

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I»

На правах рукописи

Альдреби Зиад Ахмад

**ПОВЫШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ АРХИТЕКТУРНЫХ
ПАМЯТНИКОВ СИРИИ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В
РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ**

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Белаш Т.А.

Санкт–Петербург – 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА.....	13
1.1. Анализ сейсмологической обстановки на территории Сирии.	13
1.2. Обзор и анализ памятников архитектуры в Сирии	17
1.3. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий.....	28
1.4. Выводы по главе. Цель и задачи исследования	43
ГЛАВА 2. УТОЧНЕНИЕ И ДОПОЛНЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ТЕРРИТОРИИ СИРИИ И ПАСПОРТИЗАЦИЯ ВЫБРАННЫХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТОВОГО ЗНАЧЕНИЯ.....	45
2.1. Современная оценка сейсмичности территории Сирии	45
2.2. Способы определения характеристик конструкций зданий и сооружений ...	51
2.3. Паспортизация выбранных объектов исследования	53
2.4. Выводы по главе.....	71
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ В Г. АЛЕППО С УЧЕТОМ УСТАНОВЛЕНИЯ КЛАССА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ	74
3.1. Выбор объекта исследования.....	74
3.2. Разработка методики расчета.....	75
3.3. Расчет рисков и оценка ущерба при землетрясениях 7,8,9 балльных воздействиях	84
3.4. Расчет требуемого класса сейсмостойкости для здания мечети.....	87
3.5 Выводы по главе.....	90
ГЛАВА 4. РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ В Г. АЛЕППО ДО, ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ И ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ.....	92
4.1 Исследование сейсмостойкости здания Великой мечети г. Алеппо до и после разрушения.....	92
4.2. Анализ результатов расчётно-теоретической оценки сейсмостойкости здания Великой мечети г. Алеппо до и после разрушения с учётом установленного класса сейсмостойкости	100

4.3.Существующие методы повышения сейсмостойкости зданий	113
4.3.1. Традиционные способы сейсмоусиления.....	114
4.3.2. Нетрадиционные способы сейсмоусиления.....	126
4.4. Предлагаемые решения для сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества с использованием традиционных методов	131
4.5 Проверка эффективности принятых решений с использованием традиционных методов сейсмоусиления после восстановления с учетом класса сейсмостойкости.....	138
4.6. Выводы по главе.....	152
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ СЕЙСМОЗАЩИТЫ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ Г. АЛЕППО	153
5.1. Предлагаемое сейсмоусиление культового здания мусульманского зодчества с использованием нетрадиционных методов в виде сейсмоизоляции	153
5.1.1. Проектные проработки установки сейсмоизоляции	156
5.1.2.Технология установки сейсмоизолирующих резинометаллических опор	160
5.2. Проверка эффективности принятых решений с использованием нетрадиционных методов сейсмоусиления в виде сейсмоизоляции с учетом установленного класса сейсмостойкости	164
5.3. Выводы по главе.....	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
Список опубликованных автором работ по теме диссертации	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ А	189
Акт о внедрении результатов диссертационной работы	189
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ В	195
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	200

ВВЕДЕНИЕ

Анализ сейсмической обстановки на территории Сирии свидетельствует о высокой сейсмической активности этой территории, что может сильно влиять на состояние и сохранность архитектурных памятников. Анализ и обзор последствий землетрясений и военных действий, которые начались в 2011 г., которым подвергалась эта территория, показывают, что они оказали существенное влияние на состояние архитектурных памятников на территории Сирии, и вызывают тревогу за судьбу этих шедевров архитектуры, многие из которых находятся под охраной ЮНЕСКО.

Сложились различные определённые подходы к сейсмоусилению или восстановлению зданий и сооружений, в том числе памятников архитектуры, к которым относятся традиционные и нетрадиционные (специальные) подходы. Мировой опыт показывает, что можно использовать любой из этих подходов при условии, что использование любого из них сохраняет аутентичность этих архитектурных памятников.

Анализ структуры зданий и сооружений в Сирии, расположенных на территориях с повышенной сейсмической опасностью, по основным типам несущих строительных конструкций показывает, что 80% от общего числа существующих зданий – это здания из каменной кладки. Здания, несущие стены которых выполнены из каменной кладки, относятся к группе жестких зданий. Во время землетрясений они получают очень высокую степень повреждений. Такие факторы, как изменение нагрузки на конструкции в период эксплуатации сооружения, нарушение монолитности кладки на отдельных участках стен, слабое сцепление раствора с кладкой, оказывают существенное влияние на сейсмостойкость зданий. Именно каменная кладка явилась основой для создания архитектурных памятников на территории Сирии, среди которых наиболее значимую группу представляют здания мусульманского зодчества.

Отличительной особенностью этих зданий является многочисленная посещаемость верующими, например, до 25000 человек, что приводит к

необходимости более ответственного и тщательного подхода к повышению их сейсмостойкости.

Во **введении** приведена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, указана информация об апробации результатов работы, обоснована научная новизна и теоретическая и практическая её значимость.

В **первой главе** выполнена оценка сейсмической обстановки на территории Сирии на протяжении длительного периода времени начиная с 2500 года до нашей эры по настоящее время. Выполнен обзор архитектуры памятников различных периодов. Дана оценка состояния объектов арабского зодчества после сильных землетрясений, и военных действий, которые происходили на территории Сирии в последнее десятилетие.

Во **второй главе** выполнено уточнение информации о сейсмичности территории Сирии для обоснования сейсмостойкости существующих культовых зданий мусульманского зодчества, так как существующая ранее информация является разрозненной, неполной и не позволяет полноценно произвести необходимые исследования и расчеты памятников архитектуры Сирии на их сейсмостойкость. Выполнена паспортизация некоторых наиболее значимых культовых зданий мусульманского зодчества.

В **третьей главе** разработана методика расчета необходимого сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества, основанная на реальной оценке класса их сейсмостойкости с учётом экономических и социальных рисков. Эта методика была реализована применительно к Великой мечети в г. Алеппо в Сирии

В **четвертой главе** представлены результаты расчётно-теоретического анализа сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества на примере Великой мечети в г.Алеппо до и после военных действий и предложен комплекс конструктивных мероприятий по повышению их сейсмостойкости с учётом методологических рекомендаций, разработанных в главе 3. Выполнена проверка их сейсмостойкости после предлагаемого усиления.

В пятой главе представлены результаты расчетно-теоретического исследования сейсмостойкости культового здания мусульманского зодчества по его усилению нетрадиционным методом, в качестве которого предлагается применить устройство сейсмоизоляции, в виде гибких податливых опорных элементов, эффективность которых может быть весьма существенна, т.к. сейсмологическая ситуация территории на которой находятся рассматриваемые здания отличается большим разнообразием, близостью тектонических разломов, внезапностью возникновения землетрясений различной интенсивности и т.п., а также сложностью объёмно-планировочных и конструктивных решений культовых зданий мусульманского зодчества.

В заключении изложены основные выводы по результатам исследования и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

Актуальность темы диссертации

Территория Сирии проходит рядом с Северо-Анатолийским и Левантским разломами, являющимися причинами многих разрушительных землетрясений в этом районе, которые приводят к гибели тысяч людей и громадному материальному ущербу. При этом находящиеся в этом регионе архитектурные памятники, имеющие всемирное значение, могут безвозвратно и навсегда исчезнуть. Ситуация усугубляется в связи с начавшимися в 2011 г. военными действиями, дополняющими разрушительные природные воздействия. Поэтому изучаемые в диссертации вопросы обеспечения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии с учетом повреждений, полученных в результате военных действий, приобретают весьма актуальное значение.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам сейсмостойкого строительства посвящена обширная литература, представленная в трудах таких известных ученых как Айзенберга Я.М., Быховского В.А., Гольденבלата И.И., Жунусова Т.М., Завриева К.С., Кабанцева О.В., Карапетяна Б.К., Карцевадзе Г.Н., Корчинского И.Л., Махатадзе Л.Н., Медведеева С.В., Назарова А.Г., Напетравидзе Ш.Г., Николаенко Н.А., Тонких

Г.П., Рассказовского С.В., Сеницына А.П., Уздина А.М., Чураяна А.Л. а также зарубежных специалистов Борджерса Дж., Джекобсена Л., Ньюмарка Н. и других

Большой круг исследований по методологии восстановления каменных зданий представлены в работах Айзенберга Я.М., Корчинского И.Л., Мартемьянова А.И. и других.

Вопросами сейсмоусиления строительных конструкций памятников архитектуры, построенных из каменной кладки, занимались Алексеенко В.Н., Жиленко О.Б., Мелкумян М.Г., Напетваридзе Т.Ш., Шадмонова З.С. и другие.

В известных исследованиях основное внимание уделено конструктивным решениям повышения сейсмостойкости зданий и сооружений после прошедших землетрясений или, при изменении сейсмичности площадки строительства в сторону ее увеличения. При этом вопросами о значении и учёте класса сейсмостойкости зданий и сооружений в известных исследованиях изучены недостаточно, во многих случаях без оценки важной роли социальных и экономических рисков, вызванных ущербами после сильных землетрясений. Необходимость изучения влияния этих факторов имеет особое значение для культовых зданий мусульманского зодчества, выполненных из каменных конструкций и сосредоточенных на всей территории Сирии.

Эти объекты как было сказано выше посещаются значительным количеством верующих людей. В настоящее время многие из этих зданий имеют серьёзные повреждения, вызванные не только последствиями землетрясений, но и военными действиями. В случае возникновения повторных сейсмических воздействий, может возникнуть ситуация полного разрушения памятников архитектуры мусульманского зодчества с гибелью находящихся в них людей.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

Целью исследования является обоснование целесообразности повышения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества на территории Сирии с учётом их повреждений,

полученных в ходе военных действий, а также разработка рекомендаций по усилению поврежденных зданий.

Задачи исследования:

1. Анализ состояния архитектурных памятников на территории Сирии с учетом сейсмической активности и боевых действий.
2. Реальная оценка сейсмичности сейсмоопасных регионов на территории Сирии.
3. Выявление характерных повреждений строительных конструкций архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества и обобщение информации по их техническому состоянию.
4. Разработка методики сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества с учётом установления требуемого класса их сейсмостойкости.
5. Выполнить расчетно-теоретические исследования сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества до и после повреждений, полученных в ходе военных действий с использованием численных методов моделирования.
6. Разработка рекомендаций по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества с полученными в ходе военных действий повреждениями.

Объектом исследования являются архитектурные памятники Сирии, рассмотренные на примере культовых зданий мусульманского зодчества.

Предметом исследования является оценка сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества на территории Сирии с учётом повреждений, полученных в ходе военных действий.

Научная новизна диссертационной работы заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Получены новые уточняющие сведения по сейсмичности территории Сирии для обоснования сейсмостойкости существующих культовых зданий мусульманского зодчества.

2. Предложена методика сейсмоусиления памятников архитектуры Сирии на примере зданий мусульманского зодчества, получивших повреждения в ходе военных действий основанная на реальной оценке класса их сейсмостойкости с учётом экономических и социальных рисков.
3. С помощью численного моделирования выполнен расчетно-теоретический анализ сейсмостойкости зданий мусульманского зодчества до и после повреждений в ходе военных действий на примере культового здания Великой мечети в г. Алеппо при сейсмических воздействиях различного частотного состава и интенсивности.
4. Установлено, что культовые здания мусульманского зодчества с полученными в ходе военных действий повреждениями, в случае возникновения сейсмических воздействий различного частотного состава и интенсивности 8-9 баллов, будут окончательно разрушены.
5. Предложены и исследованы различные технические решения по повышению сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества, получивших повреждения в ходе военных действий, обеспечивающие их прочность и устойчивость к сейсмическим воздействиям.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанной методологической основе сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества, устанавливающей необходимость определения класса сейсмостойкости с учётом социальных и экономических рисков.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в обосновании эффективных конструктивных мероприятий по сейсмоусилению культовых зданий мусульманского зодчества с учетом полученных повреждений различного характера. Рекомендации по сейсмоусилению, полученные в данной диссертации, могут быть использованы, в других памятниках арабского зодчества.

Методология и методы диссертационного исследования.

Основываются на применении известных теоретических подходов, базирующихся на принципах анализа и синтеза. Решение поставленных задач

достигалось путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов. При этом используются методы, строительной механики, а также теоретические данные, полученные российскими и зарубежными учеными в области изучения усиления каменных конструкций.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.2.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно п.5: «Разработка и совершенствование методов и систем качества строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации, усиления и восстановления»; а также п.8: «Методы и техника оценки и диагностики технического состояния, усиление и восстановление конструкций и элементов эксплуатируемых зданий и сооружений, прогрессивные формы обслуживания зданий, сооружений и систем их жизнеобеспечения».

Достоверность результатов

обеспечивается применением общепринятых и обоснованных методов и методик, сопоставлением результатов с данными, полученными другими авторами, а также использованием надежных и апробированных вычислительных программ.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчета и дополнения информации о сейсмичности территории Сирии при обосновании сейсмостойкости зданий мусульманского зодчества.
2. Методика сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества основанная на реальной оценке класса их сейсмостойкости с учётом экономических и социальных рисков, позволяющая обосновано проводить конструктивные мероприятия по повышению сейсмостойкости этих зданий.
3. Результаты расчетно-теоретического анализа сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества до и после повреждений, на примере Великой мечети в г. Алеппо, в случае сейсмических воздействий различного частотного состава и интенсивности. При этом установлено, что при сейсмических воздействиях различного частотного состава и интенсивности от

8-9 баллов оставшиеся конструктивные элементы здания могут быть полностью разрушены.

4. Рекомендации по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества получивших повреждения во время военных действий с использованием традиционных и нетрадиционных подходов.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные положения диссертации представлены в следующих докладах на научно-практических конференциях:

1. Научно-практическая-конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием (1-2 декабря 2016, г. Москва), АО «НИЦ «Строительство».
2. Теория и практика расчёта зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Международная научно-практическая конференция 21.06.2017 г., г. Москва, НИУ МГСУ.
3. Конференция «Проблемы достижения в области строительного инжиниринга» 17 апреля 2019г., г. Санкт-Петербург, ПГУПС Императора Александра I.
4. Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе – 2019» 18 апреля 2019 г., г. Санкт-Петербург, ПГУПС Императора Александра I.
5. XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1- 6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС (Российская Ассоциация по Сейсмостойкому Строительству и защите от природных и техногенных воздействий).
6. Научный семинар, посвященный 110-летию доктора технических наук, профессора Олега Александровича Савинова, г.Санкт-Петербург, 3-6 февраля 2020г.
7. Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con 2020» 5-8 октября 2020г., г. Владивосток, ФГАОУ ВО ДВФУ (Федеральное государственное

автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный Федеральный Университет»).

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы при разработке практических рекомендаций по проектированию и усилению существующих культовых зданий мусульманского зодчества. Имеется справка о внедрении.

Публикации. Основные положения диссертации, опубликованы в 16 научных статьях, из них 9 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Полный объем диссертационного исследования – 204 страницы, в том числе: 130 рисунков, 40 таблиц, библиографический список использованной литературы из 120 наименований, 4 приложения.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

1.1. Анализ сейсмологической обстановки на территории Сирии.

Существенный вклад в изучение сейсмологической обстановки, исторических и инструментальных землетрясений территории Сирии внесли Трифонов В. Г., Додонов А. [87], Дубянский А.И. [40], Сбейнати М. Р., Дараушех Р., Мути М. [119], Ахмад Р.А. [101-102] и др. Записи об исторических землетрясениях играли большую роль в изучении сейсмичности территории Сирии из-за позднего развития инструментальных сейсмометрических наблюдений на этой территории. С начала 20-го века инструментальные наблюдения землетрясений на территории Сирии осуществлялись станциями, расположенными в соседних странах, а начиная с 1995 года, развилась сеть сейсмических станций на всей территории страны, когда была основана Сирийская национальная сейсмологическая сеть (SNSN), центр которой располагается в городе Дамаск.

Территория Сирии находится в сейсмически активной зоне [40]. Большое влияние на тектоническую активность территории Сирии оказывает ее месторасположение. Сирия находится на Арабской плите, граничащей с Турецкой плитой на северо-востоке, а на западе – с Африканской плитой. Согласно сейсмологической информации, скорость движения этих плит составляет от 2 см до 5 см в год [94]. К существенному повышению сейсмичности региона приводит разница в скорости и направлении движений. Кроме того, сочетание двух пересекающихся крупнейших мировых зон разломов определяют тектонические движения на территории Сирии. Первый разлом - это Северо-Анатолийско-загросский; он пересекает территорию Турции с запада на восток и продолжается в направлении юго-востока через различные страны к Ирану. Второй разлом - это Левантский [94,100]; он начинается от залива Акабаа в красном море и тянется через Ливан, Сирию, на север, а на юге территории Турции изгибается в направлении к северо-востоку, продолжаясь до верхней части реки Куры.

Преимущественно в Левантском разломе кроется причина всех землетрясений в Сирии. Он разделяется на несколько других более мелких разломов, которые оказывают большое влияние на сейсмическую активность в регионе и обуславливают многочастотный состав возможных землетрясений [87,94,100].

Прошлые землетрясения на территории Сирии

В наше время сейсмическая активность территории Сирии снизилась, возникают только землетрясения с небольшими магнитудами (менее 5.5) [94]. В последние тридцать лет произошли самые сильные землетрясения на территории Сирии: 20 ноября 1994 года с магнитудой $M_w = 5.3$, 24 декабря 1996 года с магнитудой $M_w = 5.5$ и 29 марта 2006 года с магнитудой $M_w = 5.0$ на юго-западе Латакии, тип механизма этих землетрясений – сдвиг [57,94,100]. Следует помнить из истории землетрясений, что их магнитуды могут увеличиваться внезапно, тем более история Сирии богата такими случаями, что в свою очередь означает, что эта территория остается сейсмически опасной и активной.

Данные о прошлых землетрясениях Сирии с 2500 до н.э. по 1900 н.э. и с начала XX века с 1900 н.э. по 2010 г. н.э. перечислены в различных источниках [87, 94].

По данным о прошлых землетрясениях, на территории Сирии эпицентры землетрясений расположены в основном на западе территории и сконцентрированы вдоль Левантского разлома, пересекающего Сирию с юга на север, их магнитуды M_S варьируют от 5,7 до 7,8 (рисунок 1.1) [40, 87].

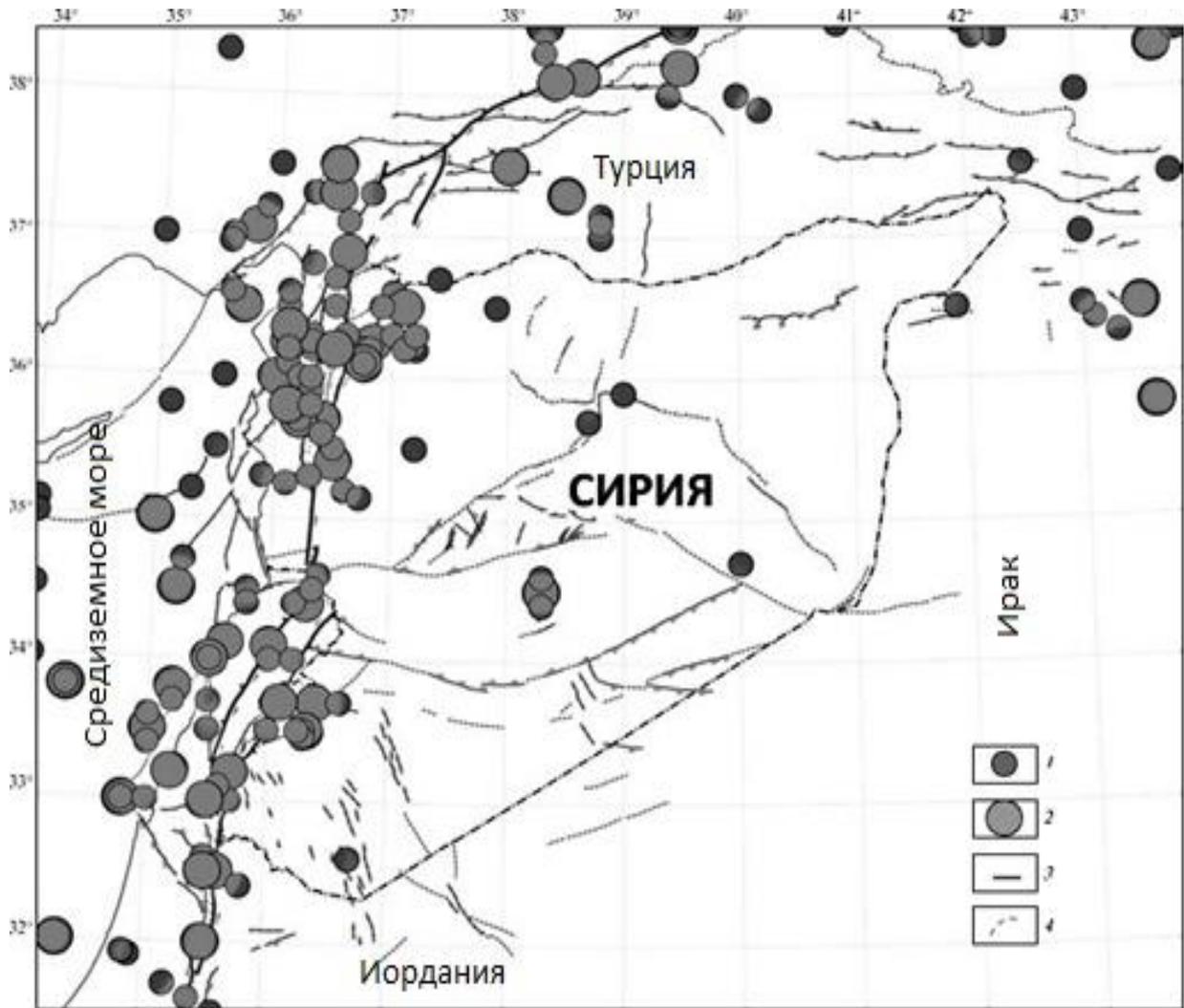


Рисунок 1.1 – Карта прошлых землетрясений до начала XX века на территории Сирии:

1 – эпицентры землетрясений с магнитудами $M_S = 5,7-6,9$; 2 – эпицентры землетрясений с магнитудами $M_S = 7,0-7,8$; 3 – активные и возможно активные разломы; 4 – предполагаемые продолжения разломов.

По данным о прошлых землетрясениях с начала XX века, а именно с 1900 н.э. по 2010 г. н.э., на территории Сирии эпицентры землетрясений расположены преимущественно на западе страны вдоль Левантского разлома, но их число существенно снизилось, а магнитуды M_S варьируют от менее 5,0 до 6,8 [9, 11, 87, 119] (рисунок 1.2).

