega_u)} \cdot I$		$Z = 0,2; C_h(T) = 2,5; R_\mu \Omega_u = 2,0; I = 1,0$			$V = 0,25 W_i$		
РФ Russia	$\frac{A \cdot \beta_i}{R} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik}$		$A = 0,2; \beta_i = 2,5; R = 2,5; K_0 = 1,0; \eta_{ik} = 0,9^1$			$S_k = 0,18 m_k$		
РТ Tajikistan	$\frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{R} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik}$		$A = 0,2; \beta_i K_3 = 2,5; R = 0,69; K_1 = 0,25; \eta_{ik} = 0,9^1$			$S_k = 0,163 Q_k$		
Г. Сравнение коэффициентов усиления силы в основании сооружения для школы D. Comparison of base shear coefficients for school design								
Страна Country	Формула Base shear formula		Значения для объекта исследования Values for case study school			Сила в основании сооружения $= C_{RS,tot}^4 \cdot W$ Base shear $= C_{RS,tot}^4 \cdot W$		
Непал Nepal	$\frac{(Z \cdot C_h(T_1))}{(R_\mu \Omega_u)} \cdot I$		$Z = 0,2; C_h(T) = 2,5; R_\mu \Omega_u = 2,0; I = 1,5$			$V = 0,375 W_i$		
РФ Russia	$\frac{A \cdot \beta_i}{R} \cdot K_0 \cdot \eta_{ik}$		$A = 0,2; \beta_i = 2,5; R = 2,5; K_0 = 1,1; \eta_{ik} = 1,0^1$			$S_k = 0,22 m_k$		
РТ Tajikistan	$\frac{A \cdot \beta_i \cdot K_3}{R} \cdot K_1 \cdot \eta_{ik}$		$A = 0,2; \beta_i K_3 = 2,5; R = 0,69; K_1 = 0,35; \eta_{ik} = 1,0^1$			$S_k = 0,254 Q_k$		

Примечания:

1. Значения η_{ik} равные 0,9 и 1,0 для здания дома и школы, соответственно.
2. Дальнейшие расчеты для школы будут выполняться для направления x с коэффициентом динамичности $\beta_x = 2,5$.

3. C_{RS} – коэффициент усиления для зданий из кладки из природного камня, включающие в себя все коэффициенты, кроме PGA .

4. $C_{RS, tot}$ – коэффициент усиления для зданий из кладки из природного камня, включающие в себя все коэффициенты, для заданного значения PGA .

Важно отметить, что у авторов настоящего исследования возникли разногласия в трактовке определения «статическая нагрузка»: один из авторов полагает что «статической» следует считать ту постоянную и временную нагрузку, которая непосредственно используется в особом сочетании нагрузок $(0,9DL + 0,5LL)$ – для РФ и $(0,9DL + 0,8LL)$ – для РТ [2], другие авторы полагают, что подразумевается полная статическая нагрузка без учета коэффициентов преобразований и сочетаний $(1,0DL + 1,0LL)$. В настоящей работе рассматривается вариант полной статической нагрузки. Авторы считают целесообразным внести большую ясность в формулировку данного определения в будущих редакциях СП, чтобы избежать возможных разночтений и вновь призывают коллег поделиться своим мнением и комментариями по данному вопросу.

В настоящем исследовании рассматриваются 2 комбинации нагрузок для РФ и 4 для РТ (см. таблицы 9–10). Следует отметить, что с учетом всех вышеизложенных разночтений, количество комбинаций может быть существенно большим (8 для РФ и 16 для РТ), однако в работе представлены только три примера для каждой страны, которые сравнивают описанные различия. Для удобства сравнения различные символы для постоянной, временной и сейсмической нагрузок приняты одинаковыми (D , L и E – соответственно), и включены только верхний и нижний пределы.