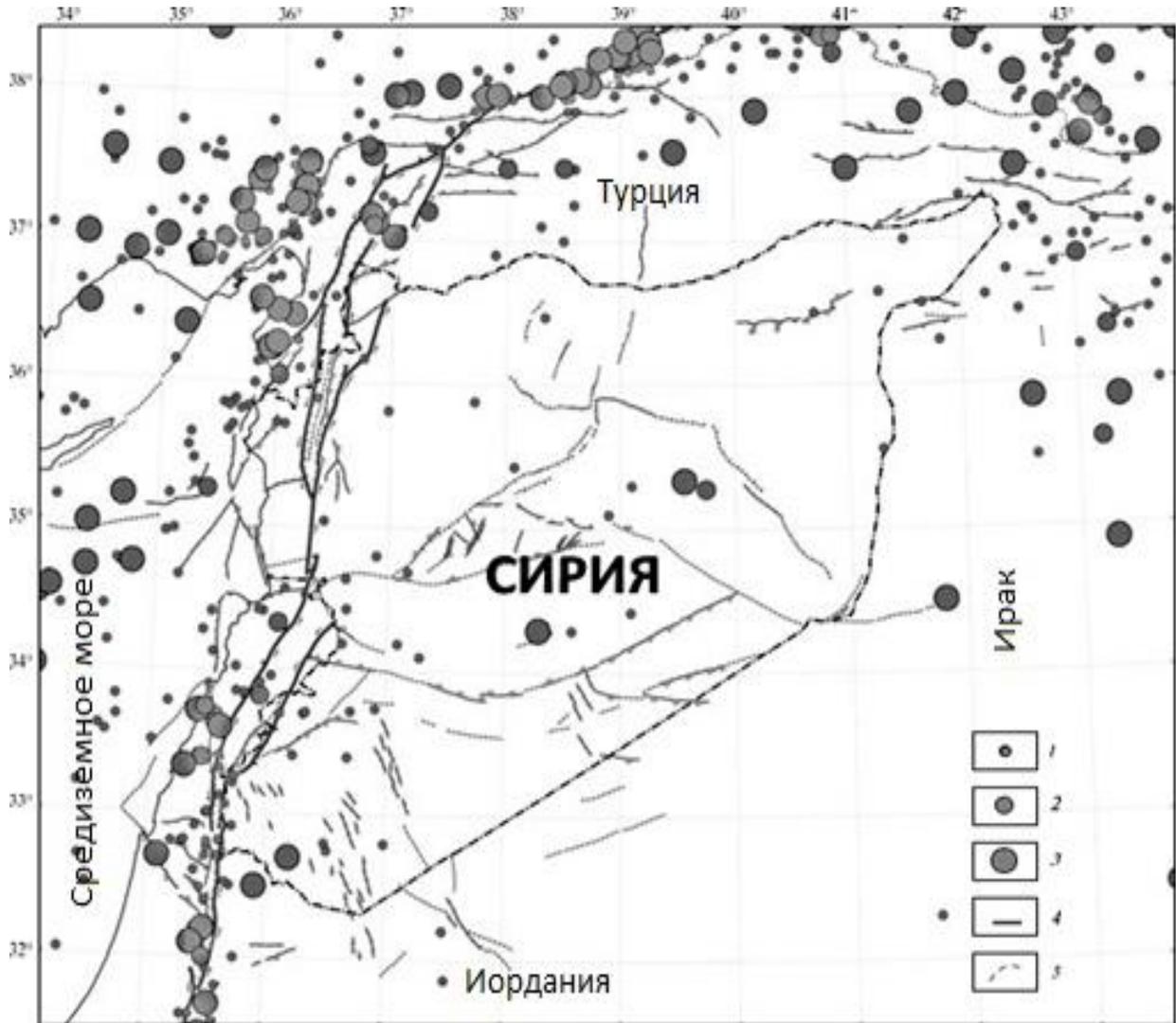


Рисунок 1.2 – Карта прошлых землетрясений с начала XX века на территории Сирии:

- 1 – эпицентры землетрясений с магнитудами $M_S < 5$; 2 – эпицентры землетрясений с магнитудами $M_S = 5,0 - 5,6$; 3 – эпицентры землетрясений с магнитудами $M_S = 5,7 - 6,8$;
- 4 – активные и возможно активные разломы; 5 – предполагаемые продолжения разломов.

Анализ данных о прошлых землетрясениях свидетельствует о том, что сейсмическая активность этой территории отличается различной интенсивностью и частотным составом. Всё это оказывает существенное влияние на выбор методов повышения сейсмостойкости объектов гражданского назначения.

1.2. Обзор и анализ памятников архитектуры в Сирии

Территория государства Сирии расположена в Западной Азии и примыкает к Средиземному морю с запада, к Ираку с востока, к Турции с севера и к Иордании с юга (рисунок 1.3), она была колыбелью для древних цивилизаций. Первые упоминания о пребывании на этой территории человека относят к периоду раннего палеолита. Первые раннерабовладельческие государства небольших размеров, такие как государства Мари, появились в III-II тыс. до н.э., из-за их удобного географического положения они становились лакомым объектом постоянных внешних нападений и захватов. С XVI-XV вв. до н.э. Сирия была завоевана различными завоевателями вплоть до VII века н.э. В 635 году столица Дамаск сдалась арабам и стала столицей для Омейядского Халифата, правление которого продлилось с 661 г. до 750 г., а с 1516 г. по 1918 г. Сирия была в течение 400 лет частью Османской империи. С 1920 по 1943 гг. страна находилась под Французской оккупацией. Только 17 апреля 1946 года она получила независимость [5, 16, 25, 29, 30-31, 53, 56, 99,103].

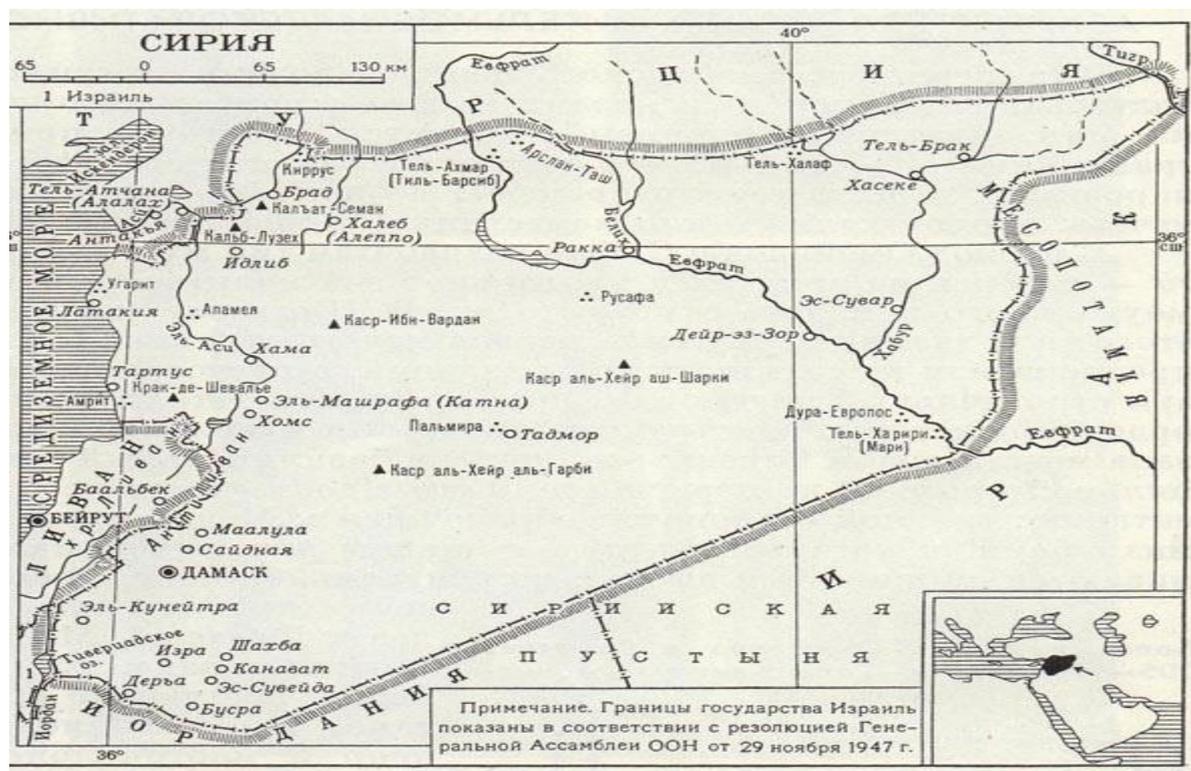


Рисунок 1.3—Карта Сирии.

Вышеуказанные события повлияли на разнообразность архитектуры на территории Сирии, так как смешение различных культур Запада и Востока, таких как эллинистической, римской, ранневизантийской, средневековой, мусульманской, османской культур отложило свой отпечаток на архитектуру в этой стране [5, 16, 25, 29, 30-31, 53, 56, 99].

На территории Сирии существует множество памятников архитектуры, которые принадлежат к различным эпохам (рисунок 1.4). Обзор некоторых из них представлен ниже.

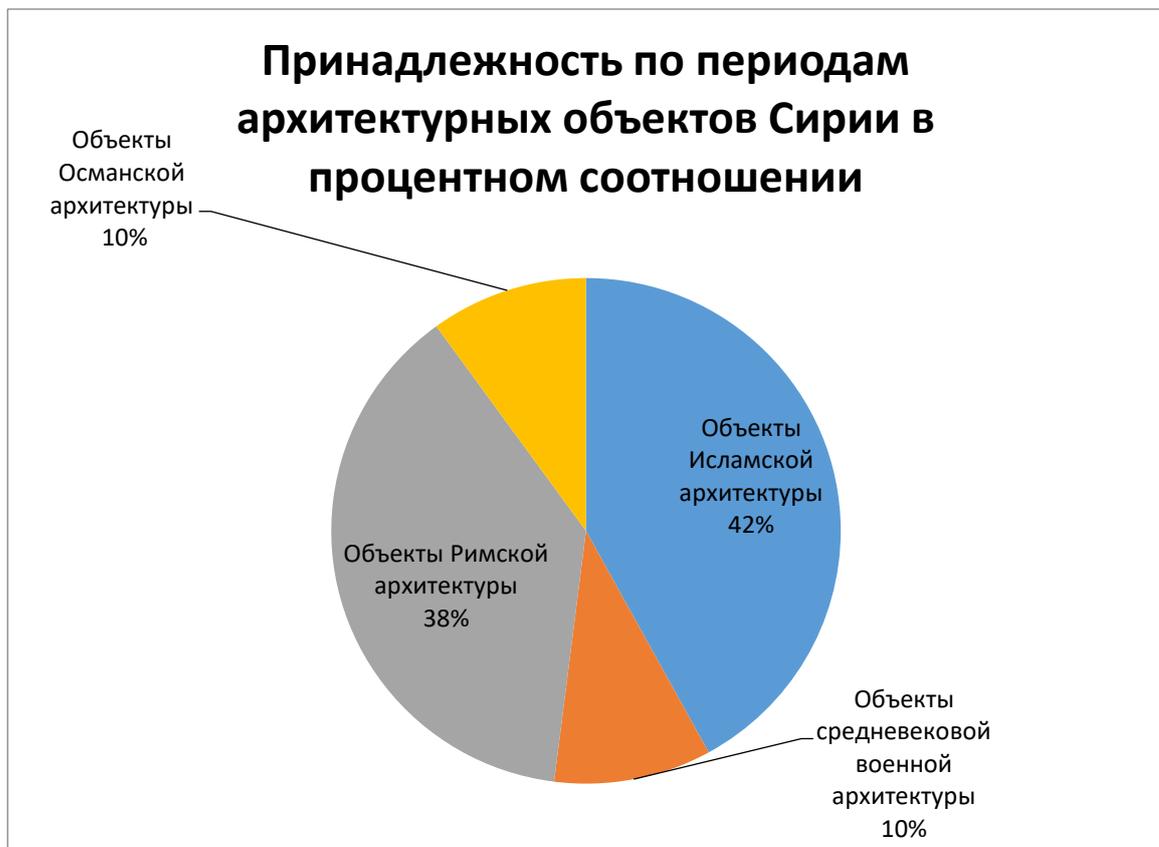


Рисунок 1.4 – Диаграмма, описывающая приблизительную принадлежность памятников архитектуры Сирии по периодам в процентном соотношении.

Триумфальная арка

Триумфальная арка (рисунок 1.5) была построена в конце II века и относится к римской архитектуре. Она состоит из трех частей (входов), к которым примыкает улица Колоннад. Конструктивно она расположена под углом 30° к вышеназванной прямой улице, которая соединяется с храмом Бела. Средняя часть улицы шириной 11 м. не была мощена и использовалась для перегона животных и

проезда транспортных средств. По бокам улицы предусматривалось два крытых портика, которые выполнены из золотистого известняка и розового асуанского гранита, ширина каждого 7 м. Диаметр колонн портиков составлял 0,95 м., высота колонн 9,5 м. В настоящее время осталось только 150 колонн [31, 99].



Рисунок 1.5 – Триумфальная арка в Пальмире.

Храма Бела

Храма Бела (рисунок 1.6) является главным святилищем г. Пальмира, к его входу подводит улица. Он располагается на ступенчатом основании, центральное помещение храма имеет прямоугольную форму и окружено с четырех сторон колоннадой, при этом на торцах здания – в два ряда. Центральный вход в храм Бела находится не с торцевой, как в других античных храмах, а с продольной стороны. Мощные пилоны, покрытые каменными рельефами, выделяют вход. Внутреннее пространство храма представляет собой большой зал, который не разделён никакими колоннадами или стенами. Храм сочетает в себе римский и восточный архитектурные стили [31, 99].



Рисунок 1.6 – Храм Бела в Пальмире.

Замок Крак да Шевалье

Архитектура замка Крак де Шевалье (Рисунок 1.7) относится к средневековой фортификационной военной архитектуре. Замок был построен в 1031 году. План замка (рисунок 1.8) имеет эллиптическую форму с двумя стенами в виде концентрических эллипсов с размерами примерно 230x160 м. Вокруг замка была построена толстая каменная стена со скошенным утолщением внизу и дозорными башнями. За внешней стеной имеется двор, через который можно было войти во внутренние помещения, где имеется часовня, зал, хранилище и склады, рыцарский зал и большая галерея с множеством колонн и сводчатым потолком [16, 29, 30, 31, 99].



Рисунок 1.7 – Общий вид замка Крак де Шевалье.

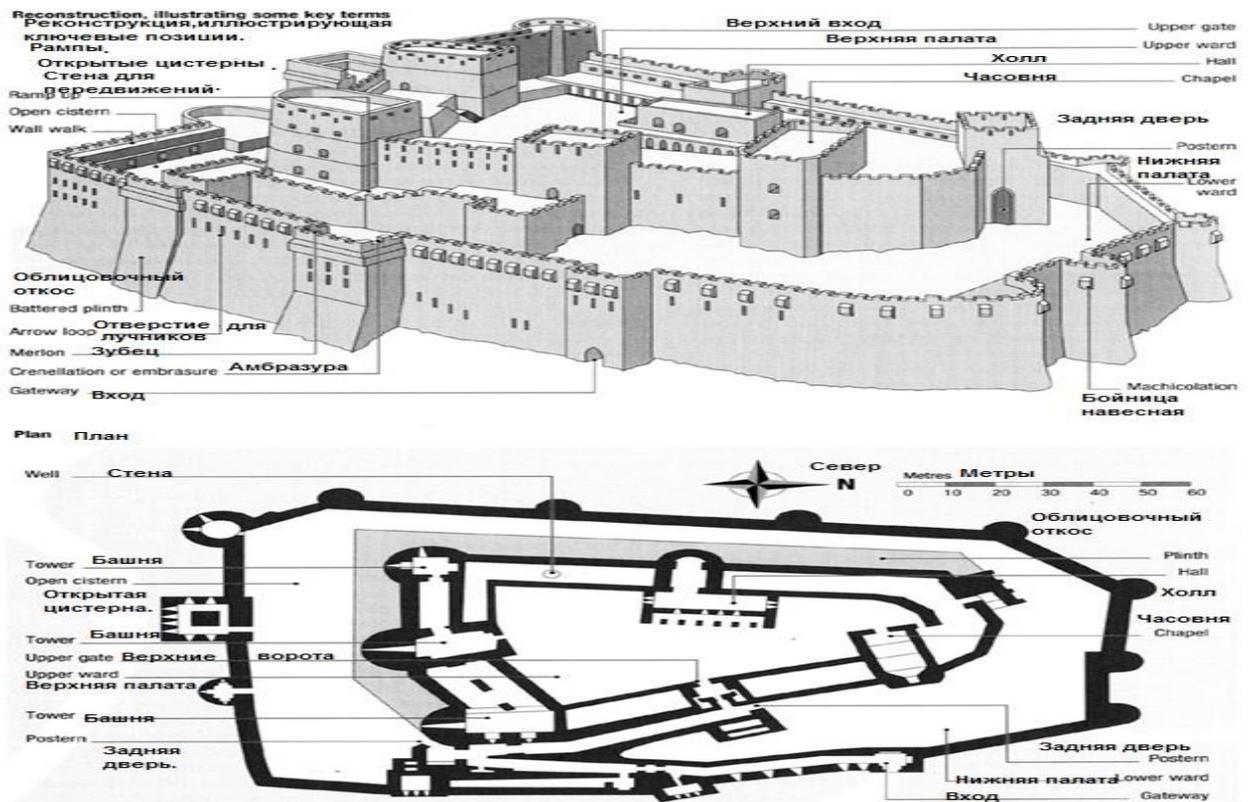


Рисунок 1.8 – План и реконструкция замка Крак де Шевалье.

Особую роль на территории Сирии играли памятники архитектуры культового значения, которые имеют большое значение в культуре и жизни

мусульманского общества. Главное культовое сооружение у мусульман является мечеть. Мечети играли и играют очень важную роль в их жизни, ведь в них они совершают молитвы и слушают проповеди. Старинные мечети располагаются повсюду в этой стране.

Великая мечеть в г. Алеппо, Сирия.

Великая мечеть в г. Алеппо (рисунок 1.9) является одним из крупнейших и старейших мусульманских объектов культового значения в Сирии. Она расположена в г. Алеппо, одном из крупных городов Сирии. Архитектура мечети относится к исламскому периоду времен Омейядской династии. Она была построена в 715 году. План Великой мечети (рисунок 1.10) прямоугольный, с прямоугольным двором размерами 105x78м., окруженным по периметру галереями с квадратными и прямоугольными колоннами. Колонны построены из известняка и облицованы мрамором. Во дворе имеются колонна и два фонтана для омовения верующих перед намазом. Этот двор славится своим разноцветным каменным покрытием из сложных геометрических узоров. В северо-западном углу высится квадратный минарет высотой около 45 м. и размерами в плане около 4,85 x 4,85м., который был построен в 1095 г. и стоит на каменном фундаменте. Мечеть включена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО [5, 6,7,16, 22, 29, 56,99, 103, 104].

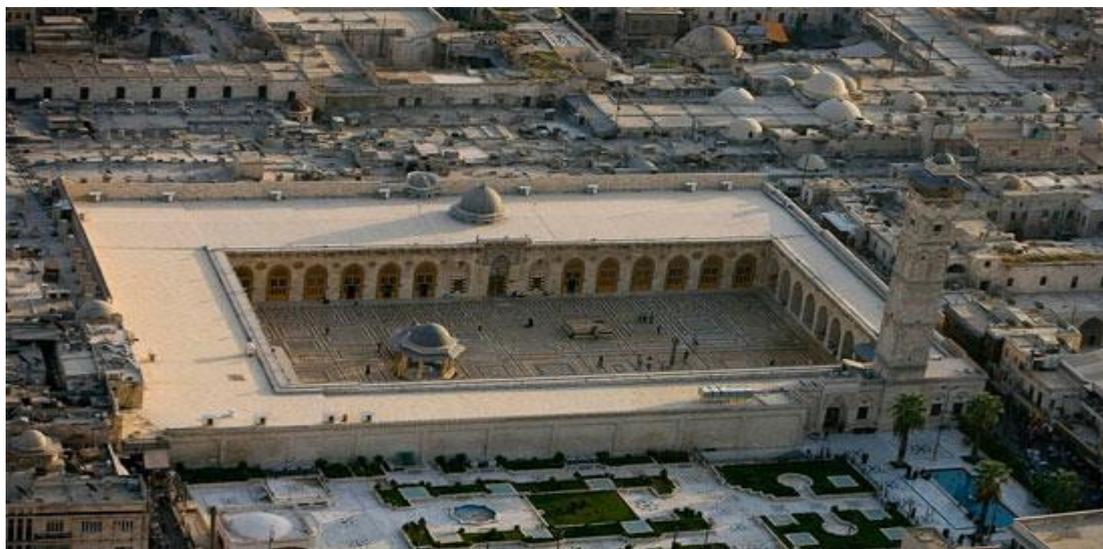


Рисунок 1.9 – Великая мечеть в г.Алеппо, Сирия.

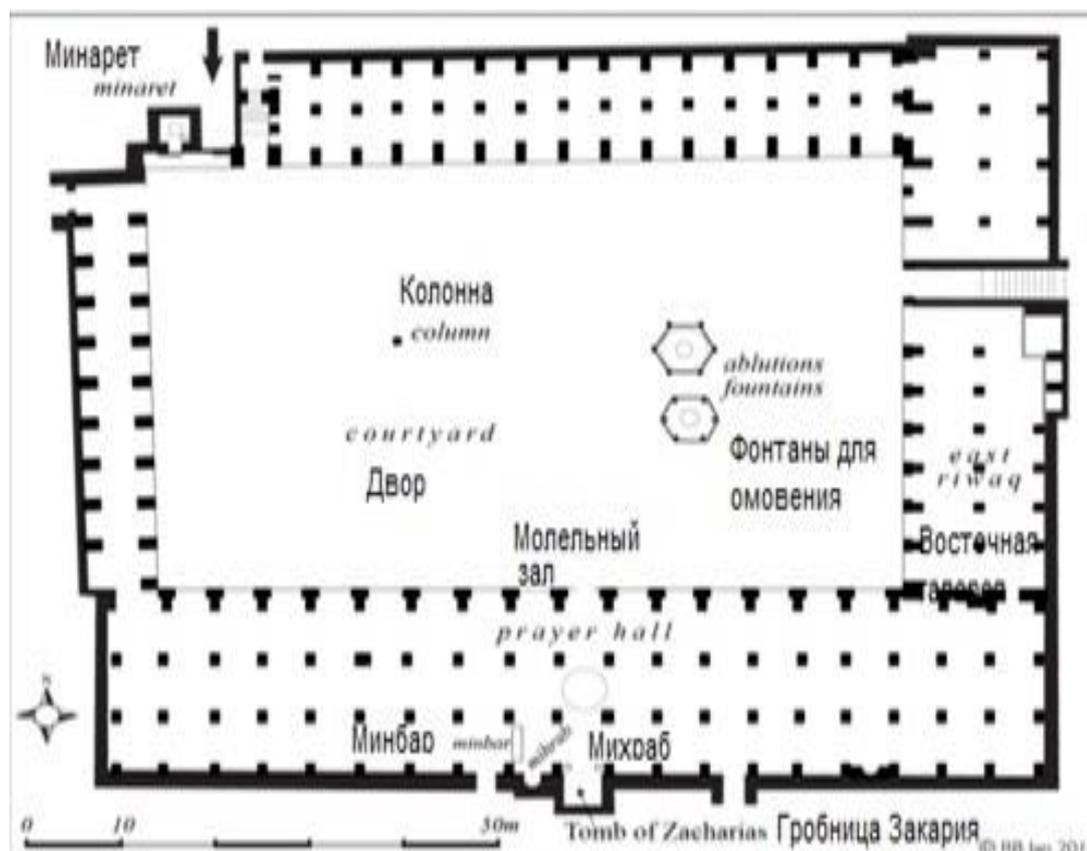


Рисунок 1.10 – План Великой мечети в г. Алеппо, Сирия.

Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо Сирия

Мечеть аль-Адилия (рисунок 1.11) была построена из камня в 1557 г. в Османском стиле архитектуры. Она расположена в старой части города Алеппо на юго-западном направлении от известной цитадели. План мечети (рисунок 1.12) имеет квадратную форму, длина его стороны 15,6 м., мечеть имеет прямоугольный двор, с двумя входами (восточным и западным), а в середине двора находится крытый куполом фонтан для омовения верующих. В мечети имеются галереи с покрытием, колоннами и арками. На западной стороне мечеть имеет минарет цилиндрической формы высотой около 40 м., построенный в Османском стиле. Купол мечети является шарообразным, больших размеров, и опирается на круглую опору, в которой имеется 16 окон. Рядом с ним расположены 5 маленьких куполов. В 1923 году была проведена реконструкция мечети, а в ходе реконструкции в 1975 г. был заменен материал покрытия внешней галереи с дерева и железа на железобетон [16, 104].

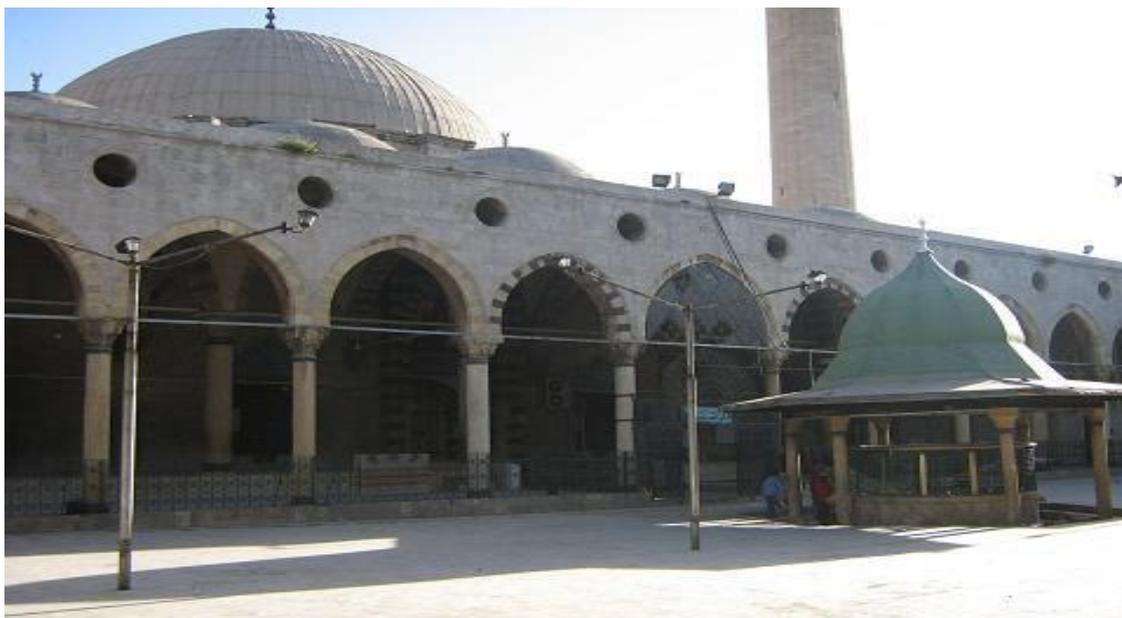


Рисунок 1.11 – Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо Сирия.

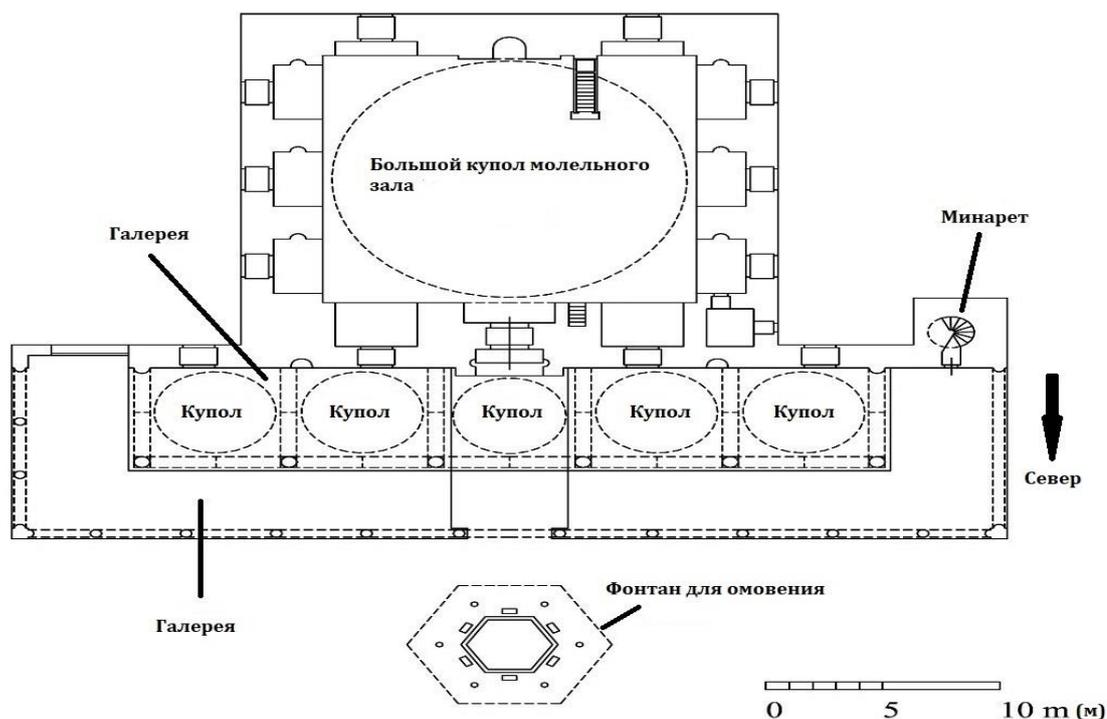


Рисунок 1.12 – План мечети Аль-Адилия в г. Алеппо, Сирия.

Большая мечеть в г. Маарат аль-Нуман, Сирия

Большая мечеть Мечеть в г. Маарат аль-Нуман (рисунок 1.13) расположена на центральной площади города Маарат аль-Нуман в провинции Идлиб в Сирии. Она была построена на месте древнего храма, возможно, римского. Архитектура этого культового здания принадлежит к Айюбидской средневековой

мусульманской архитектуре. План мечети имеет прямоугольную форму. Мечеть построена вокруг двора, который соединяет различные части и минарет мечети. В центральном дворе имеются два куполообразных павильона, которые стоят на древних колоннах. В мечети также имеется минарет высотой около 19 м., который был возведён первоначально в первой половине 12-ого века и восстановлен после землетрясения, прошедшего в 1170. Минарет был построен в стиле минарета Великой мечети в г. Алеппо [16].



Рисунок 1.13 – Большая (Великая) мечеть в г. Маарат аль-Нуман, Сирия.

Мечеть Халида ибн аль-Валида

Мечеть Халида ибн аль-Валида (рисунок 1.14) располагается в городе Хомс в Сирии. Она была построена изначально в VII веке и перестроена в XIII веке. Мечеть была названа в честь арабского военачальника Халида ибн аль-Валида, который жил в VII веке. В конце XIX-начале XX вв. при Османском султани Абдул-Хамид II мечеть была реконструирована, и ее архитектура стала больше соответствовать османско-турецкому архитектурному стилю, который отличается в том числе чередованием полос из черных и белых камней. Внутри мечети существует усыпальница, которая содержит гробницу военачальника. Она увенчана куполом и расположена в углу зала для молитв. План мечети представляет собой неправильный многоугольник, близкий к прямоугольнику с

размерами около 31х31м. с внутренним двором и толстыми стенами толщиной около 110 см.

Центральный купол здания, построенный в мамлюкском стиле, покрашен в серебристый цвет, его высота около 30 м., а диаметр около 14 м. Четыре массивные квадратные колонны поддерживают этот купол, и ещё восемь малых куполов его дополняют. Мечеть имеет три входа. В северо-восточном и северо-западном углах здания существуют два высоких минарета, построенных из белого камня известняка. Внутренний двор мечети мощен чередующимися черными и белыми камнями [29, 99].



Рисунок 1.14 – Мечеть Халида ибн аль -Валида в г. Хомсе, Сирия.

Мечеть Омара в городе Босра, Сирия

Мечеть Омара в г. Босра (рисунок 1.15) является примером архитектуры раннего ислама. Она находится в городе Босра, в провинции Дарья, на расстоянии 140 километров к югу от г. Дамаска. Мечеть построена из камня вокруг внутреннего открытого двора размерами 16 х 13 м, в его середине находится квадратное место размером 2 х 2 м, внутри которого имеется фонтан для омовения верующих, окруженный колоннами из мрамора диаметром 50 см,

высотой 2 м с дорической капителью. Двор окружен четырьмя галереями с 44 колоннами различных ордеров из белого мрамора и известняка с капителями в дорическом, коринфском и ионическом стиле. Южная галерея предназначена для совершения молитв, ее ширина 12 м. Пол двора мощён камнями из известняка и черного базальта, которые образуют рисунки разных цветов и геометрических фигур. В северо-восточном углу располагается минарет высотой 24 м с основанием 4,80 х 4,80 м и сужается по мере подъема вверх. Высота северной стены 10 м., южная стена имеет пять окон арочного вида [16, 21].

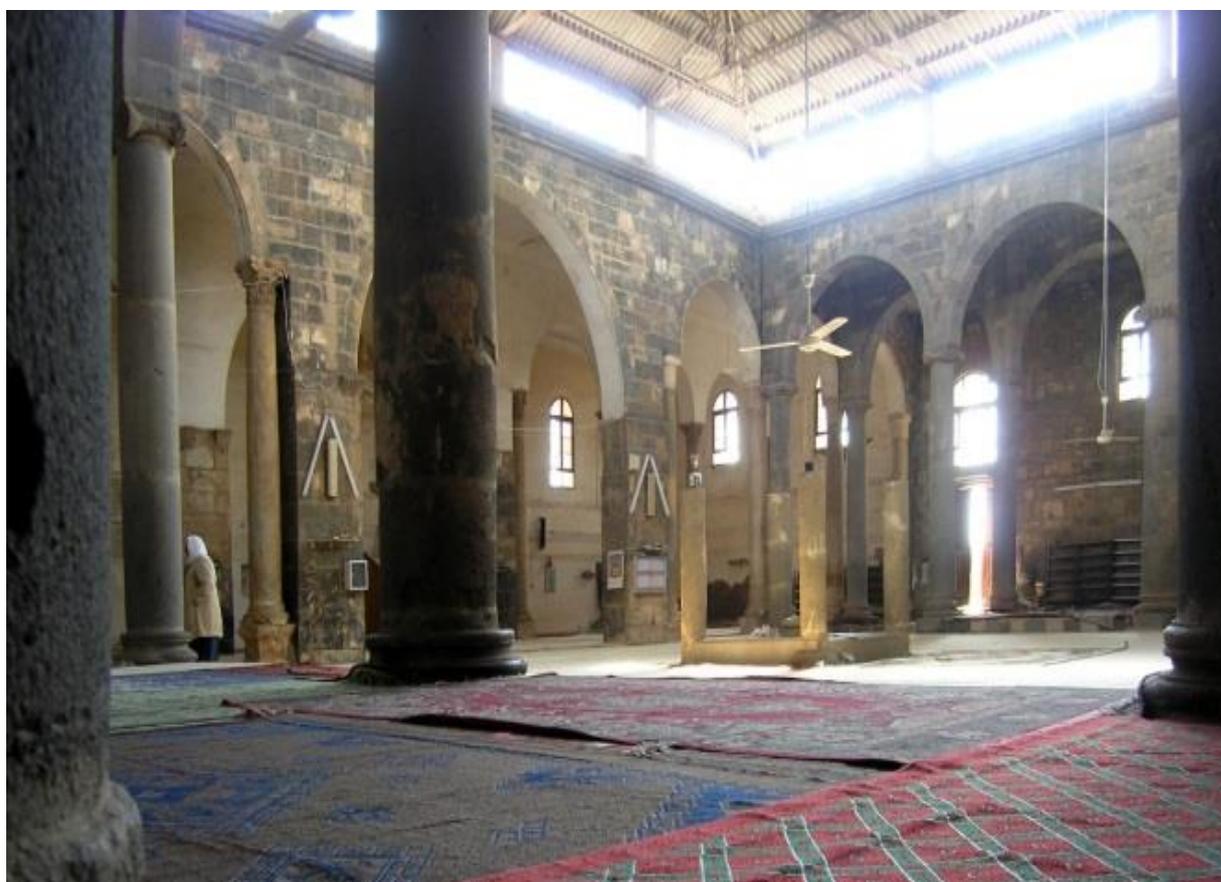


Рисунок 1.15 – Мечеть Омара в городе Босра, Сирия.

Как видно из обзора, наибольшее количество в процентном соотношении составляют памятники архитектуры мусульманского зодчества и насчитывают более 42% от общего количества памятников архитектуры в Сирийской Арабской Республике.

1.3. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий

Прошлые землетрясения на территории Сирии привели не только к серьезным повреждениям памятников архитектуры (рисунок 1.16), но иногда и к их полному разрушению [9, 40, 57, 87, 94].

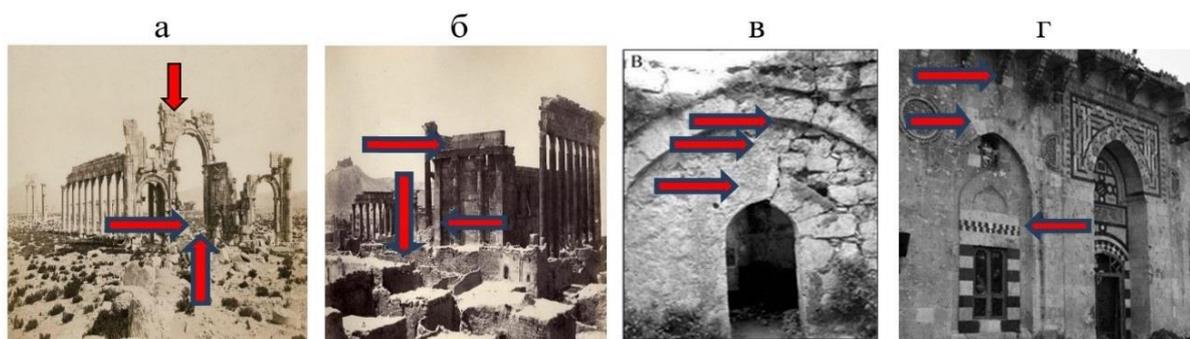


Рисунок 1.16 – Повреждения некоторых памятников архитектуры в Сирии в результате прошлых землетрясений:

а – Триумфальная арка в Пальмире; б – Храма Бела в Пальмире; в – Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс; г – Великая Мечеть в г.Алеппо.

Многие памятники архитектуры в результате сейсмических воздействий различной интенсивности, которые происходили на протяжении веков на территории Сирии, получили многочисленные повреждения в виде явных и скрытых трещин различных направлений и размеров. В других памятниках произошло частичное или полное разрушение строительных конструкций.

Например, в результате прошлых землетрясений имелись повреждения строительных конструкций, трещины различных размеров и направлений: вертикальные, горизонтальные и крестообразные на колоннах, стенах и сводах многих мечетей, таких как Великая мечеть в г.Алеппо, мечеть аль-Адилия в г. Алеппо, Большая мечеть г. Маарат аль-Нуман, мечеть Халида ибн аль-Валида в г.Хомс, мечеть Омара в г.Босра и замков, таких как замок Крак де Шевалье в провинции Хомс. Шедевры мировой архитектуры, расположенные на территории Пальмиры, также пострадали от прошлых землетрясений, например, Триумфальная арка, Храм Бела и др. (рисунок 1.16).

В современной Сирии государство заботилось о поддержании памятников архитектуры в хорошем состоянии и при необходимости проводило необходимый комплекс мер по усилению или восстановлению повреждённых, или разрушенных частей.

Но ситуацию осложнили активные военные действия, которые начались на территории Сирии в 2011 году и которые тоже привели к серьезным повреждениям строительных конструкций этих памятников архитектуры [5,6,22, 61,62].

Повреждения в Триумфальной арке и Храме Бела, в Пальмире:

В 2015 году в время боевых действий в Сирии радикальными боевиками была варварски взорвана триумфальная арка [30, 31,29, 99], в результате чего было уничтожено почти 90% конструкций арки (рисунки 1.17-1.19) [62], а также получили повреждения близлежащие колонны. Следует отметить, что до начала военных действий колонны уже имели микротрещины, полученные в результате прошедших землетрясений. Военные действия усугубили процесс их разрушения [5, 6, 10, 22,62].



Рисунок 1.17– Повреждения строительных конструкций Триумфальной арки в Пальмире в Сирии в результате взрыва во время войны.



Рисунок 1.18 – Реконструкция взорванной части триумфальной арки в Пальмире в Сирии.

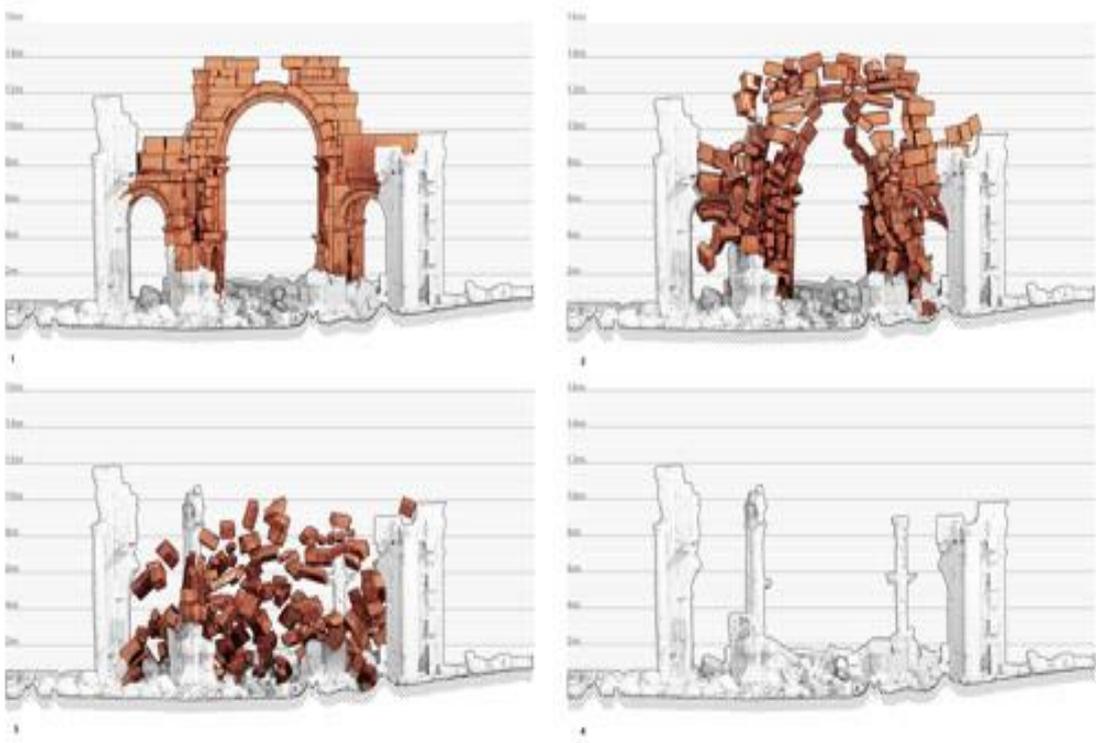


Рисунок 1.19 – Реконструкция взорванной части Триумфальной арки в Пальмире, Сирия. Это моделирование поможет для будущего восстановления арки.

Также был взорван храм Бела. В результате прошлых землетрясений он имел множество трещин различных направлений на колоннах (рисунки 1.20-1.21) [62].



Рисунок 1.20 –Храма Бела в Пальмире после взрыва.



Рисунок 1.21– Реконструкция взорванной части храма Бела в Пальмире в Сирии.

Повреждения в Замке Крак де Шевалье:

В 2014 г. во результате боевых действий в Сирии, в замке Крак де Шевалье была разрушена одна из башен замка. также имели место следующие разрушения (рисунки 1.22-1.25):

Частичные повреждения в передней части Рыцарского зала, некоторые повреждения в украшениях и арках внутри Рыцарского зала, ощутимые последствия пожара за церковью, повреждения в зале библиотеки напротив башни великого магистра и часть лестницы, которая ведет на крышу зала библиотеки, повреждение лицевой стороны башни дочери короля, частичное разрушение в стене между башни дочери короля и крыши церкви, частичное разрушение при входе на лестницу перед башни калавун, и повреждение части башни, частичные повреждения и разрушения некоторых камней в стенах в нескольких местах замка, небольшие повреждения внешней стороны стены замка. В результате прошлых землетрясений различные строительные конструкции замка имели также повреждения и трещины различных размеров и направлений [6-7,16, 20- 21 61- 62].



Рисунок 1.22– Разрушения во дворе перед рыцарским залом в замке Крак де шевалье в Сирии в результате войны.

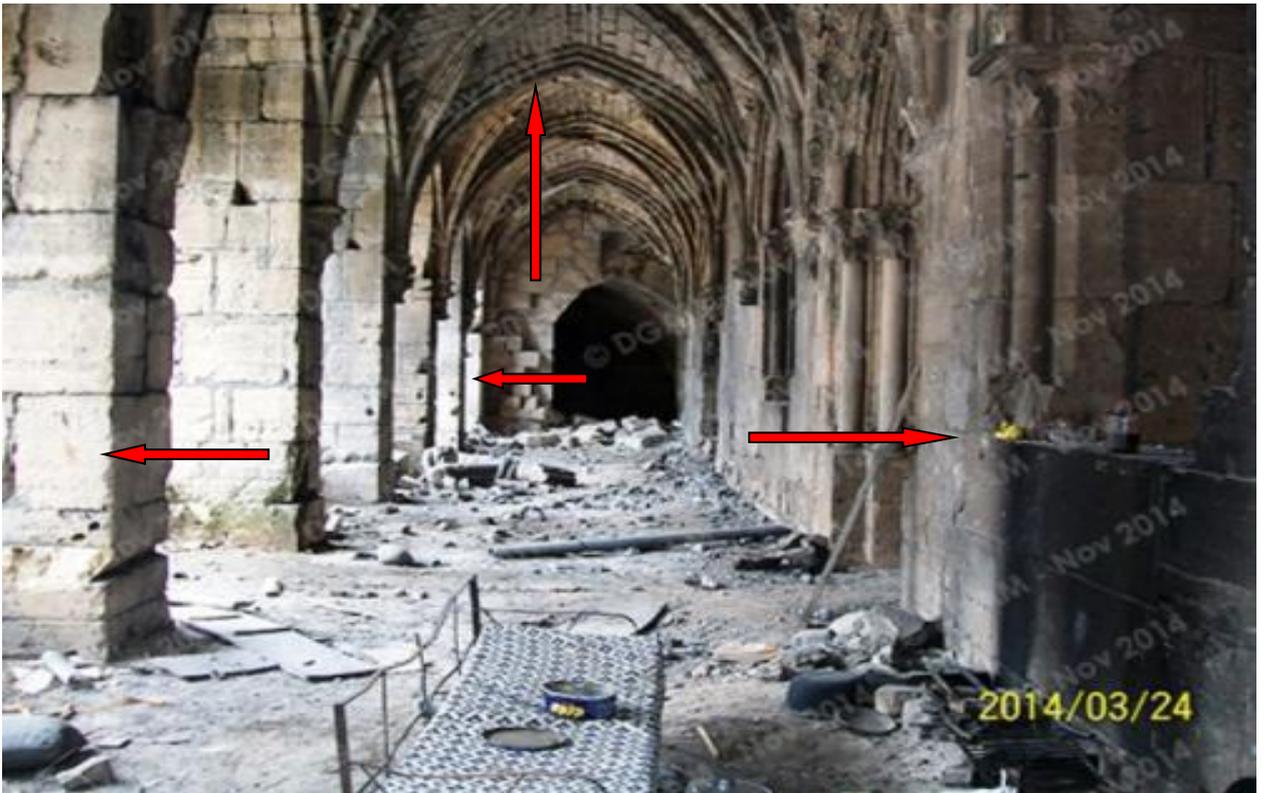


Рисунок 1.23 – Разрушения в большие галереи в замке Крак де шевалье в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.24 – Повреждения на стене в замке Крак де шевалье в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.25 – Повреждения на фасаде рыцарского зала в замке Крак де шевалье в Сирии в результате войны.

Повреждения строительных конструкций в мечети аль-Адилия в г. Алеппо в Сирии:

В результате военных действий, которые начались в 2011 году в Сирии имели место повреждения строительных конструкций мечети: повреждены двор мечети, пол, крытый фонтан для омовения арки и колонны портика который выходит во двор, часть портика и некоторые стены. Эти повреждения следующего характера: отколовшиеся частицы, микротрещины на колоннах и арках, сломанные и выпавшие камни, разрушенные части (рисунки 1.26-1.28). В результате прошлых землетрясений мечеть пострадала и получила множество повреждений в виде вертикальных, горизонтальных и крестообразных трещин различных размеров [5, 6, 16, 21, 61- 62].



Рисунок 1.26 – Повреждения во дворе мечети аль-Адилия в г. Алеппо в Сирии, на фасаде портика, арках и колоннах, и фонтане для омовения, в результате войны.



Рисунок 1.27– Разрушения и повреждения в арках и колоннах портика (галерей) и на стене мечети аль-Адилия в г. Алеппо в Сирии.



Рисунок 1.28 – Повреждения и запустение во дворе мечети аль-Адилия в г. Алеппо в Сирии.

Повреждения в Великой мечети в г. Алеппо:

Во время войны, которая началась в 2011 году, в мечети возник пожар, имели место различные повреждения строительных конструкций: разрушен минарет, причинен большой ущерб каменным конструкциям колоннам, стенам и галереям мечети, где образовались микротрещины и откололись части камней, разрушена часть восточной стены (рисунки 1.29-1.30). В результате взрыва в 2013 года был разрушен минарет. В результате прошлых землетрясений Великая мечеть в г. Алеппо получила множество повреждений и трещин различных размеров и направлений (вертикальных, горизонтальных и крестообразных) [3,5, 22,7, 10, 16, 61, 62].



Рисунок 1.29 –Разрушения в восточной стене мечети, (вид с северо-востока).



Рисунок 1.30 – Общий вид мечети после войны.

Повреждения в Большой (Великой) мечети г. Маарат аль-Нуман в Сирии:

В результате боевых действий имели место повреждения строительных конструкций, а именно корпуса минарета и его крыши. образовались микротрещины, откололись и разрушились частицы. В результате прошлых землетрясений Великая мечеть в г.Маарат аль-Нуман (рисунки 1.31-1.33) получила множество повреждений и трещин в виде вертикальных, горизонтальных и крестообразных трещин с различными размерами) [5,16, 61, 62].

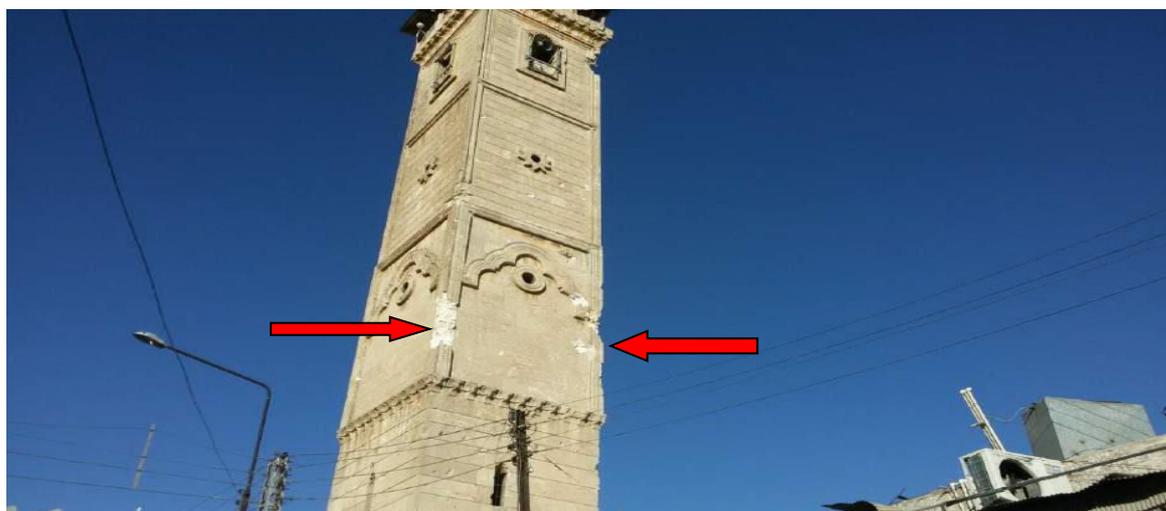


Рисунок 1.31– Повреждения на минарете Большой мечети г. Маарат аль-Нуман в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.32 – Повреждения (крупным планом) на корпусе минарета Большой мечети г. Маарат аль-Нуман в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.33 – Разрушения на Крыше минарета Большой мечети г. Маарат аль-Нуман в Сирии в результате войны.

Повреждения в мечети Халида ибн аль -Валида в г.Хомс в Сирии:

Территория города Хомса где расположена эта мечеть подвергалась в прошлом многочисленным землетрясениям что явилось причиной различных повреждений строительных конструкций мечети Халида ибн аль-Валида. В 2013 году мечеть пострадала в ходе военных действий. Были получены тяжелые повреждения строительных конструкций (рисунки 1.34-1.36) мечети таких как куполов, минаретов, стен и внутри мечети. Были следы от очагов небольших пожаров, а часть усыпальницы Халида ибн аль-Валида была разрушена [62].

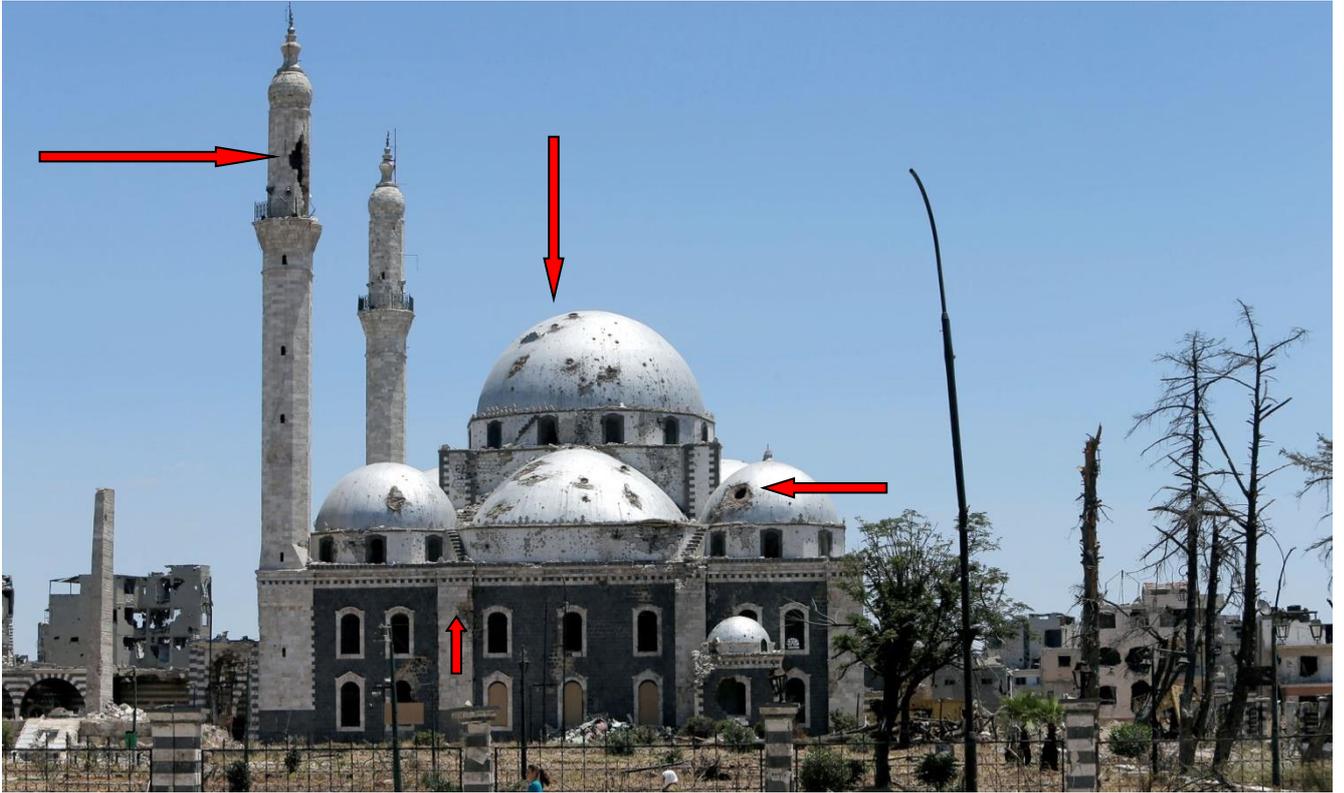


Рисунок 1.34 – Повреждения на куполах и минарете и на стенах мечети Халида ибн аль -Валида в г.Хомс в Сирии в результате войны.

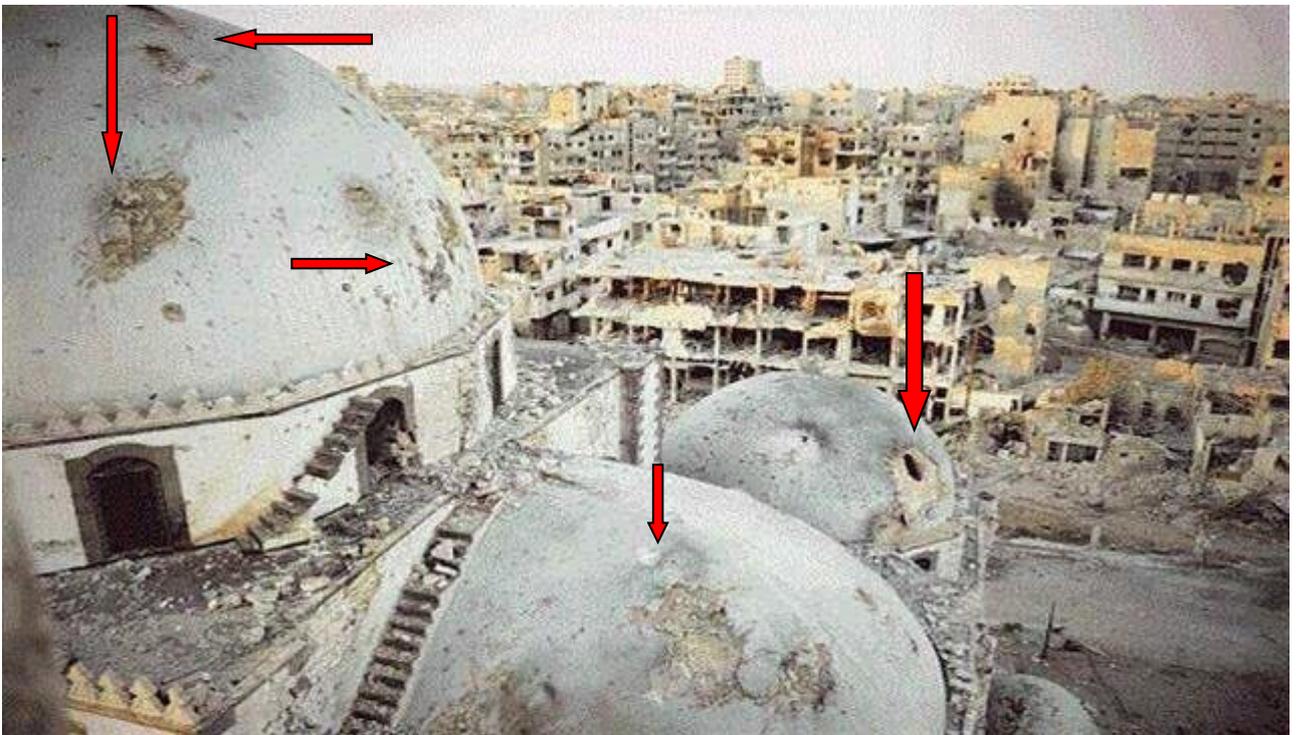


Рисунок 1.35 – Повреждения на куполах (крупным планом) мечети Халида ибн аль -Валида в г.Хомс в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.36 – Повреждения на куполе и минарете (общий план) мечети Халида ибн аль -Валида в г.Хомс в Сирии в результате войны. На переднем плане руины другого здания.

Повреждения в мечети Омара в г.Босра в Сирии:

В 2014 г. в результате боевых действий имели место разрушения строительных конструкции как внутри мечети во внутреннем дворе имеются повреждения в деревянном потолке, на колоннах и арках портиков есть местами отколовшиеся частицы и микротрещины так и на фасаде мечети имеется большая пробоина, на северной стене и минарете есть повреждения камней. В результате прошлых землетрясений мечеть Омара в г. Босра (рисунки 1.37-1.38) получила множество повреждений и трещин в виде вертикальных, горизонтальных и крестообразных трещин [5,16, 61, 62].



Рисунок 1.37– Разрушения во внутреннем дворе мечети Омара в г.Босра в Сирии в результате войны.



Рисунок 1.38 – Разрушения (пробойна) на фасаде мечети Омара в г.Босра в Сирии в результате войны.

1.4. Выводы по главе. Цель и задачи исследования

На основании выполненного анализа установлено, что:

1. Анализ сейсмической обстановки на территории Сирии показал, что территория этой страны подвержена сейсмическим воздействиям различной интенсивности. Эта территория отличается многочастотным составом землетрясений. Информация о сейсмичности территории Сирии является неполной, разрозненной и недостаточной.
2. Обзор памятников архитектуры Сирии показал, что на этой территории существует большое количество зданий и сооружений, которые были построены в различных эпохах и принадлежат к разным архитектурам, таким как римской, средневековой фортификационной, исламской и османской. Многие из этих памятников включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО
3. Обзор последствий сильных землетрясений, прошедших на территории Сирии показал, что степень повреждений в архитектурных памятниках имеет различный характер. Некоторые памятники имеют незначительные повреждения и дефекты в виде трещин, например, цитадель города Алеппо; некоторые имеют серьёзные повреждения, связанные с частичным обрушением элементов конструкции, например, Замок Крак де Шевалье в провинции города Хомс.
4. Последствия сильных бомбардировок и взрывов в ходе военных действий на территории Сирии с 2011 г. существенно добавили количество повреждений, а в некоторых случаях привели к полному уничтожению памятников всемирного наследия, например, храм Белла в Пальмире. Оценка повреждений, полученных различными памятниками архитектуры свидетельствует, что наибольшую степень повреждений получили в основном культовые объекты мусульманского зодчества, многие из которых относятся к памятникам архитектуры всемирного значения. поэтому этим памятникам уделено основное внимание в диссертации.

5. Установлено, что землетрясения, происходящие на территории Сирии, носят случайный и непредсказуемый характер, может возникнуть ситуация, когда в культовых зданиях находится большое количество верующих жизни, которых будет угрожать опасность.

В связи с этим целью настоящего исследования является обоснование целесообразности повышения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества на территории Сирии с учётом их повреждений, полученных в ходе военных действий, а также разработка рекомендаций по усилению поврежденных зданий. Для достижения цели необходимо было решить ряд задач:

1. Анализ состояния архитектурных памятников на территории Сирии с учетом сейсмической активности и боевых действий.
2. Реальная оценка сейсмичности сейсмоопасных регионов на территории Сирии.
3. Выявление характерных повреждений строительных конструкций архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества и обобщение информации по их техническому состоянию.
4. Разработка методики сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества с учётом установления требуемого класса их сейсмостойкости.
5. Выполнить расчетно-теоретические исследования сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества до и после повреждений, полученных в ходе военных действий с использованием численных методов моделирования.
6. Разработка рекомендаций по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества с полученными в ходе военных действий повреждениями.

ГЛАВА 2. УТОЧНЕНИЕ И ДОПОЛНЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ТЕРРИТОРИИ СИРИИ И ПАСПОРТИЗАЦИЯ ВЫБРАННЫХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТОВОГО ЗНАЧЕНИЯ

Как было сказано выше на территории Сирии существует много памятников архитектуры, которые были построены при различных государствах и цивилизациях. Некоторые из них сохранились до наших дней. Но прошлые землетрясения на территории Сирии привели не только к серьезным повреждениям, но и порой полностью к их разрушению [5,71]. Ситуация осложняется также и тем, что на территории Сирии, проводились активные военные действия. В процентном соотношении оказалось, что наибольшее число памятников архитектуры составляют те, которые принадлежат к мусульманскому зодчеству, а именно мечети что было критерием для их выбора для дальнейшего исследования.

Все здания и сооружения, которые располагаются в сейсмоопасных районах, сейсмичность которых от 7 до 9 баллов подлежат паспортизации. Такая паспортизация является первоочередным этапом в процессе обеспечения сейсмостойкости таких объектов. Для этого необходимо иметь полную информацию о сейсмичности месторасположения паспортизуемых объектов.

Так как существующая ранее информация о сейсмичности территории Сирии является разрозненной, неполной и не позволяет полноценно произвести необходимые исследования и расчеты памятников архитектуры Сирии на сейсмостойкость было выполнено уточнение и дополнение сейсмичности территории Сирии для последующих расчетов на сейсмостойкость и для паспортизации выбранных наиболее типичных и значимых памятников архитектуры мусульманского зодчества в Сирии.

2.1. Современная оценка сейсмичности территории Сирии

Для уточнения и дополнения информации о сейсмичности территории Сирии был выполнен расчет сейсмичности населенных пунктов Сирии при средней повторяемости землетрясений $T_{eq} = 100, 500, 1000$ и 2000 лет по аналогии с

сейсмическим районированием для территории Российской Федерации. Эта информация получена впервые, с помощью собранных данных о пиковых ускорениях грунта (PGA) для повторяемости землетрясений T_{eq} в 500 и 1000 лет (рисунок 2.1) и (рисунок 2.2) соответственно. В результате дальнейших расчетов найдены значения пиковых ускорений грунта PGA, соответствующие периодам повторяемости землетрясений T_{eq} в 100 и 2000 лет (таб. 2.1).

Проведено исследование сейсмичности территории Сирии на основании этого исследования и расчетов получена и сведена в таблицы 2.2 и 2.3 подробная информация о сейсмичности населенных пунктов Сирии при средней повторяемости землетрясений $T_{eq} = 100, 500, 1000$ и 2000 лет и о значениях пиковых ускорений грунта PGA для тех же периодов повторяемостей землетрясений [9].