Продольные и поперечные силы, изгибающие моменты

Распределение внутренних силовых факторов (N , Q и M) будет показано на примере простенков X_{1-4} для дома и Y_{1-1} для школы (см. рис. 3). Предполагается наихудший сценарий, при котором полностью игнорируются перемычки и подоконники, а также пренебрегается благоприятное воздействие горизонтальных поясов. Иными словами, предполагается анализ свободно стоящего консольного участка стены, что, в действительности, не является очень реалистичным сценарием, но дает достаточно наглядное представление о сейсмических требованиях, диктуемых нормами. Поскольку вся масса находится в стенах, вместо распределения сил инерции F_1 и F_2 по грузовым площадям (для жестких диафрагм), силы перераспределяются пропорционально массам в соответствии с длиной основных стен в рассматриваемом направлении, плюс соответствующие длины стен в перпендикулярном направлении. Из-за небольшой асимметрии дома это приводит к распределению 45–55% для стен в направлении x и 32–36–32% в направлении y . Для школы распределение симметричное: 50–50% и 21–29–29–21% соответственно.

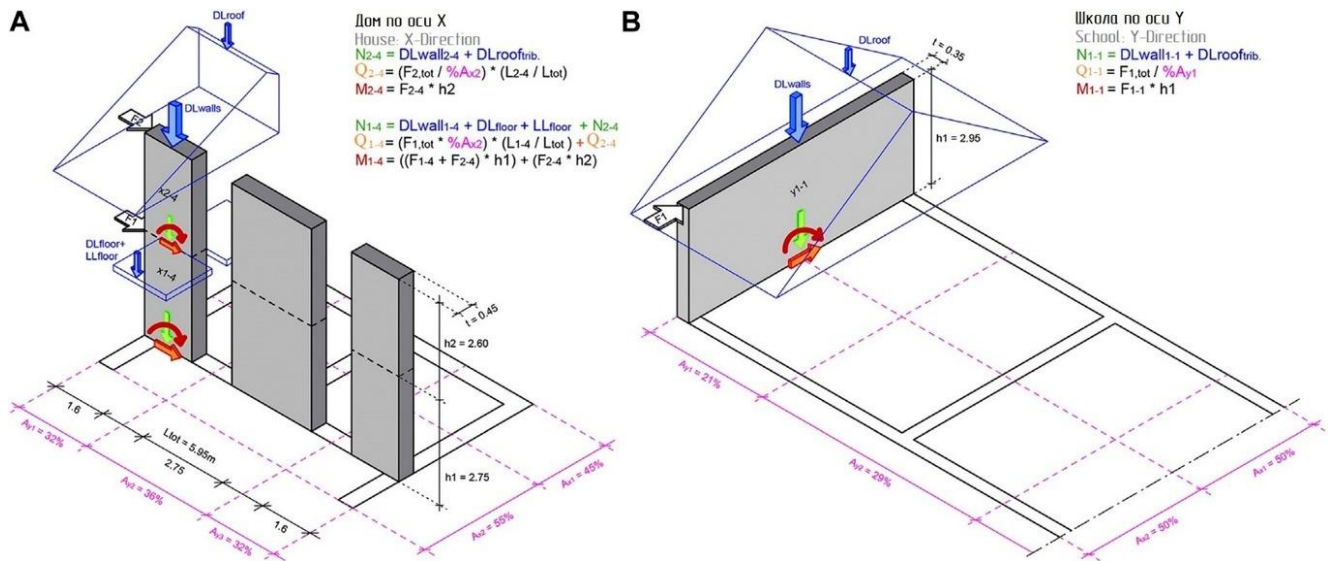


Рисунок 3 – Распределение массы и внутренних силовых факторов на консольный простенок для (А) дома и (В) проекта школы (с разрешения фонда *Smart Shelter Foundation*)

Figure 3 – Division of mass and internal actions on a cantilevered pier for (A) the house and (B) the school design (all by courtesy of Smart Shelter Foundation)

Расчетные значения для N , Q и M для критических комбинаций нагрузок представлены в таблицах 9–10. В первой строке каждой таблицы представлены результаты расчета для Непала, используемые в дальнейшем в качестве референтных значений. Ожидается, что более высокое значение N благоприятно для более жестких панелей, в то время как более низкие значения N могут благоприятствовать изгибающему моменту для гибких панелей. Однако определение наиболее критических панелей может быть сделано только на последующих стадиях расчета, во время полной проверки несущей способности. В целом, таблицы 9–10 показывают, что поперечная сила в основании сооружения (второй столбец) позволяет определить, какая страна является наиболее толерантной (РТ) и наиболее консервативной (Непал). В последних столбцах представлено процентное соотношение по сравнению с референтными непальскими значениями.

Таблица 9 – Сравнение сейсмических сил и внутренних силовых факторов для простенка дома X_{1-4}

Table 9 – Final calculations of base shear, story shear, and forces acting on selected masonry panel X_{1-4}

Страна Country	V_{base}	%	F_2	F_1	Критические комбинации Critical load combinations	N	Q	M	$\%N$	$\%M$
Непал Nepal	276,0	Реф.	136,1	140,0	$1,0DL + 0,3LL \pm 1,0E$	97,1	41,0	165,2	Реф.	Реф.
РФ Russia					$0,9DL + 0,5LL + 1,0E \pm 1,0(0,15N_{static})$					
1	204,9	-25,8	99,7	105,2	$1,05DL + 0,65LL \pm 1,0EL$	122,9	30,4	122,1	26,6	-26,1
2	204,9	-25,8	99,7	105,2	$0,75DL + 0,35LL \pm 1,0EL$	85,3	30,4	122,1	-12,2	-26,1
РТ Tajikistan					(1) $1,0E_h + 0,5E_v$; (2) $0,5E_h + 1,0E_v$ $E_v = 0,15N_{static}$					
1	189,9	-31,2	90,9	99,0	$1,075DL + 1,075LL \pm 1,0E$	131,8	28,2	112,6	35,7	-31,8
2	189,9	-31,2	90,9	99,0	$0,925DL + 0,925LL \pm 1,0E$	113,4	28,2	112,6	16,8	-31,8
3	189,9	-31,2	90,9	99,0	$1,15DL + 1,15LL \pm 0,5E$	141,0	14,1	56,3	45,2	-65,9
4	189,9	-31,2	90,9	99,0	$0,85DL + 0,85LL \pm 0,5E$	104,2	14,1	56,3	7,3	-65,9

Таблица 10 – Сравнение сейсмических сил и внутренних силовых факторов для простенка школы Y_{1-1} Table 11 – Final calculations of base shear, story shear, and forces acting on selected masonry panel Y_{1-1} for the school

Страна Country	V_{base}	%	F_1	Критическая комбинация Critical load combinations	N	Q	M	$\%_N$	$\%_M$
Непал Nepal	271,9	Реф,	271,9	$1,0DL \pm 1,0E$	172,4	56,6	166,8	Реф. Ref.	Реф. Ref.
РФ Russia				$0,9DL + 1,0E \pm 1,0(0,15N_{static})$					
1	162,8	-40,1	162,8	$1,05DL \pm 1,0EL$	184,2	33,9	99,9	6,8	-40,1
2	162,8	-40,1	162,8	$0,75DL \pm 1,0EL$	131,6	33,9	99,9	-23,7	-40,1
РТ Tajikistan				(1) $1,0E_h + 0,5E_v$; (2) $0,5E_h + 1,0E_v$ $E_v = 0,15N_{static}$					
1	187,8	-30,9	187,8	$1,075DL \pm 1,0E$	188,6	39,1	115,2	6,2	-30,9
2	187,8	-30,9	187,8	$0,925DL \pm 1,0E$	162,3	39,1	115,2	-5,8	-30,9
3	187,8	-30,9	187,8	$1,15DL \pm 0,5E$	201,8	19,5	57,6	17,1	-65,5
4	187,8	-30,9	187,8	$0,85DL \pm 0,5E$	149,1	19,5	57,6	-13,5	-65,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для зданий школы и дома, построенных из неармированной кладки из природного камня в Непале, представлены расчеты полной сейсмической силы в основании сооружения, показано распределение внутренних силовых факторов и определены расчетные комбинации нагрузок для проверки по первому предельному состоянию с применением нормативных документов ФДР Непал, РФ и РТ. Получены следующие результаты:

– Объекты исследования, которые характеризуются тяжелыми жесткими стенами и легкими гибкими перекрытиями ведут себя отлично от обычных сооружений. Основное отличие заключается в том, что почти вся масса здания сосредоточена в стенах (соотношение стены/перекрытие – 97,5 и 2,5%), в результате чего сейсмические силы в уровне перекрытия распределяются между стенами пропорционально их массам.