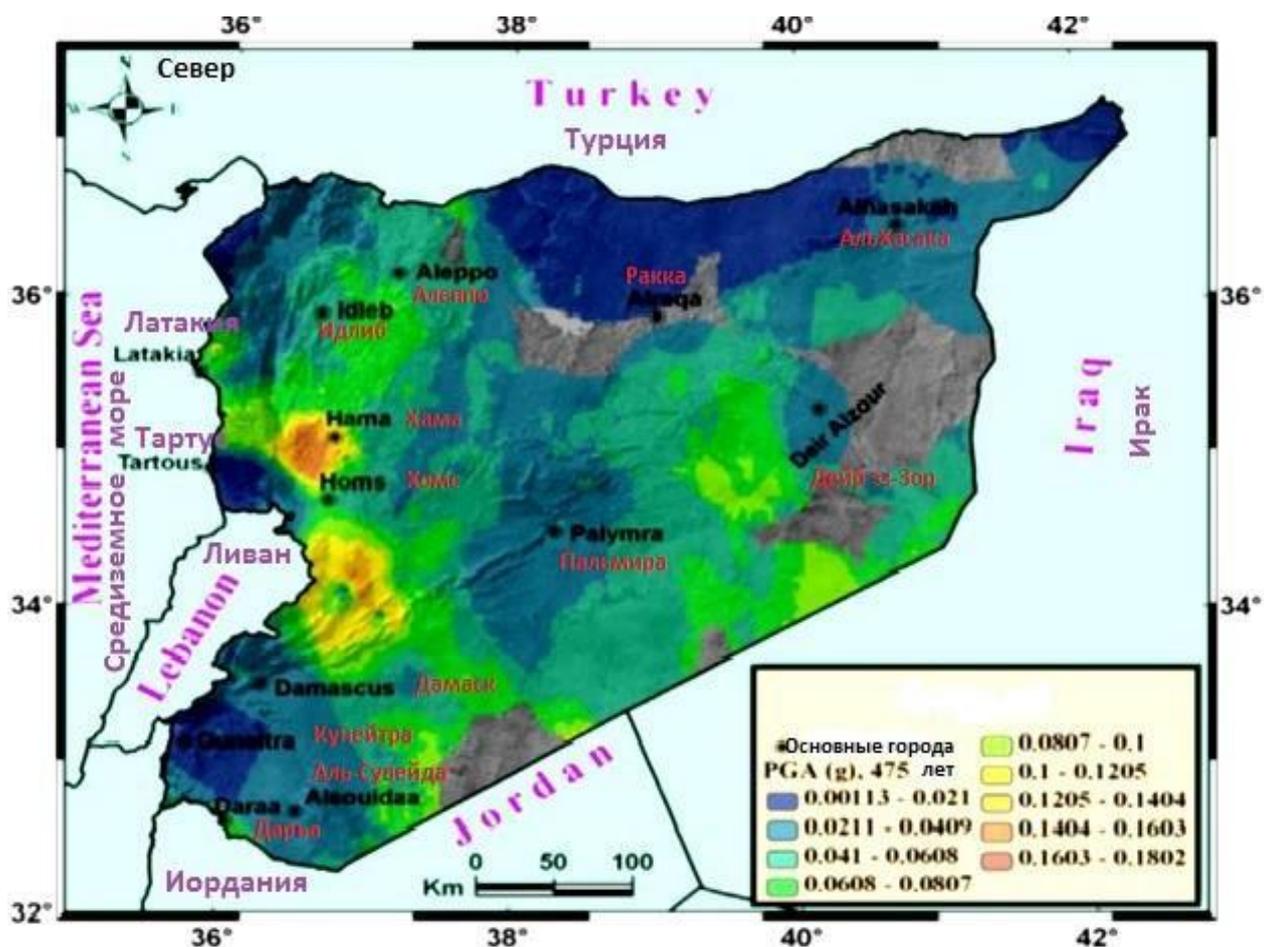


Рисунок 2.1 – Карта сейсмической опасности территории Сирии со значениями PGA в долях g для периода повторяемости землетрясений 500 лет.

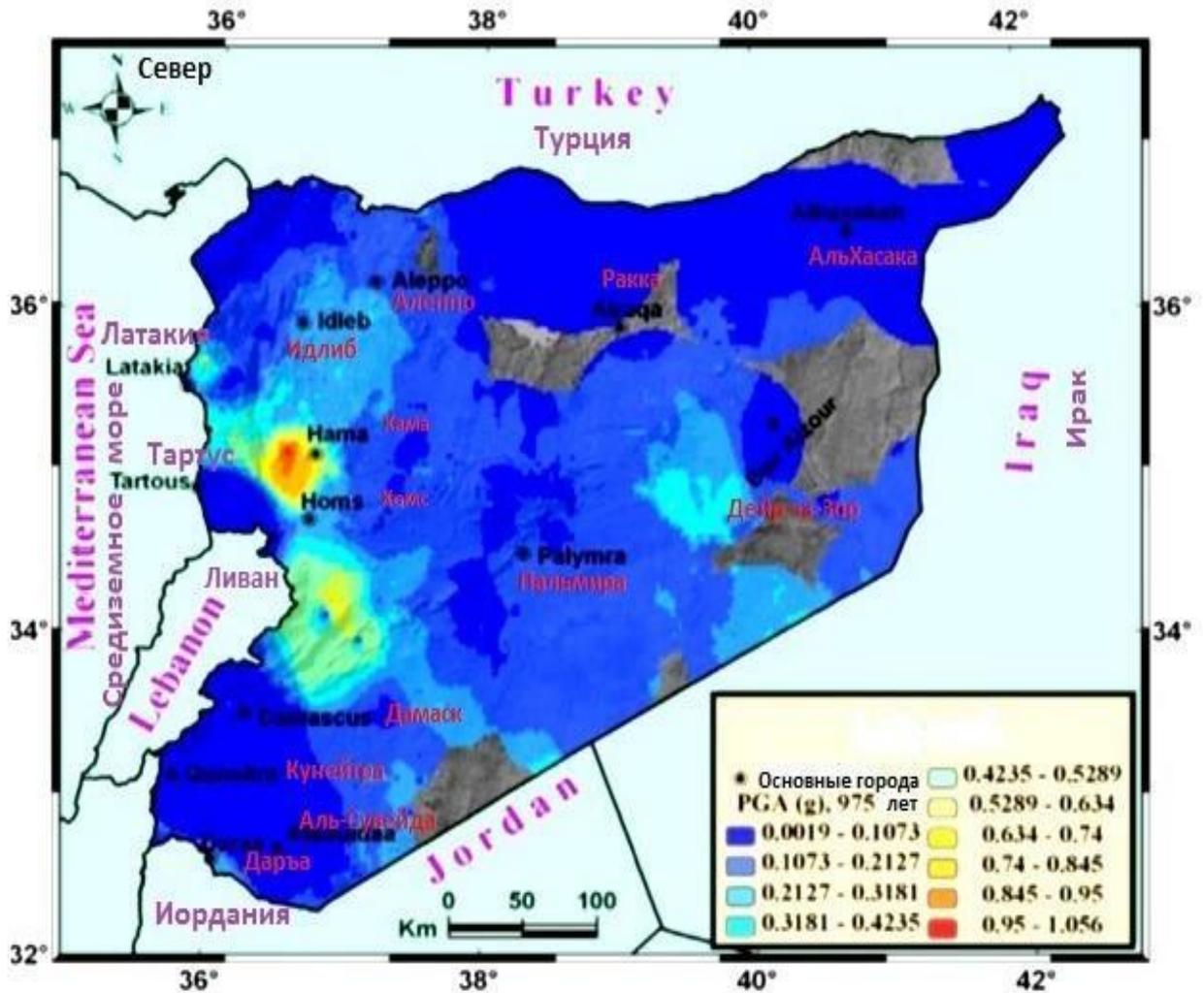


Рисунок 2.2 – Карта сейсмической опасности территории Сирии со значениями PGA в долях g для периода повторяемости землетрясений 1000 лет.

Кроме данных о прошлых землетрясениях для расчета были дополнительно использованы таблицы Б.1-Б.2 и формулы (2.1) и (2.2) ГОСТ Р 57546 –2017 [33]:

При расчете сейсмичности территории какого-либо государства целесообразно значения балльности выражать в «полубаллах», а не в целочисленных значениях к которым привыкли и являются традиционными [93], потому что это считается оправданным с экономически и с научной точек зрения.

Сейсмичность в «полубаллах» дает возможность выполнить более точные расчеты сейсмических воздействий и на порядок снизить затраты на антисейсмическое усиление. Информация о сейсмичности населённых пунктов Сирии в «полубаллах» сведена в таблицу 2.2.

В нормативных документах устанавливается, что если при строительномонтажных работах (СМР) в результате геологических изысканий были получены дробные значения балльности, то расчетные значения сейсмической балльности следует округлять до целого значения [9, 21,77, 93].

Информация о сейсмичности территории Сирии в традиционных целочисленных значениях балльности сведена в таблицу 2.3. В результате были составлены эти очень важные таблицы 2.2 и 2.3 о сейсмичности территории Сирии.

$$I = 2.50 \lg(PGA) + 1.89 \pm 0.6 \quad , \quad (2.1)$$

Где: I – интенсивность землетрясения в баллах по ШСИ-17 [33];

PGA – пиковое ускорение грунта, см/с².

Зная расчетный балл можно с помощью формулы (2.1) получить формулу (2.2) для расчёта пиковых ускорений грунта (PGA):

$$PGA = 10^{\frac{I-1.89\pm 0.6}{2.50}} \quad , \quad (2.2)$$

Таблица 2.1 – Значения пиковых ускорений грунта (PGA) населённых пунктов территорий Сирии в долях (g).

Название города	Повторяемость землетрясений T _{eq} ≈100 лет	Повторяемость землетрясений T _{eq} ≈500, лет	Повторяемость землетрясений T _{eq} ≈1000, лет	Повторяемость землетрясений T _{eq} ≈2000, лет
	PGA, в долях g.	PGA, в долях g.	PGA, в долях g.	PGA, в долях g.
Алеппо	0,051	0,05164	0,1885	0,4691
Дамаск	0,00275	0,047	0,106	0,2269
Даръа	0,1056	0,1556	0,423	1,074
Дейр эз-Зор	0,00202	0,0237	0,058	0,1283
Джиср-эш-Шугур	0,026	0,028	0,1	0,248
Идлиб	0,0679	0,0698	0,2345	0,603
Латакия	0,0167	0,02287	0,0756	0,184
Масьяф	0,1585	0,3324	0,813	2,155

Продолжение таблицы 2.1

Мухрада	0,1214	0,2736	0,648	1,728
Пальмира	0,0203	0,0393	0,11873	0,2816
Силинфа	0,0109	0,017	0,0542	0,1305
Тартус	0,0062	0,053	0,1319	0,2936
Хама	0,2904	0,3078	0,738	1,963
Харим	0,0345	0,036	0,13	0,3227
Хомс	0,05935	0,06691	0,2277	0,5728
Эль-Кунейтра	0,001	0,0255	0,0582	0,1252
Эль-Маликия	0,0024	0,004	0,0125	0,0299
Эль-Хасака	0,0021	0,018	0,0448	0,0997
Эс-Сувайда	0,04638	0,104	0,3045	0,7155

Таблица 2.2 – Сейсмичность населённых пунктов территории Сирии не в традиционных целочисленных значениях балльности, а в «полубаллах» по шкале ШСИ-17.

Название города	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 100$ лет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 500$, лет ет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 1000$, лет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 2000$, лет
	I_{100} , Балл	I_{500} , Балл	I_{1000} , Балл	I_{2000} , Балл
Алеппо	6,11	6,13	7,52	8,53
Дамаск	2,95	6,02	6,92	7,71
Дарья	7,4	7,6	8,5	9,5
Дейр эз-Зор	2,7	5,3	6,3	7,2
Джиср-эш-Шугур	5,4	5,5	6,9	7,9
Идлиб	6,8	6,9	7,8	8,8
Латакия	4,91	5,23	6,55	7,51
Масьяф	7,4	8,2	9,2	10,8
Мухрада	7,1	7,9	8,9	10,3
Пальмира	5,11	5,83	7,05	7,98

Продолжение таблицы 2.2

Силинфа	4,5	5	6,2	7,2
Тартус	3,9	6,2	7,2	8,1
Хама	7,9	8,1	9,05	10,6
Харим	5,7	5,8	7,2	8,2
Хомс	6,3	6,5	7,8	8,8
Эль-Кунейтра	1,9	5,4	6,3	7,2
Эль-Маликия	2,8	3,4	4,6	5,6
Эль-Хасака	2,7	5,01	6,02	6,9
Эс-Сувайда	6,05	6,9	8,08	9,02

Таблица 2.3 – Сейсмичность территории населённых пунктов Сирии в традиционных целочисленных значениях балльности по шкале ШСИ-17.

Название города	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 100$ лет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 500$, лет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 1000$, лет	Повторяемость землетрясений $T_{eq} \approx 2000$, лет
	I ₁₀₀ , Балл	I ₅₀₀ , Балл	I ₁₀₀₀ , Балл	I ₂₀₀₀ , Балл
Алеппо	VII	VII	VIII	IX
Дамаск	III	VII	VII	VIII
Дарья	VIII	VIII	IX	X
Дейр эз-Зор	III	VI	VII	VIII
Джиср-эш-Шугур	VI	VI	VII	VIII
Идлиб	VII	VII	VIII	IX
Латакия	V	VI	VII	VIII
Масьяф	VIII	IX	X	XI
Мухрада	VIII	VIII	IX	XI
Пальмира	VI	VI	VIII	VIII

Продолжение таблицы 2.3

Силинфа	V	V	VII	VIII
Тартус	IV	VII	VIII	VIII
Хама	VIII	VIII	X	XI
Харим	VI	VI	VII	VIII
Хомс	VII	VII	VIII	IX
Эль-Кунейтра	II	VI	VII	VII
Эль-Маликия	III	IV	V	VI
Эль-Хасака	III	V	VI	VII
Эс-Сувайда	VI	VII	VIII	IX

Выполненная оценка подтверждает высокую степень вероятности возникновения землетрясений высокой интенсивности. Установлено что сейсмичность отличается многофакторностью. В связи с этим становится актуальным рассмотрение вопросов реального состояния культовых зданий мусульманского зодчества. Для этого была выполнена паспортизация некоторых наиболее значимых объектов мусульманского зодчества с использованием известных методик определения характеристик зданий и сооружений после землетрясений.

2.2 Способы определения характеристик конструкций зданий и сооружений

Результаты, полученные при паспортизации зданий, дают возможность оценки эффективности выполненных ранее способов усиления и дать предложения по сейсмозащите и усилению зданий и сооружений целесообразными, подходящими методами.

На основании результатов паспортизации:

- Выявляются наиболее сейсмоопасные объекты, которые имеют максимальное расхождение между требуемым и фактическим уровнем сейсмостойкости;

- Проводится оценка наиболее сейсмоопасных объектов;
- Принимается решение по необходимым шагам и мерам повышения сейсмостойкости паспортизируемых зданий и сооружений.

Поэтому в этой главе проводится паспортизация и дополнительные исследования памятников архитектуры мусульманского зодчества Сирии.

Для определения характеристики конструкций существует множество способов: способ неразрушающего контроля (НК), механический способ, визуальный способ, микросейсмический способ и др.

Способ визуального обследования конструкций заключается во внешнем осмотре для определения качества и состояния строительных конструкций обследуемого здания. Данный способ имеет достоинства и недостатки.

Достоинство:

- Позволяет быстро получить результаты.

Недостаток:

- Определить механические и физические свойства материалов конструкций не представляется возможным.

Способ неразрушающего контроля (НК) обследования строительных конструкций (акустический способ) заключается в использовании ультразвуковых приборов.

Достоинства:

- Эффективность и точность.
- Обнаружение скрытых трещин и дефектов.
- Возможность определения прочности и толщины строительных конструкций, которые подвергаются обследованию [5, 43, 71].

Недостаток:

- Сведения о дефектах не являются исчерпывающими.

Была выполнена упрощенная паспортизация зданий, иными словами, полученные данные заносились в анкетные карточки-таблицы (см. таблицы 2.4–2.8). Для проведения паспортизации был использован визуальный способ.

Все объекты, исследованные ниже, были детально и подробно описаны в параграфах 1.2 и 1.3 настоящей работы.

2.3. Паспортизация выбранных объектов исследования

Для дополнительных исследований выбраны следующие пять памятников мусульманской архитектуры культового значения, расположенные на территории Сирийской Арабской Республики, которые являются наиболее типичными и известными для такого рода памятников в Сирии: Великая Мечеть в г.Алеппо (рисунки 2.3-2.4); Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо (рисунки 2.5-2.6); Большая (Великая) мечеть г. Маарат аль-Нуман (рисунок 2.7); Мечеть Халида ибн аль - Валида в городе Хомс (рисунок 2.8); Мечеть Омара в городе Босра (рисунок 2.9).

Великая мечеть в г. Алеппо, Сирия.

Вся информация о Великой мечети в г. Алеппо сведена в анкетную карточку в таблице 2.4.

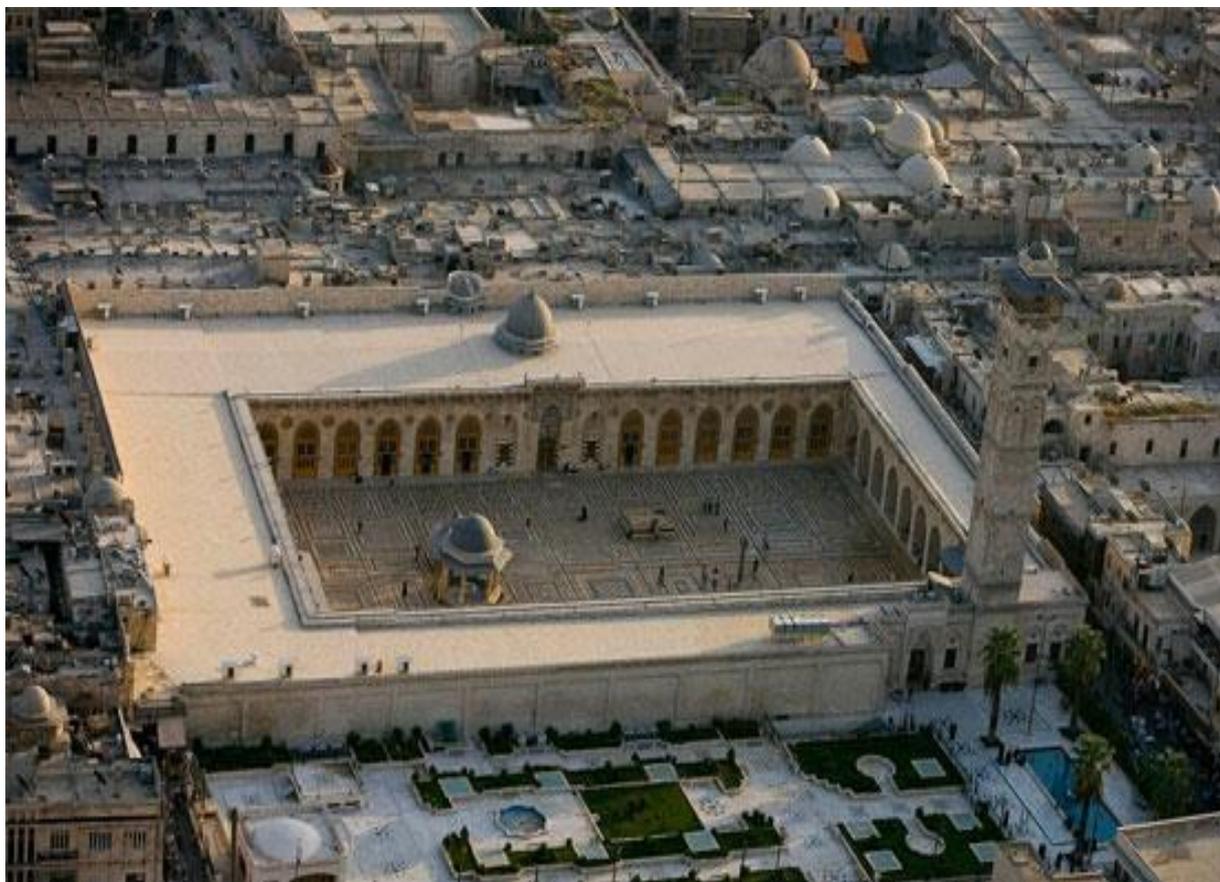


Рисунок 2.3 – Великая Мечеть в г.Алеппо, Сирия.

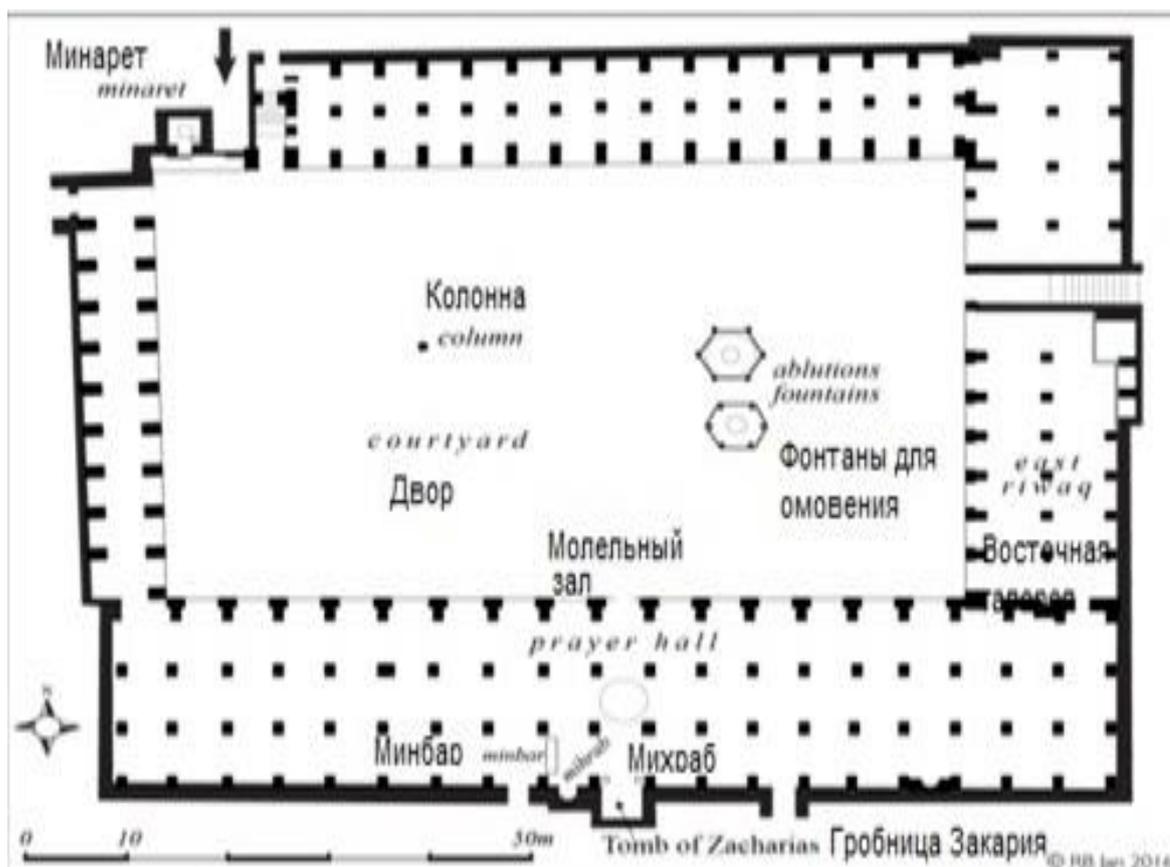


Рисунок 2.4 – План Великой Мечети в г.Алеппо, Сирия.

Таблица 2.4 – Анкетная карточка мечети.

1.	Общие данные
1.1	Наименование объекта: Великая мечеть в г. Алеппо
1.2	Месторасположения: Сирия, город Алеппо.
1.3	Год строительства: VIII век.
1.4	План здания: Прямоугольный со прямоугольным двором.
1.5	Фотография здания См. рисунки 2.3-2.4
1.6	Капитальный ремонт или реконструкция здания: В XII и XX веках.