– В нормах РФ и РТ не указывается, какую долю статической массы следует преобразовывать в сейсмическую при построении расчетной динамической модели, в связи с чем в настоящем исследовании предложено понятие «коэффициента преобразования», а также определения метода двойного (МДП) и единичного (МЕП) приложения коэффициентов сочетаний. Для РФ применяется МДП с использованием коэффициентов сочетаний (0,9 – постоянная (DL) и 0,5 – временная кратковременная (LL) нагрузки). Для РТ применяется МЕП с использованием коэффициентов 0,9 (DL) и 0,8 (LL).

– Согласно традиционному подходу, принятому в нормах, сейсмическая масса концентрируется в уровнях перекрытия, отбрасывая половину первого (цокольного этажа), это означает что более 25% общей массы дома и около 50% школы не учитывается при определении сейсмических сил. Это может привести к некоторому занижению общей сейсмической силы в основании сооружения.

– С другой стороны, некоторое завышение сейсмической силы происходит при использовании метода эквивалентной поперечной силы (EFL) и приблизительном определении собственного периода колебаний (T_1).

– EFL -метод не применяется в нормах РФ и РТ, однако для простых зданий ($H \leq 5$ этажей и $T_1 < 0,4$) может использоваться упрощенный спектральный метод (S -modal) с использованием только первой формы колебаний, который дает более низкие значения сейсмической силы в основании сооружения благодаря исключению части модальной массы (в расчете участвует около 90% модальной массы).

– Таблицы 8А–8Г показывают, что нормы Непала гораздо более консервативны, чем нормы РФ и РТ для обоих исследуемых зданий. В свою очередь, нормы РФ на 9% более консервативны для дома, а нормы РТ, с другой стороны, на 15% более консервативны для школы.

– Значения сейсмической силы в основании сооружения по нормам РФ для дома оказались ниже референтных непальских на 25,8%. Значения силы по нормам РТ также ниже референтных на 31,2%.

– Значения сейсмической силы в основании сооружения по нормам РФ для школы также оказались ниже референтных непальских на 40,1%. Значения силы по нормам РТ также ниже референтных на 30,9%.

– В расчетных комбинациях нагрузок также учитывалась вертикальная составляющая сейсмической нагрузки, действующая в обоих направлениях, равная 15% соответствующей вертикальной статической нагрузки. Отмечена возможность разночтения определения «статическая нагрузка»: 1 – нагрузка, которая непосредственно используется в особом сочетании нагрузок ($0,9DL + 0,5LL$ для РФ и $0,9DL + 0,8LL$ для РТ) и 2 – полная статическая нагрузка без учета коэффициентов преобразований и сочетаний ($1,0DL + 1,0LL$). В настоящем исследовании рассматривается второй вариант с использованием полной статической нагрузки.

– При сравнении трех стран отмечаются большие отклонения между расчетными значениями продольных и поперечных сил, и изгибающих моментов. При анализе каждой страны в отдельности также отмечаются большие отклонения между минимальными и максимальными значениями для каждого набора комбинаций нагрузок. Однако наиболее критическая комбинация нагрузок может быть определена только во время проверки несущей способности.

Подводя итог, можно сказать, что системы «тяжелая кладка – легкое перекрытие» с ведут себя при сейсмическом воздействии иначе, чем большинство других несущих систем, например, каркасные здания с тяжелыми перекрытиями. Учитывая наблюдения, приведенные в данной статье, применимость обычных методов *ELF* и *S-Modal* для зданий с тяжелой кладкой вызывает некоторые сомнения. Расчетные предпосылки, представленные в работе, такие как исключение значительной части сейсмического веса и игнорирование кладки цоколя, должны быть тщательно оценены, а конкретные параметры для номинально армированной каменной кладки на цементном растворе, такие как коэффициент поведения, коэффициент демпфирования и собственный период колебаний, должны быть подтверждены. В дальнейшем необходимо проанализировать применимость различных расчетных методов, в частности, компьютерное моделирование, включая более тщательный анализ влияния горизонтального (и вертикального) армирования. После чего необходимо провести расчеты прочности кладки с учетом фактических свойств материалов.