Продолжение таблицы 2.4

1.7	Архитектура объекта: Исламская архитектура.
2.	Оценка уязвимости здания: Имеются трещины в несущих и ненесущих конструкциях, сколы, выколы и следы от пожаров, эти повреждения требуют срочного вмешательства.
2.1	Тип здания: Каменное(Известняк).
2.2	Имеющиеся повреждения: В результате прошлых землетрясений особенно в 12-ом веке имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий минарет полностью разрушен, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде, также следы от пожаров.
2.3	Грунт: Суглинок
2.4	Фундамент: Каменный: Бутовый ленточный.
2.5	Крыша объекта: Плоская
3.	Наличие и состояние инженерных коммуникаций
3.1	Канализация: Есть, нормальное состояние.
3.2	Водопровод: Есть, нормальное состояние.
4.	Элементы архитектуры в объекте:

Продолжение таблицы 2.4

4.1	Фасады: Выступы на фасаде, облицовка из мрамора.
4.2	Полы объекта: Из разноцветного мрамора.
4.3	Перегородки: Есть, нормальное состояние.
4.4	Потолки: Своды
5.	Заключение о состоянии мечети: В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий минарет полностью разрушен, имеются множество сколов, выколов, трещин различных размеров и направлений в колоннах, на фасадах, также следы от пожаров. Её статус в настоящее время – недействующая из-за повреждений.
5.1	Необходимость ремонта, усиления или сноса: Необходимо выполнение ремонтных мероприятий, восстановительных, а также усиление конструкций и колонн.

Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо Сирия

Вся информация о мечети аль-Адилия в г. Алеппо сведена в анкетную карточку в таблице 2.5.



Рисунок 2.5 – Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо Сирия.

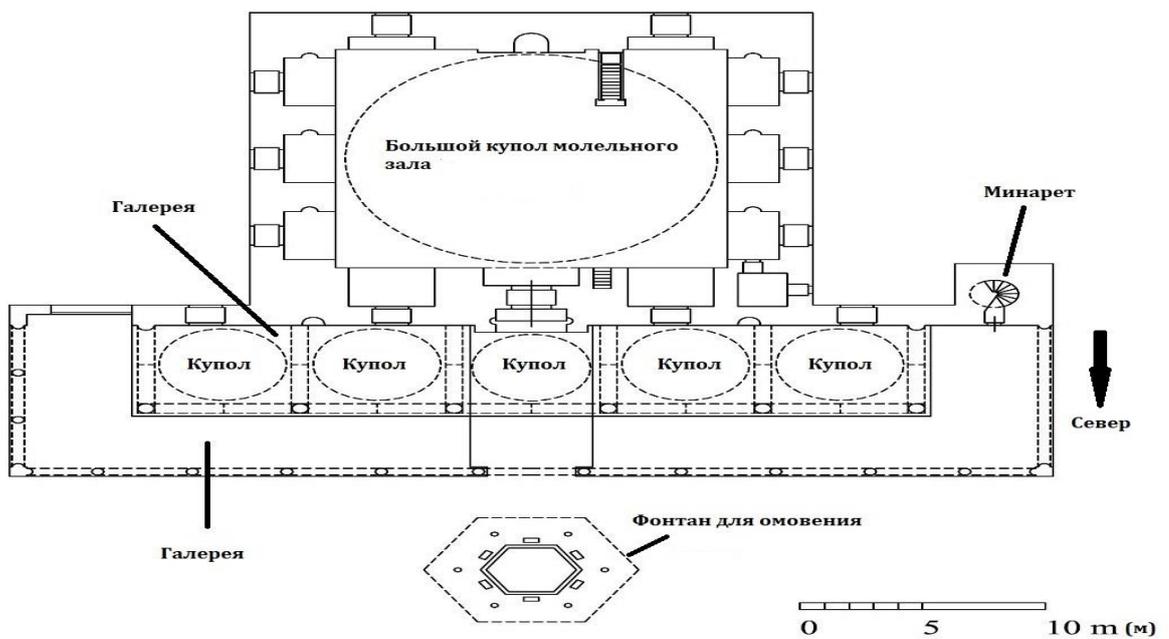


Рисунок 2.6 – План мечети Аль-Адилия в г. Алеппо, Сирия.

Таблица 2.5 – Анкетная карточка мечети.

1.	Общие данные
1.1	Наименование объекта Мечеть аль-Адилия
1.2	Адрес г. Алеппо Сирия
1.3	Год строительства XVI век
1.4	План здания Квадратный
1.5	Фотография здания См. рисунки 2.5-2.6
1.6	Капитальный ремонт или реконструкция здания В XX веке.
1.7	Архитектура объекта: Османская архитектура.
	Оценка уязвимости здания:
2.	Имеются трещины в несущих и ненесущих конструкциях, сколы, выколы. эти повреждения требуют срочного вмешательства.
2.1	Тип здания Каменное (известняк).
	Имеющиеся повреждения
2.2	В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий частично разрушен фасад, часть галереи и некоторые колонны, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде.
2.3	Грунт Суглинок
	Фундамент
2.4	Каменный, ленточный

Продолжение таблицы 2.5

2.5	Крыша объекта: Плоская с куполами
3.	Наличие и состояние инженерных коммуникаций:
3.1	Канализация Есть, нормальное состояние.
3.2	Водопровод Есть, нормальное состояние.
4.	Элементы архитектуры в объекте:
4.1	Фасады Типичные для мусульманского Османского периода
4.2	Полы объекта Мощёны камнями из известняка.
4.3	Перегородки Есть
4.4	Потолки Плоские
5.	Заключение о состоянии мечети: В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий частично разрушен фасад и часть галереи и некоторые колонны, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде. Её статус в настоящее время – недействующая из-за повреждений.
5.1	Необходимость ремонта, усиления или сноса: Необходимо выполнение ремонтных мероприятий, восстановительных, а также усиление конструкций и колонн.

Большая (Великая) мечеть в г. Маарат аль-Нуман, Сирия

Вся информация о Великой мечети в г. Маарат аль-Нуман сведена в анкетную карточку в таблице 2.6.



Рисунок 2.7 – Большая (Великая) мечеть в г. Маарат аль-Нуман, Сирия.

Таблица 2.6 – Анкетная карточка мечети.

1.	Общие данные
1.1	Наименование объекта Большая (Великая) мечеть
1.2	Адрес г. Маарат аль-Нуман, Сирия
1.3	Год строительства XII век
1.4	План здания Прямоугольный
1.5	Фотография здания См. рисунок 2.7

Продолжение таблицы 2.6

1.6	Капитальный ремонт или реконструкция здания В XII век.
1.7	Архитектура объекта: Архитектура Исламского периода.
2.	Оценка уязвимости здания: Имеются трещины в несущих и ненесущих конструкциях, сколы, выколы, повреждена минарет, частично разрушена крыша минарета. Эти повреждения требуют срочного вмешательства.
2.1	Тип здания Каменное (известняк).
2.2	Имеющиеся повреждения В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий минарет частично поврежден, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде.
2.3	Грунт Суглинок
2.4	Фундамент Каменный, ленточный
2.5	Крыша объекта плоская
3.	Состояние и наличие инженерных коммуникаций:
3.1	Канализация: есть, нормальное состояние.
3.2	Водопровод: есть, нормальное состояние.
4.	Элементы архитектуры в объекте:

Продолжение таблицы 2.6

4.1	Фасады Типичные для Мусульманского периода
4.2	Полы объекта Мощены природным камнем
4.3	Перегородки Есть
4.4	Потолки Своды
5.	<p>Заключение о состоянии мечети:</p> <p>В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины.</p> <p>В результате военных действий минарет частично поврежден, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде. В 21-ом веке произведен возможно кустарный ремонт после полученных повреждений. Её статус в настоящее время – действующая.</p>
5.1	<p>Необходимость ремонта, усиления или сноса:</p> <p>Необходимо выполнение ремонтных мероприятий, восстановительных, а также усиление конструкций и колонн.</p>

Мечеть Халида ибн аль –Валида в г.Хомс, Сирия

Вся информация о мечети Халида ибн аль –Валида в г.Хомс сведена в анкетную карточку в таблице 2.7.



Рисунок 2.8 – Мечеть Халида ибн аль –Валида в г.Хомс, Сирия.

Таблица 2.7 – Анкетная карточка мечети.

1.	Общие данные
1.1	Наименование объекта: Мечеть Халида ибн аль -Валида
1.2	Месторасположения: Сирия, город Хомс.
1.3	Год строительства: VII век.
1.4	План здания: Неправильный многоугольник близок к прямоугольнику. размерами около 31х31м. с внутренним двором и толстыми стенами толщиной около 110 см.
1.5	Фотография здания См. рисунок 2.8

Продолжение таблицы 2.7

1.6	Капитальный ремонт или реконструкция здания: В XIII и XIX веках.
1.7	Архитектура объекта: Исламская архитектура.
2.	Оценка уязвимости здания: Имеются трещины в несущих и ненесущих конструкциях, сколы, выколы и следы от пожаров, эти повреждения требуют срочного вмешательства.
2.1	Тип здания: Каменное (Известняк).
2.2	Имеющиеся повреждения: В результате прошлых землетрясений имелись горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий купола, минареты, наружные и внутренние стены были сильно повреждены, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде, также следы от пожаров.
2.3	Фундамент: Каменный: Бутовый ленточный.
2.4	Грунт: Суглинок
2.5	Крыша объекта: Центральный купол высотой около 30 м., диаметром около 14 метров возвышается над усыпальницей и восемь дополняющих малых куполов. Над остальными частями мечети– крыша плоская.
3.	Наличие и состояние инженерных коммуникаций:

Продолжение таблицы 2.7

3.1	Канализация: Есть, нормальное состояние.
3.2	Водопровод: Есть, нормальное состояние.
4.	Элементы архитектуры в объекте:
4.1	Фасады: Выступы на фасаде, облицовка из мрамора.
4.2	Полы объекта: Из разноцветного мрамора.
4.3	Перегородки: Есть, нормальное состояние.
4.4	Потолки: Своды
5.	Заключение о состоянии мечети: В результате прошлых землетрясений имелись горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий купола, минареты, наружные и внутренние стены были сильно повреждены, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде, также следы от пожаров. Её статус в настоящее время по состоянию на 2016 – недействующая из-за повреждений.
5.1	Необходимость ремонта, усиления или сноса: Необходимо выполнение ремонтных мероприятий, восстановительных, а также усиление конструкций и колонн.

Мечеть Омара в городе Босра, Сирия

Вся информация о мечети Омара в городе Босра сведена в анкетную карточку в таблице 2.8.



Рисунок 2.9 – Мечеть Омара в городе Босра, Сирия.

Таблица 2.8 – Анкетная карточка мечети.

1.	Общие данные
1.1	Наименование объекта Мечеть Омара в городе Босра
1.2	Адрес г. Босра, Сирия
1.3	Год строительства VII век
1.4	План здания Прямоугольный

Продолжение таблицы 2.8

1.5	Фотография здания См. рисунок 2.9
1.6	Капитальный ремонт или реконструкция здания В XII, XIII и XX веках.
1.7	Архитектура объекта: Архитектура раннего Ислама.
2.	Оценка уязвимости здания: Имеются трещины в несущих и ненесущих конструкциях, сколы, выколы, поврежден минарет, эти повреждения требуют срочного вмешательства.
2.1	Тип здания Каменное (чёрный базальт, известняк).
2.2	Имеющиеся повреждения: В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий имеется пробоина в южной стене, повреждена деревянная кровля, поврежден минарет, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде.
2.3	Фундамент Каменный, ленточный
2.4	Грунт Суглинок
2.5	Крыша объекта Деревянная
3.	Наличие и состояние инженерных коммуникаций:
3.1	Канализация Есть
3.2	Водопровод Есть

Продолжение таблицы 2.8

4.	Элементы архитектуры в объекте:
4.1	Фасады Типичные для мусульманского периода
4.2	Полы объекта Мощёны камнями из известняка и черного базальта
4.3	Перегородки Есть
4.4	Потолки Плоские
5.	Заключение о состоянии мечети: В результате прошлых землетрясений имеются горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий, имеется пробоина в южной стене, повреждена деревянная кровля, имеются множество сколов, выколов, трещин в колоннах и на фасаде. В 21-ом веке произведен возможно кустарный ремонт после полученных повреждений. Её статус в настоящее время – действующая.
5.1	Необходимость ремонта, усиления или сноса: Необходимо выполнение ремонтных мероприятий, восстановительных, а также усиление конструкций и колонн и ремонт минарета и кровли.

В таблице 2.9 сведены степени уязвимости вышеназванных объектов от землетрясений силой 7 баллов, 8 баллов и 9 баллов и от военных действий.

Таблица 2.9 – Степени уязвимости конструкций памятников архитектуры в Сирии.

Объект	Год постройки, век	Тип здания по конструктивному решению	Город	*Степень Существующих повреждений	Степень повреждений от землетрясений			Степень повреждений в результате военных действий
					9 баллов	8 баллов	7 баллов	
Великая Мечеть в г.Алеппо	VIII	Каменное	г. Алеппо	d3	d3	d3	d2	d3
Мечеть аль-Адилия в г.Алеппо	XVI		г. Алеппо	d3	d3	d3	d2	d3
Большая (Великая) мечеть г.Маарат аль-Нуман	XI		Маарат аль-Нуман	d2	d3	d2	d2	d2
Мечеть Халида ибн аль - Валида в г.Хомс	VII		г. Хомс	d2	d3	d2	d1	d3
Мечеть Омара в г. Босра;	VII		г. Босра	d2	d3	d2	d1	d3
*Расшифровка степени повреждений: d1- ничтожно малые или незначительные повреждения; d2- умеренные повреждения; d3- значительные или тяжёлые повреждения; d4- очень тяжёлые повреждения; d5- полное разрушение.								

В сейсмически активных районах процесс износа зданий протекает быстрее, так как факторы, вызывающие его, добавляются к деформациям, причиной которых являются сейсмические воздействия. Такой износ становится причиной снижения жёсткости зданий и увеличения их периодов колебаний. Более подробно об этом в таблице 2.10 [5, 71, 72, 98,112].

Таблица 2.10 – Шкала для оценки повреждения зданий и сооружений.

Условные обозначения степени повреждения зданий	Расшифровка повреждений зданий	Процент увеличения периодов колебания в зданиях	Необходимые мероприятия по усилению и восстановлению для повреждённых зданий
damage-1 (d-1)	Соответствует незначительным повреждениям несущих строительных конструкций здания	От 0% до 5%	Требуется произвести косметический ремонт здания
damage-2 (d-2)	Соответствует лёгким повреждениям ненесущих строительных конструкций здания	От 10% до 15%	Требуется восстановление повреждённых строительных конструкций здания
damage-3 (d-3)	Соответствует Умеренным повреждениям строительных конструкций здания	От 30% до 40%	Требуется усиление всего здания
damage-4 (d-4)	Соответствует тяжёлым повреждениям строительных конструкций здания	От 50% до 100%	Требуется произвести очень большой объём работ для усиления и восстановления здания
damage-5 (d-5)	Соответствует полному обрушению здания	Отсутствует	Не требуется

Для классификации повреждений, анализа полученных данных в результате обследования памятников архитектуры Сирии на примере пяти культовых зданий мусульманского зодчества и для оценки их технического состояния были использованы в качестве основных нормативных документов EMS-98 (Европейская макросейсмическая шкала) и MMSK-86 (международная модифицированная сейсмическая шкала), где степени повреждений классифицируются от d-1 до d-5 [5, 71, 72, 98, 112].

2.4. Выводы по главе

1. Получено впервые дополнение и уточнение сейсмологической информации о территории Сирии, которая отличается многофакторностью и может быть рекомендована сирийским специалистам в области сейсмостойкого строительства при антисейсмическом усилении зданий и сооружений, в том числе памятников архитектуры этой страны.
2. Выполненный анализ пяти объектов культового значения, как наиболее характерных и типичных для арабского зодчества, показал, что два объекта - Великая мечеть Алеппо и Мечеть аль-Адилия, которые находятся в г. Алеппо имеют степень повреждений при землетрясении от 7 до 9 баллов от d2 до d3, что соответствует умеренным и тяжелым повреждениям, в результате военных действий – d3.
3. Оценка степени повреждений строительных конструкций мечети арабского зодчества–Большая мечеть, которая находится в г. Маарат аль-Нуман в провинции Идлиб, показала, что при землетрясениях от 7 до 9 баллов степень повреждений соответствует d2-d3, а при военных действиях – d2.
4. Оценка степени повреждений строительных конструкций мечети мусульманского зодчества – Мечеть Халида ибн аль –Валида в г.Хомсе, Сирия, показала, что при землетрясениях от 7 до 9 баллов степень повреждений соответствует d2-d3, а при военных действиях – d2
5. Мечеть Омара, которая находится в г. Босра в провинции Дарья имеет степень повреждений при землетрясении от 7 до 9 баллов от d1 до d3, что

соответствует незначительным и тяжелым повреждениям, в результате военных действий – d3 что соответствует значительным повреждениям.

6. Эти результаты свидетельствуют о том, что характер повреждений меняется от незначительных до тяжелейших.

На основании проведенного анализа рекомендуется:

1. В мечетях осуществить капитальный ремонт колонн, покрытия, стеновых строительных конструкций и восстановить их несущую способность, восстановить разрушенные части. В Великой мечети Омейядов в г. Алеппо дополнительно к вышеназванным мерам восстановить разрушенный минарет и разрушенные части восточной наружной стены.
2. Для дальнейших исследований и сейсмоусиления выбрана Великая мечеть г. Алеппо так как она является наиболее типичным для зданий мусульманского культового значения и входит в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.
3. Результаты паспортизации позволяют оценить вероятность и ожидаемую степень повреждения зданий и сооружений при возможных будущих землетрясениях, а также социальный и экономический ущерб при вероятных землетрясениях в районе расположения паспортизируемых объектов.

Следующим важным вопросом исследования становится установление величины степени усиления рассматриваемых зданий. Для её определения можно использовать понятие класс сейсмостойкости в соответствии с имеющимися нормативными рекомендациями.

Определение класса сейсмостойкости (K_s) в своде правил СП 442.1325800.2019 «Здания и сооружения. Оценка класса сейсмостойкости» [82] приводится следующим образом:

«Характеристика здания или сооружения, определяющая его сейсмостойкость, зависящая от расчётного сейсмического воздействия, на которое проектировалось здание или сооружение и от категории его технического состояния».

В последующей главе приведены результаты разработки методологической основы сейсмоусиления на основании реальной оценки класса сейсмостойкости с учётом экономических и социальных потерь.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ В Г. АЛЕППО С УЧЕТОМ УСТАНОВЛЕНИЯ КЛАССА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

В Сирийской Арабской Республике существует много мечетей. Большое количество из них расположены в сейсмически активных и опасных районах. Характерно для рассматриваемых мечетей большое скопление людей во время молитв. Если бы произошло землетрясение, то повреждения мечети могли бы привести к единовременной гибели огромного числа людей. Например, мечеть Омейядов в г. Дамаск вмещает до 30000 человек. Великая мечеть (Омейядов) в г. Алеппо может вмещать до 25000 человек. Для других культовых сооружений характерны аналогичные цифры. При эксплуатации или проектировании таких сооружений следует максимально ограничить риски ущерба и гибели людей. Для решения этой задачи необходима оценка возможных сочетаний числа людей в мечети и силы землетрясения. Мечеть бывает полной людьми не более 5-10 % времени и в этот интервал маловероятно, что произойдет наиболее сильное землетрясение [74]. Соответствующие исследования были проведены автором для сейсмической опасности территории, характерной для Сирии [9].

3.1. Выбор объекта исследования

Далее рассмотрены сочетания числа людей и силы землетрясения применительно к Великой мечети в г. Алеппо, так как Великая мечеть является типичным зданием мечети в Сирии. Великая мечеть в г. Алеппо в Сирии (рисунок 3.1) является одним из наиболее известных памятников архитектуры культового значения в Сирии [16]. Город Алеппо относится к сейсмически активным районам [87, 40, 87]. По оценке автора, основанной на анализе повторяемости землетрясений различной силы в районе расположения мечети, была оценена ситуационная сейсмичность территории, используемая в РФ для характеристики сейсмической опасности [75]. Для рассматриваемого случая (г. Алеппо)

ситуационная сейсмичность составила $I_{(100)}=7$, $I_{(500)}=7$, $I_{(1000)}=8$, $I_{(2000)}=9$ при повторяемости землетрясений $T_{eq}=100$, $T_{eq}=500$, $T_{eq}=1000$ и $T_{eq}=2000$ лет соответственно. План мечети является прямоугольным с прямоугольным внутренним двором размерами 105x78м. Здание мечети одноэтажное в ней есть множество колонн образующие галереи вокруг внутреннего двора. На северо-западной стороне высится квадратный минарет размерами около 4,8x4,8 м. и высотой около 45 метров.

В Мечети имеются много повреждений строительных конструкций в результате прошлых землетрясений и военных действий. В результате военных действий минарет был разрушен в 2013 году [5, 16].

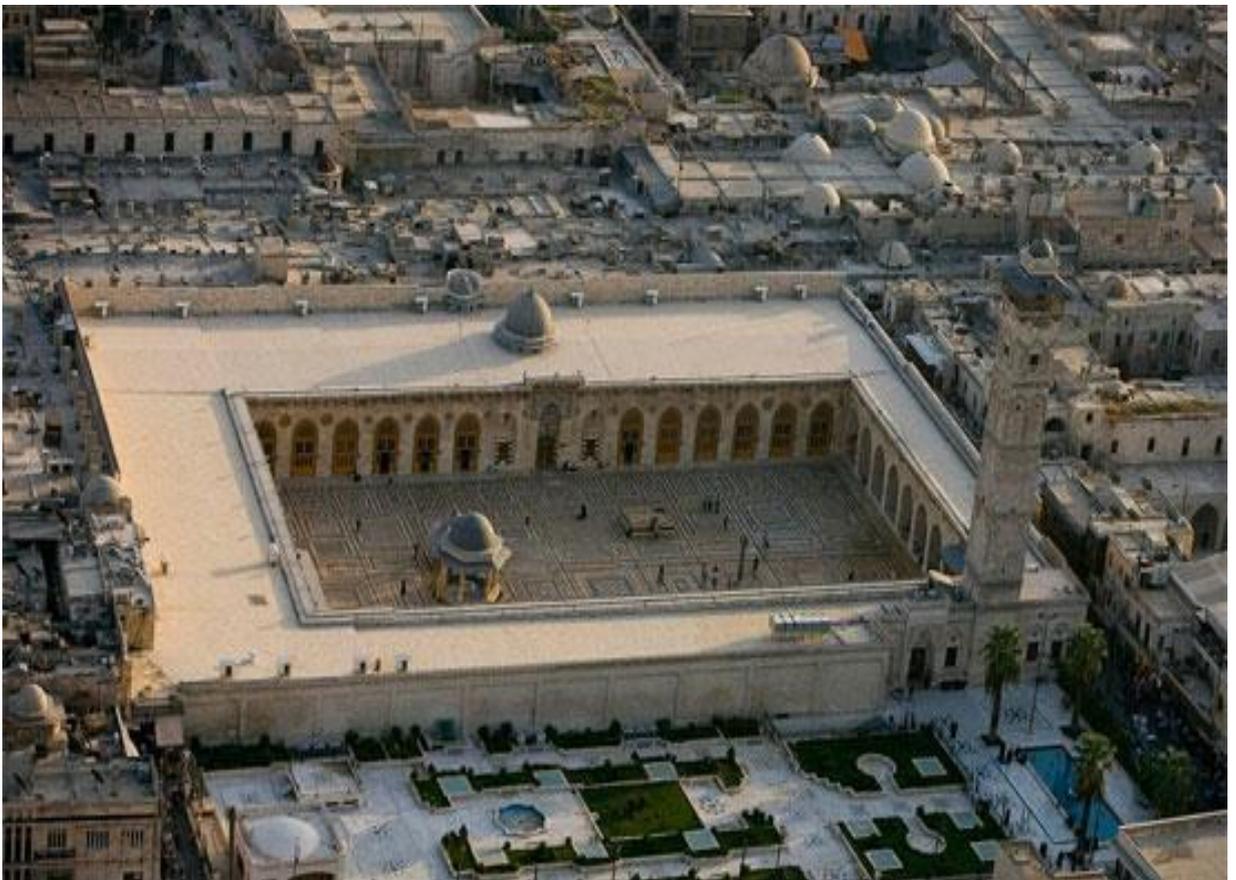


Рисунок 3.1 – Великая Мечеть в г.Алеппо, Сирия.