Однако отмеченные в статье возможные разночтения и толкования отдельных положений нормативных документов РФ и РТ требуют совместной работы научного и инженерного сообществ над улучшением и расширением нормативной базы. В качестве рекомендации авторы предлагают использование различной терминологии для коэффициента преобразования и коэффициента сочетаний.

Очевидно, что важнейшей задачей является наличие четких определений и однозначное трактование положений норм. По этим причинам в рамках исследовательской инициативы *SMARTnet*, авторы приглашают экспертов, инженеров и ученых, поделиться своим мнением и опытом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arya A.S. Non-engineered construction in developing countries – An approach toward earthquake risk reduction. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2000, Vol. 33 (3), pp. 187–208. DOI: 10.5459/bnzsee.33.3.187-208.
2. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Base Shear Seismic Demand Comparison for Selected Countries Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2021. DOI: 10.3389/fbuil.2021.647815.

3. Schildkamp M., Araki Y. Cost Analysis of Mountain Schools in Nepal: Comparison of Earthquake Resistant Features in Rubble Stone Masonry vs. Concrete Block Masonry. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00055.
4. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Design Specifications in Seismic and Masonry Codes Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2020.590520.
5. Schildkamp M., Araki Y. School Buildings in Rubble Stone Masonry with Cement Mortar in Seismic Areas: Literature Review of Seismic Codes, Technical Norms and Practical Manuals. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00013.
6. Абаев З.К., Кодзаев М.Ю., Валиев А. Д. Оценка дефицита сейсмостойкости кирпичной дымовой трубы в соответствии с актуальными нормами проектирования // *Строительство и техногенная безопасность*. 2020. № 19 (71). С. 13–25. DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-13–25.
7. Официальный сайт Министерства культуры Российской Федерации. Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/>. Дата обращения: 24.11.2022.
8. Гольдштейн А.Ф. Средневековое зодчество Чечено-Ингушетии и Северной Осетии. Изд-во «Наука»; 1975. 157 с.
9. Гольдштейн А.Ф. Башни в горах. М.: Советский художник; 1977. 335 с.
10. Сумиленко С.Д. Башни Северного Кавказа. Владикавказ: Проект-Пресс; 1997. 150 с.
11. A Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide. In: Response Control and Seismic Isolation of Buildings. Routledge; 2006, pp. 47–74.
12. Sergio Hampshire De C Santos, Zanaica L., Bucur C., Silvio S Lima.. Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*. 2013, Vol. 9, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.2478/mmce-2013-0001.
13. Dhanvijay V., Telang D., Nair V. Comparative Study of Different Codes in Seismic Assessment. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015, Vol. 6, no. 2, pp. 1371–1381.
14. Ali M.U., Khan S.A., Anwar M.Y. Application of BCP-2007 and UBC-97 in seismic vulnerability assessment of gravity designed RC buildings in Pakistan. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017, pp. 396–405.
15. Zeynalov L., Polukhov I., Gölalms M. Comparison of Azerbaijan and other seismic codes. *ERES 2013*, Vol. 132, pp. 205–217. DOI: 10.2495/ERES130171.
16. Massumi A., Imashi N., Massumi A. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Iranian Seismic Code (Standard No. 2800) and International Building Code 2003 [Internet] *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2011, Vol. 12 URL: <https://www.researchgate.net/publication/232703221>.
17. Neupane P., Shrestha S. Comparative Analysis of Seismic Codes of Nepal and India for RC Buildings. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. Vol. 28 (2), 2015, pp. 102–105. DOI:10.14445/22315381/IJETT-V28P220.
18. Tamrakar A., Chen S. Comparison of the Seismic Design Code for Buildings of Nepal with the Chinese, European and American Seismic Design Codes. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321133131>.
19. Chock G. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures [Internet]. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296706982>.
20. Xiaoguang C, Jingshan B, You-wei S, Jianyi Z, Yudong Z. Comparison of Seismic Fortification Criterion of Eight Asian Countries. 2012.
21. Khose V.N., Singh Y., Lang D. A Comparative Study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected Seismic Design Codes. *Earthquake Spectra*. 2012, Vol. 28, no. 3, pp. 1047–1070.
22. Shi G., Hu F., Shi Y. Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016, Vol. 127, pp. 41–53.