3.2.Разработка методики расчета

Методика расчёта включала решение трёх основных задач:

1. Первой задачей является задание функции распределения интенсивности землетрясений P_{eq} .

2. Второй задачей является задание функции распределения для количества людей в мечети P_{hum} .

3. Третьей задачей является задание критерия опасности пары (число людей, сила воздействия). В качестве такого критерия в работе принята стоимость затрат, вызванных возможными землетрясениями. Такой подход к выбору опасной пары рассматривается впервые.

Расчет выполнялся в программном комплексе MATHCAD-15. Неблагоприятное событие, представляющее собой одновременное воздействие землетрясения и нахождение большого числа людей в мечети, имеет вероятность, которая равна произведению вероятности P_{eq} возникновения землетрясения и вероятности P_{hum} наличия людей. Эта вероятность ограничена допустимой вероятностью $[P]$:

$$P_{eq} \cdot P_{hum} = [P] \quad (3.1)$$

$$P_{hum} = \frac{[P]}{P_{eq}} \quad (3.2)$$

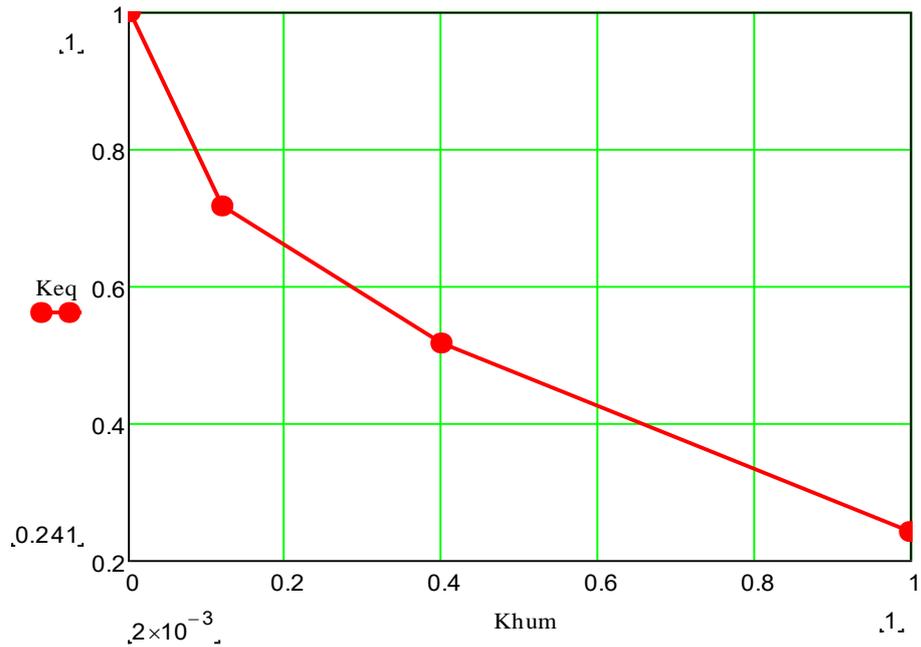
Допустимая вероятность (вероятность отказа) $[P]$ принимается в зависимости от значения приемлемого риска на исследуемой территории. Чем богаче государство, тем меньше принимают допустимую вероятность [28, 44, 27]. В нашем случае принято $[P] = 1/2000$, как наиболее распространенное решение при назначении допустимых рисков.

Вероятность возникновения землетрясения P_{eq} силой I баллов тесно связана с повторяемостью T_{eq} или с сотрясаемостью $L=1/ T_{eq}$ [9.,11, 27,28,74,75, 91].

В соответствии с формулами (3.1) и (3.2) были рассмотрены равновероятные пары, то есть (число людей N , сила землетрясения I). Результаты были сведены в таблицу 3.1. По значениям коэффициента сочетания для силы землетрясения K_{eq} и коэффициента сочетания для числа людей K_{hum} , был построен график (рисунок 3.2) зависимости между этими коэффициентами [4].

Таблица 3.1– Коэффициенты сочетания для землетрясений и людей

Коэффициент сочетания для силы землетрясения	Коэффициент сочетания для числа людей	Расчетная интенсивность, в баллах	Пиковое ускорение грунта, м/с ²	Сотрясаемость	Вероятность возникновения землетрясения	Вероятность наличия людей	Число людей
K_{eq}	K_{hum}	I	PGA	L	P_{eq}	P_{hum}	N
0.241	1	6	0.4	1/100	0.0005	0.05	2500
0.517	0.4	6.823	0.858	1/500	0.0001	0.25	1000
0.717	0.12	7.177	1.19	1/1000	0.002	0.5	300
1	0.002	7.531	1.66	1/2000	0.01	1	5

Рисунок 3.2– Зависимость между коэффициентом сочетания к числу людей K_{hum} и коэффициентом сочетания к силе землетрясения K_{eq} .

Чтобы оценить вероятность количества людей, посещающих мечеть, была собрана статистика посещения мечети каждый день людьми; число людей в мечети обозначено через N. Для оценки величины N. Выявлялись дни с пиковым

числом посетителей N_{\max} . Математическое ожидание числа людей получилось $\bar{D} = 1088$ чел., а среднеквадратичное отклонение $\sigma = 775$.

Было принято β -распределение чтобы описать функцию распределения заполненности мечети людьми [4].

Функция плотности вероятности β -распределения [84]:

$$p(x) = \frac{x^{\nu} \cdot (1-x)^{\mu}}{B(\nu, \mu)}, \quad (3.3)$$

Здесь μ и ν - параметры распределения, $B(\nu, \mu)$ - β -функция.

Параметры распределения μ и ν можно вычислить по формулам (3.4) и (3.5), при условии что нам известны дисперсия σ^2 случайной величины и математическое ожидание \bar{D} :

$$\nu = \frac{1 - \bar{D} - V \cdot \bar{D}}{V} \quad (3.4)$$

$$\mu = \frac{\nu}{D} - \nu \quad (3.5)$$

Здесь V - коэффициент вариации можно вычислить по формуле (3.6):

$$V = \frac{\sigma^2}{R^2} \quad (3.6)$$

учтем, что, в соответствии с [89-90] σ^2 дисперсия (разброс) можно вычислить по формуле (3.7):

$$\sigma^2 = (0.2 \div 0.4) \cdot R \quad (3.7)$$

На основании перечисленных выше значений дисперсии σ^2 и математического ожидания \bar{D} построен график Функция плотности распределения (ф.п.р.) заполненности мечети людьми (рисунок 3.3) Функция была задана на отрезке от нуля до единицы, где ноль означает полное отсутствие людей, а единица означает полная заполненность мечети.

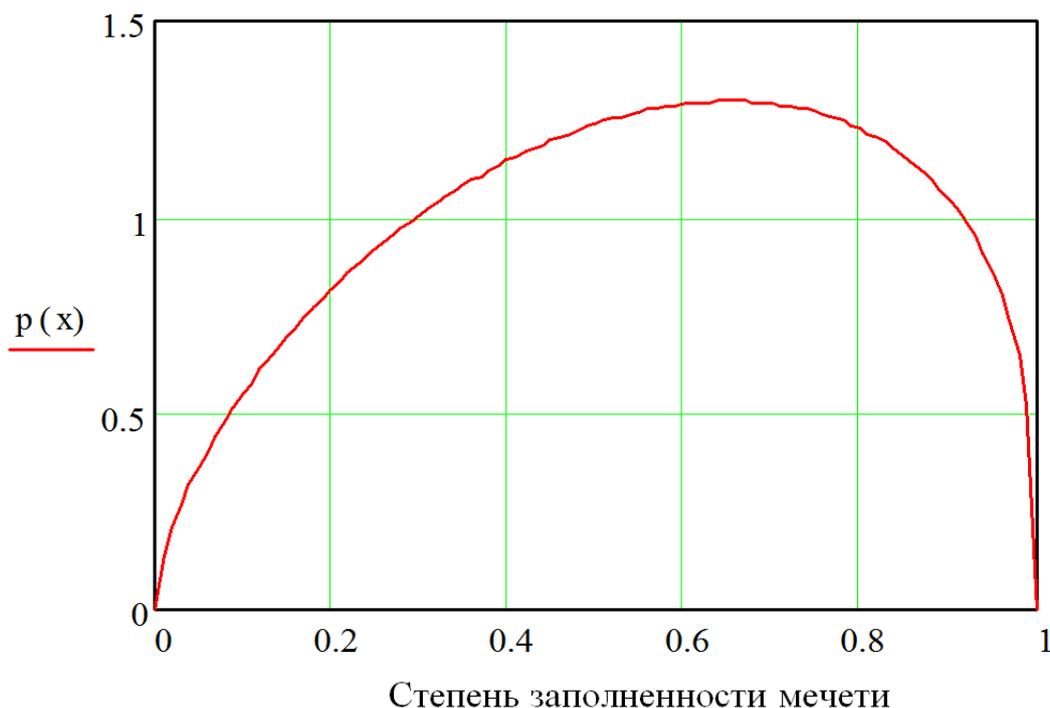


Рисунок 3.3– Функция плотности распределения заполненности мечети людьми.

Для возможности ввода в программу определения значения пиковых ускорений [89] обозначим их в соответствии с ситуационной сейсмичностью в РФ ($I_A=7$, $I_B=7$, $I_C=8$) при повторяемости землетрясений $T_A=100$, $T_B=500$ и $T_C=1000$ лет соответственно.

По заданной выше ситуационной сейсмичности и повторяемости воздействия для месторасположения мечети в г. Алеппо выполнялся расчет вероятности возникновения землетрясения в течении года P , расчетной балльности I и пиковых ускорений PGA при повторяемости землетрясений T_{eq} равной 100,500,1000 и 2000 лет. Для расчета была использована программа определения значения пиковых ускорений сейсмического воздействия, разработанная в ПГУПС профессором Уздиным А.М. и его учениками [89]. Для проведения расчетов преобладающий период воздействия был принят равным $T=0,4$ секунд. Этот период соответствует основному тону колебаний мечети без повреждений [4]. По результатам этого расчета найдены значения пиковых ускорений (PGA), в зависимости от вероятности превышения этих ускорений. Результаты расчетов показаны на рисунке 3.4.

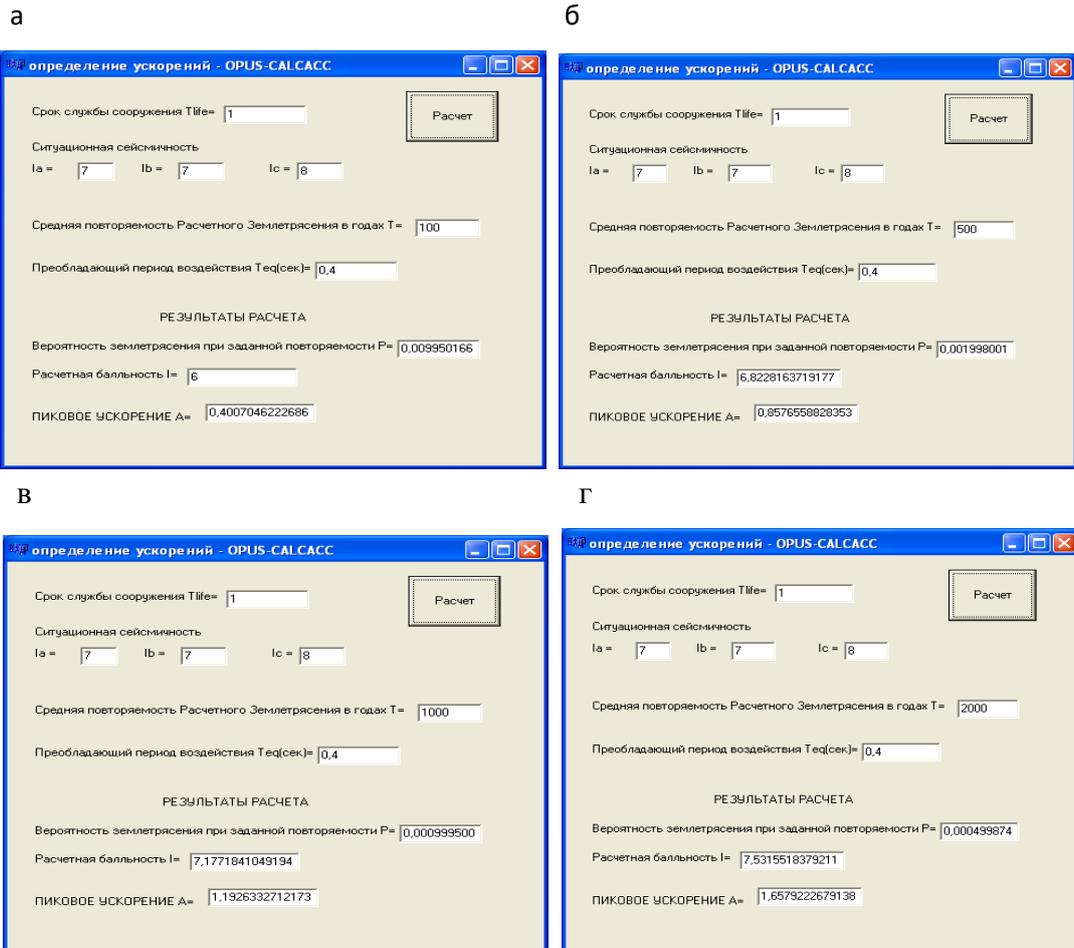


Рисунок 3.4 – Расчет вероятности землетрясений при заданной повторяемости P , расчетной балльности I и пиковых ускорений A :

а – при повторяемости расчетного землетрясения $T=100$ лет; б – при $T=500$ лет; в – при $T=1000$ лет; г – при $T=2000$ лет.

Необходимо провести расчеты на действие равновероятных пар (N, I) , расчеты можно провести по данным из таблицы 3.1 и графика (рисунок 3.2). Следует отметить, что сильное землетрясение вызывает сильные повреждения, но при этом маловероятно скопление большого числа людей в мечети.

Для выбора самого опасного варианта можно использовать теорию риска. Оценить математическое ожидание E затрат на усиление и ремонтно-восстановительные расходы при эксплуатации и усилении объекта можно по формуле 3.8 [24,89, 90,108]:

$$E = -I_{inv} - f \cdot (R_{ec} + R_{soc}) \quad , \quad (3.8)$$

где:

I_{inv} – это инвестиции на усиление сооружения,

R_{ec} – экономический сейсмический риск,

R_{soc} – социальный сейсмический риск.

Значение годового экономического риска можно оценить согласно известным разработкам для кирпичного [90] и по формуле 3.9:

$$De := \begin{pmatrix} 0.03 & 2.37 & 6.60 & 27.40 & 61.80 & 121.00 \\ 0 & 0.42 & 4.00 & 17.00 & 47.10 & 104.00 \\ 0 & 0.24 & 2.90 & 10.30 & 33.60 & 69.00 \\ 0 & 0.12 & 1.40 & 5.80 & 17.00 & 47.08 \end{pmatrix}$$

$$R = \sum_{I=5}^{I_{max}} (D(K_S, I) \cdot L(I)) \quad (3.9)$$

Где:

$D(K_S, I)$ - функция экономической уязвимости, которая зависит от класса сейсмостойкости здания K_S и силы землетрясения I [4].

Суммарный годовой риск (формула 3.10) представлен в форме, предложенной в работе [108].

$$R = \sum_{I=5}^{I_{max}} (D_{ec}(K_S, I) + \chi D_{soc}(K_S, I))L(I) \quad (3.10)$$

Где: $D_{ec}(K_S, I)$ платежная матрица экономического ущерба, $D_{soc}(K_S, I)$ - платежная матрица социального ущерба.

К матрице социального ущерба был введен коэффициент χ , учитывающий отличие в количестве людей в мечети от среднестатистических данных,

использованных в работах [90]. Еще этот коэффициент может учитывать изменение в стоимости человеческой жизни. $L(I)$ сотрясаемость территории.

Значение социального риска тесно связана с компенсациями семьям в связи с гибелью людей. обычно, это значение связана со страхованием человеческой жизни. В нашей задаче социальный риск является определяющим [4]. В работах [51, 90] есть платежная матрица для социальных потерь (таблица 3.2). Данная матрица принята для России, с учетом того что стоимость человеческой жизни (т. е. страховка) равна 1.6 млн. руб. она отнесена к стоимости кирпичного здания, иначе говоря представлена в безразмерном виде. Используя ее можно найти социальный риск аналогично нахождению экономического [4, 17].

Таблица 3.2– Значения социальных потерь (социальная уязвимость) в зависимости от класса сейсмостойкости K_s и интенсивности землетрясения I

Класс сейсмостойкости K_s , баллы	Интенсивность I , баллы, (A_I , m/c^2)					
	5	6 (0.5)	7 (1)	8 (2)	9 (4)	10 (8)
6	0	0	0,1	1	8	15
7	0	0	0	0,1	1	8
8	0	0	0	0,05	0,55	4,5
9	0	0	0	0	0,1	1

Запишем таблицу 3.2 в виде матрицы:

$$D := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 1 & 8 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0.55 & 4.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 \end{pmatrix}$$

Введем в матрицы экономического и социального ущерба дополнительные столбцы для расчетных интенсивностей $I = 6.823; 7.177; 7.531$ и получим:

Матрица экономического ущерба:

$$De := \begin{pmatrix} 0.03 & 2.37 & 5.85 & 6.60 & 10.28 & 17.64 & 27.40 & 61.80 & 121.00 \\ 0.00 & 0.42 & 3.37 & 4.00 & 6.30 & 10.90 & 17.00 & 47.10 & 104.00 \\ 0.00 & 0.24 & 2.43 & 2.90 & 4.21 & 6.83 & 10.30 & 33.60 & 69.00 \\ 0.00 & 0.12 & 1.17 & 1.40 & 2.18 & 3.74 & 5.80 & 17.00 & 47.08 \end{pmatrix}$$

Матрица социального ущерба:

$$Ds := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.08 & 0.1 & 0.26 & 0.58 & 1 & 8 & 15 \\ 0 & 0 & 0.07 & 0.05 & 0.58 & 0.77 & 0.1 & 1 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.03 & 0.05 & 0.55 & 4.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 \end{pmatrix}$$

В матрицах экономического и социального ущерба подсчитаны строки (значения D) дополнительно для I=6.823; 7.177; 7.531.

Необходимо учесть, что строки матриц соответствуют классам сейсмостойкости [82] здания K_s : верхняя строка соответствует $K_s=6$ а нижняя соответствует $K_s=9$.

Столбцы платежных матриц соответствуют интенсивности землетрясения I: первый столбец соответствует I=5, а последний I=10.