23. Vasconcelos G., Lourenço P.B. In-Plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009, pp. 1269–1277.
24. Haziq D., Kiyotaka M. Afghanistan Building Codes (ABC): Focused on Comparative Analysis and the Viability of Enforcement. In: AEI 2017. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017, pp. 138–49.
25. Babarmahal K. Nepal Housing Reconstruction Programme. Aswin. 2015.
26. Nakamura Y., Derakhshan H., Magenes G., Griffith M.C. Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2017, pp. 935–960.
27. Code of Practice for Design Loads (other than Earthquake) for Buildings and Structures, Part 1 Dead Loads – Unit Weights of Building Materials and Stored Materials (Second Revision), 9th Reprint 2010 (Including Amendment No.1), Reaffirmed 2018. New Delhi: Bureau of Indian Standards. 2018.
28. МСН 20-02-2013 Нагрузки и воздействия. МНТКС, 2013. 33 с.
29. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. М., 2016. 95 с.
30. Строительные нормы и правила Республики Таджикистан СНиП РТ 22-07-2018 «Сейсмостойкое строительство» / Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан. Душанбе: ГУП «НИИСА» Издательский центр», 2019. 48 с.
31. ЦНИИПромзданий. Пособие по проектированию каркасных промзданий для строительства в сейсмических районах (к СНиП II-7-81). М.: Стройиздат. 1985. 292 с.
32. Николаев И.И. Проектирование железобетонных конструкций зданий для строительства в сейсмических районах. Ташкент: Укитувчи. 1990. 232 с.
33. Форум «DWG». URL: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=95403>. Дата обращения: 24.11.2022.
34. Официальный сайт ООО «Лира сервис». URL: <https://rflira.ru/kb/107/656/>. Дата обращения: 24.11.2022.
35. EN 1991-1-3 (2003) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC. 2018.
36. Fardis M., Carvalho E., Elnashai A., Faccioli E., Pinto P., Plumier A., et al. Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures [Internet]. Designers' Guide to Eurocodes. Thomas Telford Publishing; 2005. 1. Available from: <https://doi.org/10.1680/dgte8.33481>.
37. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание. М.: Издательство АСВ. 2010. 384 с.
38. Villaverde R. Fundamental Concepts of Earthquake Engineering. CRC Press. 2009. 960 p.
39. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M. J. Displacement Based Seismic Design of Structures. 721 p.
40. Charleson A. Seismic Design for Architects. Routledge. 2008. 296 p.
41. Браштейн М.Ф., Бородачев Н.М., Блюмин Л.Х. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Б.Г. Корнев, editor. М.: Стройиздат. 1981. 215 с.
42. Elmenshawi A., Sorour M., Mufti A., Jaeger L.G., Shrive N. Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry. *Engineering Structures*. 2010, pp. 3269–3278.
43. Tomažević M., Lutman M. Heritage Masonry Buildings in Urban Settlements and the Requirements of Eurocodes: Experience of Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*. 2007, pp. 108–130.
44. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах». М., 2018.
45. NBC 202:2015. Guidelines on: load bearing masonry. Kathmandu: Department of Urban Development and Building Construction. 2015.

REFERENCES

1. Arya A. S. Non-engineered construction in developing countries - An approach toward earthquake risk reduction. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2000, Vol 33 (3), pp. 187–208. DOI: 10.5459/bnzsee.33.3.187-208.

2. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Base Shear Seismic Demand Comparison for Selected Countries Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2021. DOI: 10.3389/fbuil.2021.647815.
3. Schildkamp M., Araki Y. Cost Analysis of Mountain Schools in Nepal: Comparison of Earthquake Resistant Features in Rubble Stone Masonry vs. Concrete Block Masonry. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00055.
4. Schildkamp M., Silvestri S., Araki Y. Rubble Stone Masonry Buildings with Cement Mortar: Design Specifications in Seismic and Masonry Codes Worldwide. *Frontiers in Built Environment*. 2020. DOI: 10.3389/fbuil.2020.590520.
5. Schildkamp M., Araki Y. School Buildings in Rubble Stone Masonry with Cement Mortar in Seismic Areas: Literature Review of Seismic Codes, Technical Norms and Practical Manuals. *Frontiers in Built Environment*. 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00013.
6. Abaev Z., Kodzaev M., Valiev A. Assessment of the Seismic Resistance Deficit of Brick Masonry Chimney According to Relevant Design Codes. *Construction and industrial safety*. 2020, no 19 (71), pp. 13–25. DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-13-25 (In Russian).
7. Ministry of Culture of the Russian Federation. State Register of Cultural Heritage Objects (Monuments of History and Culture) of the Peoples of the Russian Federation [Internet]. Available from: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn/>. (Accessed: 24.11.2022).
8. Gol'dshteyn A.F. Medieval architecture in Checheno-Ingush and North Ossetia Republics. Publishing house Science. 1975. 157 p. (In Russian). (In Russian).
9. Gol'dshteyn A.F. Towers in the mountains. Soviet artist. 1977. 335 p. (In Russian).
10. Sumilenko S. D. North Caucasian Towers. Project-Press. 1997. 150 p. (In Russian).
11. Feng D. A Comparative Study of Seismic Isolation Codes Worldwide. In: *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. Routledge; 2006, pp. 47–74.
12. Sergio Hampshire De C Santos, Zanaica L., Bucur C., Silvio S Lima. Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*. 2013, Vol. 9, no. 1-2013, pp. 1–12. DOI: 10.2478/mmce-2013-0001
13. Dhanvijay V., Telang D., Nair V. Comparative Study of Different Codes in Seismic Assessment. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015, Vol. 6, no, 2, pp. 1371–1381.
14. Ali M.U., Khan S.A., Anwar M.Y. Application of BCP-2007 and UBC-97 in seismic vulnerability assessment of gravity designed RC buildings in Pakistan. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017, pp. 396–405.
15. Zeynalov L., Polukhov I., Gölalms M. Comparison of Azerbaijan and other seismic codes. *ERES 2013*. 2013, Vol. 132, pp. 205–217. DOI: 10.2495/ERES130171.
16. Massumi A., Imashi N., Massumi A. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Iranian Seismic Code (Standard No. 2800) and International Building Code 2003 [Internet]. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2011, Vol. 12. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/232703221>.
17. Neupane P., Shrestha S. Comparative Analysis of Seismic Codes of Nepal and India for RC Buildings. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2015, Vol. 28 (2), pp. 102–105. DOI:10.14445/22315381/IJETT-V28P220.
18. Tamrakar A., Chen S. Comparison of the Seismic Design Code for Buildings of Nepal with the Chinese, European and American Seismic Design Codes. *The Thirtieth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering*. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321133131>
19. Chock G. Comparison of the USA, China and Japan Seismic Design Procedures [Internet]. *Civil Engineering Conference in the Asia Region CECAR 7*. 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296706982>.
20. Xiaoguang C., Jingshan B., You-wei S., Jianyi Z., Yudong Z. Comparison of Seismic Fortification Criterion of Eight Asian Countries. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. 2012.

21. Khose V., Singh Y., Lang D. A Comparative Study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected Seismic Design Codes. *Earthquake Spectra*. 2012, Vol. 28, no 3, pp. 1047–1070.
22. Shi G., Hu F., Shi Y. Comparison of seismic design for steel moment frames in Europe, the United States, Japan and China. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016, Vol. 127, pp. 41–53.
23. Vasconcelos G., Lourenço P.B. In-Plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009, pp. 1269–1277.
24. Haziq D., Kiyotaka M. Afghanistan Building Codes (ABC): Focused on Comparative Analysis and the Viability of Enforcement. *AEI 2017*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2017, pp. 138–149.
25. Babarmahal K. Nepal Housing Reconstruction Programme. Aswin. 2015.
26. Nakamura Y., Derakhshan H., Magenes G., Griffith M.C. Influence of Diaphragm Flexibility on Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2017, pp. 935–960.
27. Code of Practice for Design Loads (other than Earthquake) for Buildings and Structures, Part 1 Dead Loads – Unit Weights of Building Materials and Stored Materials (Second Revision), 9th Reprint 2010 (Including Amendment No.1), Reaffirmed 2018. New Delhi: Bureau of Indian Standards. 2018.
28. MSN 20-02-2013 Loads and impacts. MNTSK, 2013. 33 p. (In Russian).
29. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. M., 2016. 95 p. (In Russian).
30. SNiP RT 22-07-2018 / Committee for Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan. GUP «NIISA» Izdatel'skij centr». Dushanbe. 2019. 48 p.
31. CSRIIB. Manual for the design of frame industrial buildings for construction in seismic areas (to SNiP II-7-81). M.: Stroyizdat. 1985. 292 p. (In Russian).
32. Nikolaev I.I. Design of RC structures for seismic areas. Tashkent, Ukituvchi. 1990. 232 p. (In Russian).
33. Forum «DWG» [Internet]. Available from: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=95403>. (Accessed: 24.11.2022).
34. Lira service. Structural analysis software. Available from: <https://rflira.ru/kb/107/656/>. (Accessed: 24.11.2022).
35. EN 1991-1-3 (2003) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC. 2018.
36. Fardis M., Carvalho E., Elnashai A., Faccioli E., Pinto P., Plumier A., et al. Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures [Internet]. *Designers' Guide to Eurocodes*. Thomas Telford Publishing. 2005. 1. Available from: <https://doi.org/10.1680/dgte8.33481>.
37. Raiser V.D. Structural reliability theory. M.: Izdatel'stvo ACB. 2010. 384 p. (In Russian).
38. Villaverde R. Fundamental Concepts of Earthquake Engineering. CRC Press. 2009, 960 p.
39. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. Displacement Based Seismic Design of Structures. IUSS Press. 721 p.
40. Charleson A. Seismic Design for Architects. Routledge. 2008. 296 p.
41. Brashtein M.F., Borodachev N.M., Bluemin L.H. Dynamic analysis of structures for special efforts. M.: Stroyizdat. 1981. 215 p. (In Russian).
42. Elmenshawi A, Sorour M, Mufti A, Jaeger LG, Shrive N. Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry. *Engineering Structures*. 2010, pp. 3269–3278.
43. Tomažević M., Lutman M. Heritage Masonry Buildings in Urban Settlements and the Requirements of Eurocodes: Experience of Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*. 2007, pp. 108–130.
44. SP 14.13330.2018 «SNiP II-7-81* Earthquake construction». M., 2018. (In Russian).
45. NBC 202:2015. Guidelines on: load bearing masonry. Kathmandu: Department of Urban Development and Building Construction. 2015.

Сведения об авторах/ Information about the authors

Заурбек Камболатович Абаев, к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический

университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Zaurbek K. Abaev, Ph.D, Associate Professor, Department of Civil Engineering; North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU); 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Мартин Шилдкамп, Ph.D., директор, некоммерческая организация «*Smart Shelter Foundation*» (SSF), 2403 VT, Нидерланды, г. Алфен ан де Рейн, Distelstraat 5; Scopus ID: 57207859724; smartshelterresearch@gmail.com.

Martijn Schildkamp, Ph.D.; director, non-profit organization «Smart Shelter Foundation» (SSF); Scopus ID: 57207859724; smartshelterresearch@gmail.com.

Азамат Джониевич Валиев, аспирант; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com.

Azamat Valiev, Ph.D student; Department of Civil Engineering; North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU); 2403 VT, The Netherlands, Alphen aan den Rijn, Distelstraat 5; 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com

Вклад авторов:

Шилдкамп М. – основная идея, сбор и обработка материала, проведение расчетов, координация исследования, верификация результатов, подготовка структуры статьи и научное редактирование текста.

Абаев З.К. – разработка предложений по работе с нормами РФ и РТ, проведение расчетов, верификация результатов, научное редактирование текста статьи.

Валиев А.Д. – проведение расчетов, подготовка текста статьи.

Автор, ответственный за переписку: Валиев Азамат Джониевич, azamat99valiev@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Schildkamp M. – main idea, collection and processing of material, calculations, coordination of the research, verification of results, preparation of the structure of the article and scientific editing of the text.

Abaev Z. K. – development of proposals for work with the norms of the Russian Federation and Tajikistan, calculations, verification of results, scientific editing of the text of the article.

Valiev A. D. – calculations, preparing the text of the article.

Corresponding author: Azamat Valiev, azamat99valiev@gmail.com

The authors declare the absence of a conflict of interest.