Матрица социального ущерба выражена в долях, поэтому умножим все ее элементы на 100 и получим следующую матрицу:

$$Ds := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 8 & 10 & 26 & 58 & 100 & 800 & 1500 \\ 0 & 0 & 7 & 5 & 58 & 77 & 10 & 100 & 800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 5 & 55 & 450 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 100 \end{pmatrix}$$

Введем коэффициент χ который учитывает отличие в количестве людей в мечети от среднестатистических данных использованных в первоначальной матрице социального ущерба для России [51,90] коэффициент χ получен разделением количества людей в мечети на среднее число людей принятое равным 300 человек (таблица 3.1). Все элементы первой строки матрицы умножены на $\chi=8.333$; все элементы второй строки матрицы умножены на $\chi=3.333$; все элементы третьей строки матрицы умножены на $\chi=1$; все элементы

четвертой строки матрицы умножены на $\chi=0,017$ в результате получим следующую матрицу:

$$D_s := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 66.66 & 83.33 & 216.66 & 483.31 & 833.3 & 6666.4 & 12499.5 \\ 0 & 0 & 23.33 & 16.67 & 193.31 & 256.64 & 33.33 & 333.3 & 2666.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 5 & 55 & 450 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 1.7 \end{pmatrix}$$

3.3. Расчет рисков и оценка ущерба при землетрясениях 7,8,9 балльных воздействиях

Матрица социального ущерба D_s была приведена ранее и имеет вид:

$$D_s := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 66.66 & 83.33 & 216.66 & 483.31 & 833.3 & 6666.4 & 12499.5 \\ 0 & 0 & 23.33 & 16.67 & 193.31 & 256.64 & 33.33 & 333.3 & 2666.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 5 & 55 & 450 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 1.7 \end{pmatrix}$$

Чтобы можно было использовать бета-распределение, разделим все элементы матрицы социального ущерба на максимальную величину ущерба, равную 12499.5. Тогда матрица нормированного социального ущерба примет вид:

$$D_s := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.01 & 0.0000005 & 0.017 & 0.039 & 0.067 & 0.53 & 1 \\ 0 & 0 & 0.0018 & 0.0013 & 0.015 & 0.021 & 0.0026 & 0.026 & 0.213 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00008 & 0.00024 & 0.0004 & 0.0044 & 0.036 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000014 & 0.00014 \end{pmatrix}$$

Матрица экономического ущерба D_e также была приведена ранее:

$$D_e := \begin{pmatrix} 0.03 & 2.37 & 5.85 & 6.60 & 10.28 & 17.64 & 27.40 & 61.80 & 121.00 \\ 0.00 & 0.42 & 3.37 & 4.00 & 6.30 & 10.90 & 17.00 & 47.10 & 104.00 \\ 0.00 & 0.24 & 2.43 & 2.90 & 4.21 & 6.83 & 10.30 & 33.60 & 69.00 \\ 0.00 & 0.12 & 1.17 & 1.40 & 2.18 & 3.74 & 5.80 & 17.00 & 47.08 \end{pmatrix}$$

После нормирования этой матрицы по аналогии с нормированием матрицы социального ущерба, то есть после деления всех элементов матрицы экономического ущерба на 121 и получим:

$$De := \begin{pmatrix} 0.0002 & 0.0195 & 0.05 & 0.054 & 0.08 & 0.145 & 0.23 & 0.51 & 1 \\ 0.00 & 0.0034 & 0.03 & 0.033 & 0.05 & 0.09 & 0.14 & 0.39 & 0.86 \\ 0.00 & 0.001 & 0.02 & 0.023 & 0.03 & 0.056 & 0.09 & 0.28 & 0.57 \\ 0.00 & 0.0009 & 0.01 & 0.011 & 0.02 & 0.031 & 0.05 & 0.14 & 0.39 \end{pmatrix}$$

Складываем элементы матриц социального и экономического ущербов, тем самым, находим матрицу суммарных ущербов:

$$D := \begin{pmatrix} 0.0002 & 0.0195 & 0.06 & 0.054005 & 0.119 & 0.212 & 0.297 & 1.04 & 2 \\ 0.00 & 0.0034 & 0.0318 & 0.0343 & 0.071 & 0.0926 & 0.1426 & 0.416 & 1.073 \\ 0.00 & 0.001 & 0.02 & 0.023 & 0.03024 & 0.05624 & 0.0904 & 0.2844 & 0.606 \\ 0.00 & 0.0009 & 0.01 & 0.011 & 0.02 & 0.031 & 0.05 & 0.140014 & 0.39014 \end{pmatrix}$$

Принимаем среднюю повторяемость землетрясений T и сотрясаемость $L=1/T$:

$$T := \begin{pmatrix} 10 \\ 50 \\ 91.15 \\ 100 \\ 170.80 \\ 312.40 \\ 500 \\ 1000 \\ 5000 \end{pmatrix} \quad L := \frac{1}{T} = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.011 \\ 0.01 \\ 5.855 \times 10^{-3} \\ 3.201 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-3} \\ 1 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Социальные риски R_s для различных классов сейсмостойкости K_s находим по формуле (3.9):

$$i := 0..8$$

Для $K_s=6$

$$Rs6 := \sum_{i=0}^8 (Ds_{0,i} \cdot L_i) = 15.213$$

Для $K_s=7$

$$Rs7 := \sum_{i=0}^8 (Ds_{1,i} \cdot L_i) = 3.309$$

$$\text{Для } K_S=8 \quad R_{s8} := \sum_{i=0}^8 (D_{s_{2,i}} \cdot L_i) = 0.12$$

$$\text{Для } K_S=9 \quad R_{s9} := \sum_{i=0}^8 (D_{s_{3,i}} \cdot L_i) = 5.1 \times 10^{-4}$$

Экономические риски R_e для различных классов сейсмостойкости K_s находим аналогично социальным по формуле (3.9):

$$\text{Для } K_S=6 \quad R_{e6} := \sum_{i=0}^8 (D_{e_{0,i}} \cdot L_i) = 0.438$$

$$\text{Для } K_S=7 \quad R_{e7} := \sum_{i=0}^8 (D_{e_{1,i}} \cdot L_i) = 0.259$$

$$\text{Для } K_S=8 \quad R_{e8} := \sum_{i=0}^8 (D_{e_{2,i}} \cdot L_i) = 0.175$$

$$\text{Для } K_S=9 \quad R_{e9} := \sum_{i=0}^8 (D_{e_{3,i}} \cdot L_i) = 0.092$$

Суммарные риски R для различных классов сейсмостойкости K_s находим по формуле (3.10):

Для $K_S=6$	$R_{6sum} := R_{e6} + R_{s6} = 15.651$	для не усиленного здания
Для $K_S=7$	$R_{7sum} := R_{e7} + R_{s7} = 3.568$	для усиленного здания на 7 баллов
Для $K_S=8$	$R_{8sum} := R_{e8} + R_{s8} = 0.295$	для усиленного здания на 8 баллов
Для $K_S=9$	$R_{9sum} := R_{e9} + R_{s9} = 0.092$	для усиленного здания на 9 баллов

На рисунке 3.5 приведен график зависимости между классом сейсмостойкости и суммарным риском, который состоит из экономического риска и социального риска умноженного на коэффициент χ .

$$i := 0..3$$

$$K_s := \begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix}$$

$$R_{ww} := \begin{pmatrix} 15.651 \\ 3.568 \\ 0.295 \\ 0.092 \end{pmatrix}$$

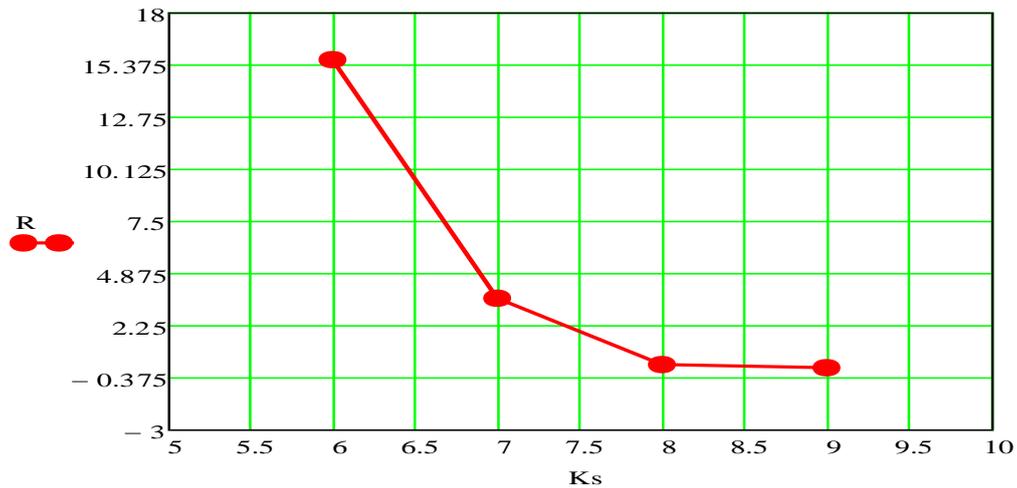


Рисунок 3.5 – График зависимости между суммарным риском R_{sum} и классом сейсмостойкости K_s .

Расчёты Ф.п.р. (функции плотности распределения) ущерба для 7,8,9, и 10-балльных воздействий при классе сейсмостойкости $K_s=7$ баллов, при $K_s=8$ баллов и при $K_s=9$ баллов приведены в конце диссертации в приложениях Б, В и Г соответственно.

3.4. Расчет требуемого класса сейсмостойкости для здания мечети

-Суммарные затраты (ΔE) на антисейсмическое усиление здания определяются по формуле:

$$\Delta E = -\Delta K - f \cdot R$$

где: $f = \frac{1-v^n}{1-v}$ или $f = \frac{1}{1-v}$ это коэффициент учитывающий суммирование

годовых затрат по годам службы здания n ; $v = 0,8 \dots 0,9$

Принимаем: $\nu = 0.9$

Следовательно $f = \frac{1}{1-\nu} = \frac{1}{1-0.9} = 10$

$$K_s := \begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix} \quad R := \begin{pmatrix} 15.651 \\ 3.568 \\ 0.295 \\ 0.092 \end{pmatrix} \quad f \cdot R = \begin{pmatrix} 156.51 \\ 35.68 \\ 2.95 \\ 0.92 \end{pmatrix}$$

Где:

K_s —класс сейсмостойкости;

R —риски суммарные;

$f \cdot R$ — риски для зданий от землетрясений в зависимости от их класса сейсмостойкости.

Для грунтов первой группы затраты на усиление здания:

$$I_{in \nu I} := 0.08 \cdot (K_s - 6) + 0.3 \cdot (K_s - 6)^2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.38 \\ 1.36 \\ 2.94 \end{pmatrix}$$

Для грунтов второй группы затраты на усиление здания:

$$I_{in \nu II} := I_{in \nu I} \cdot 1.15 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.437 \\ 1.564 \\ 3.381 \end{pmatrix}$$

Для грунтов третьей группы затраты на усиление здания:

$$I_{in \nu III} := I_{in \nu I} \cdot 1.4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.532 \\ 1.904 \\ 4.116 \end{pmatrix}$$

Принимаем затраты на усиление здания для грунтов второй группы.

$$I_{inv\Pi} := I_{inv\Pi} \cdot 1.15 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.437 \\ 1.564 \\ 3.381 \end{pmatrix}$$

Суммарные затраты (ΔE) на антисейсмическое усиление здания:

$$\Delta E := I_{inv\Pi} + f \cdot R = \begin{pmatrix} 156.51 \\ 36.117 \\ 4.514 \\ 4.301 \end{pmatrix}$$

Далее строим графики зависимости рисков и затрат на сейсмоусиление здания с учетом экономических и социальных потерь (рисунок 3.6).

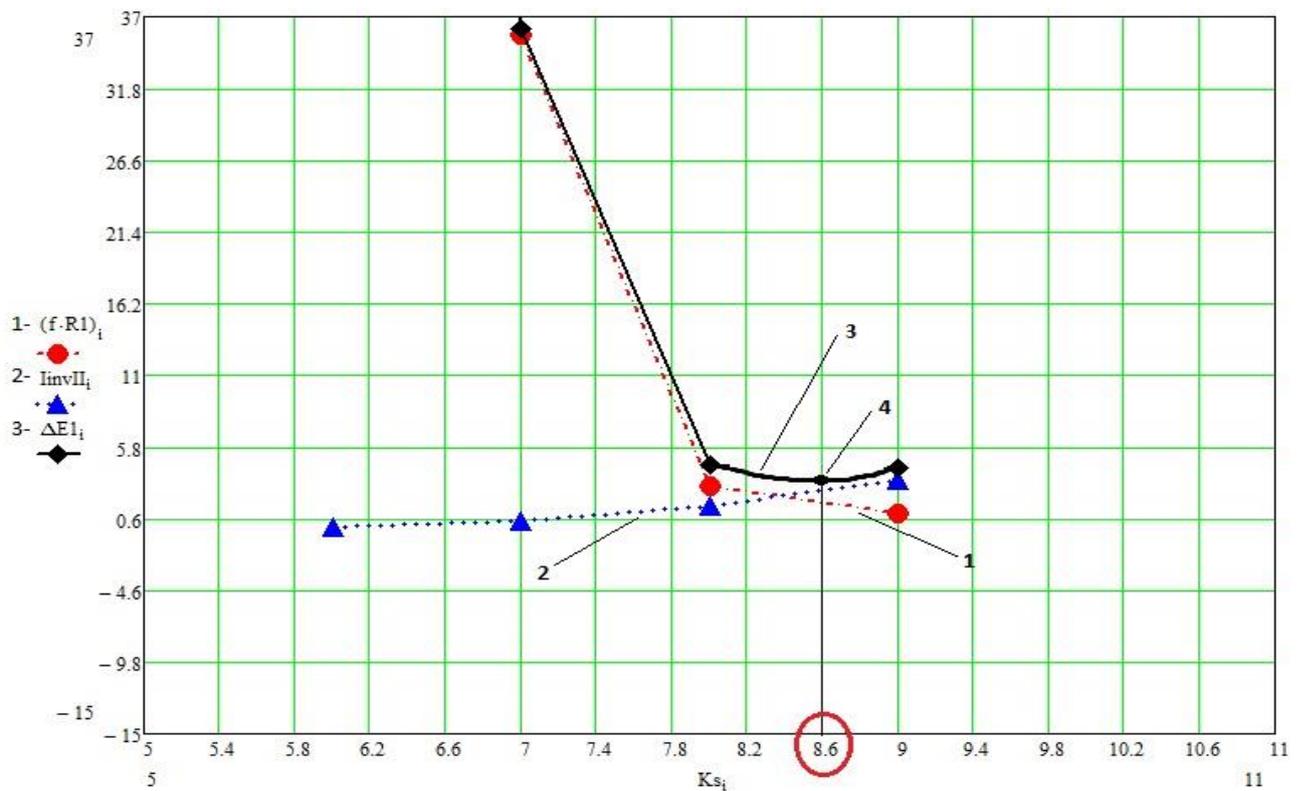


Рисунок 3.6 – Графики зависимости рисков и затрат на сейсмоусиления здания с учетом социальных потерь:

график 1 – $f \cdot R (K_s)$ показывает риски от землетрясения для здания, в зависимости от класса её сейсмостойкости; график 2 – $I_{inv} (K_s)$ затраты на усиление здания с классом сейсмостойкости $K_s=6,7,8$ и 9; график 3 – $\Delta E (K_s)$ показывает суммарные затраты на сейсмоусиление здания; точка 4 – показывает оптимальное значение класса сейсмостойкости (K_s) здания.

Численная оптимизация функции затрат (E) дала результат (N, K_s) где $N=2500$ человек- число людей, $K_s=8,6$ - класс сейсмостойкости. По существу, была выбрана пара, в которой выбранному риску соответствует сила 8.6 балла с соответствующим заполнением мечети людьми. На графике (рисунок 3.6) точка 4 показывает оптимальное значение класса сейсмостойкости здания с учетом социальных потерь. Она соответствует классу сейсмостойкости $K_s = 8.6$ баллов и означает, что экономически целесообразно усилить здание с учётом этого значения. Установленный класс сейсмостойкости был использован в последующих главах при рассмотрении вопросов повышения сейсмостойкости культового здания мусульманского зодчества.

3.5 Выводы по главе

1. Разработана методологическая основа сейсмоусиления на основании реальной оценки класса их сейсмостойкости с учётом экономических и социальных рисков, которая включает следующие этапы:
 - Первой задачей методики, использованной в этой главе, является задание функции распределения интенсивности землетрясений P_{eq} .
 - Второй задачей является задание функции распределения для количества людей в мечети P_{hum} .
 - Третьей задачей является задание критерия опасности пары (число людей, сила воздействия). В качестве такого критерия в работе принята стоимость затрат, вызванных возможными землетрясениями. Такой подход к выбору опасной пары рассматривается впервые. Все поставленные задачи были решены.
2. Исследование полученных в результате расчёта графиков функции распределения ущерба (ф.п.р.) показывает, что класс сейсмостойкости сильно влияет на распределение ущербов. Чем выше класс

сейсмостойкости K_s , тем меньше вероятность полного разрушения здания.

3. По существу, была выбрана пара, то есть выбранному риску соответствует сила 8.6 баллов и соответствующая заполненность мечети людьми 2500 человек.
4. Исследование полученных в результате расчёта графиков зависимости рисков и затрат на сейсмоусиления здания с учетом социальных потерь показывает, что экономически целесообразно усилить здание на 8,6 баллов.

В этой связи в следующих двух главах представлены результаты исследования по сейсмоусилению и восстановлению разрушенных частей с помощью известных традиционных и нетрадиционных подходов, с учётом установленного в этой главе класса сейсмостойкости $K_s=8,6$ баллов с последующей расчетно-теоретической оценкой сейсмостойкости культовых зданий и до, и после использования принятых решений.

ГЛАВА 4. РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ В Г. АЛЕППО ДО, ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ И ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В третьей главе был установлен класс сейсмостойкости для здания Великой мечети в г. Алеппо на который необходимо проводить его усиление. Поэтому возникла необходимость в исследовании сейсмостойкости этого здания до и после разрушения. Предложить способы сейсмоусиления. Для этого был выполнен обзор основных способов сейсмоусиления зданий и сооружений, преимущественно построенных из каменной кладки, как традиционных, так и нетрадиционных решений, и выполнена расчетно-теоретическая оценка сейсмостойкости принятых традиционных подходов повышения сейсмостойкости после восстановления.

4.1 Исследование сейсмостойкости здания Великой мечети г. Алеппо до и после разрушения

Для исследования была построена расчётная модель Великой мечети в г. Алеппо, для чего потребовалось изучить подробно её планировку. Для построения первой расчётной модели были рассмотрены объемно-планировочные решения Великой мечети в г. Алеппо, представленные на рисунках (4.1- 4.3)

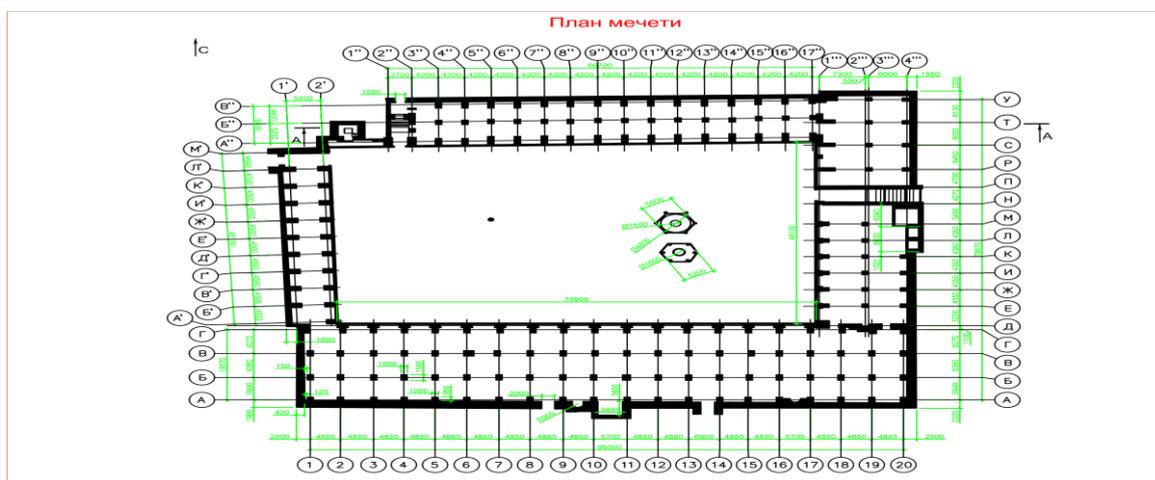


Рисунок 4.1 – План Великой мечети г.Алеппо.

Далее была выполнена расчетно-теоретическая оценка сейсмостойкости здания мечети до и после разрушений.

Расчет выполнялся в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016, позволяющий получить все необходимые параметры системы, такие как усилия в элементах, перемещения, периоды колебаний, а также визуализировать формы колебаний.

Расчетные модели состоят из пластин. Ленточный фундамент под стенами мечети моделируется пластинами толщиной 2,5 метра, ленточный фундамент под минаретом пластины толщиной 3,5 метра. Стены моделируются пластинами толщиной 500 мм. Покрытие и пол моделируются пластинами толщиной 200 мм.

Расчетная модель построена с использованием модуля Лира-грунт позволяющее, учесть характеристики грунтового [69] основания под зданием (рисунок 4.4).

№	Усл.	Наименование грунта	Цвет	Модуль деформации, т/м ²	Коэффициент Пуассона	Удельный вес грунта, т/м ³	Коэффициент пористости	Природная влажность, доли	Показатель текучести IL	Водянистость	Коэффициент пористости	Удельное сцепление	Угол трения	Предельное напряжение	Коэффициент пропорциональности K _c	и код грунта
1		Суглинок		1100	0.35	2.7		5	0.05	0.3		1	1.5	17	0.1	1560 Cs
7																Глина тугопластичная или полутвердая IL=0...0.75, K=1800...1200 тс/м ²

Рисунок 4.4 – Характеристики грунта.

На первом этапе исследования рассматривалась *первая модель*, соответствующая состоянию *до разрушений* и имеющая следующие жесткостные характеристики материалов:

Для фундамента коэффициент альфа принят $\alpha = 1000$, $R = 0,8$ МПа, что соответствует бутовый камень марки 1000 на растворе марки 10. Следовательно модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке для фундамента равен: $E = 1000 \cdot 2 \cdot 0,8 = 1600$ МПа = 163098,8787 т/м²

Для стены коэффициент альфа $\alpha = 1000$ $R=6,0$ МПа, что соответствует природный камень марки 600 на растворе марки 10. Следовательно модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке равен: $E=1000 \cdot 2 \cdot 6,0=12000$ МПа= 1223241,59021 т/м².

Расчётная модель №1 представлена на рисунке 4.5.

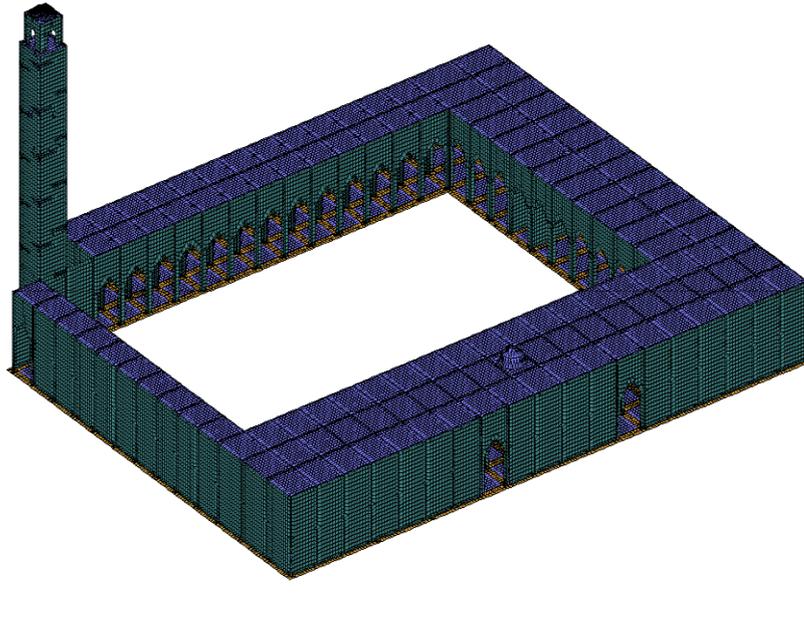


Рисунок 4.5 – Расчётная модель №1 Великой мечети в г. Алеппо соответствующая состоянию до разрушений.

На втором этапе исследования рассматривалась *вторая модель*, соответствующая состоянию *после разрушений*, имеющая следующие исходные данные и жесткостные характеристики материалов:

Для фундамента коэффициент альфа принят $\alpha = 750$, $R=0,5$ МПа, что соответствует бутовый камень марки 1000 на растворе марки 4. Следовательно модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке для фундамента равен: $E=750 \cdot 2 \cdot 0,5=750$ МПа= 76452,59939 т/м²

Для стены коэффициент альфа $\alpha = 750$ $R=5,5$ МПа, что соответствует природный камень марки 600 на растворе марки 4. Следовательно модуль

упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке равен: $E=750 \cdot 2 \cdot 5,5= 8250 \text{ МПа}= 840978,59327 \text{ т/м}^2$.

Для задания характеристик кладки и моделировании разрушений и трещин были понижены марка раствора и соответственно модуль упругости кладки по сравнению со значениями для состояния здания до разрушений.

Расчётная модель №2 представлена на рисунке 4.6.

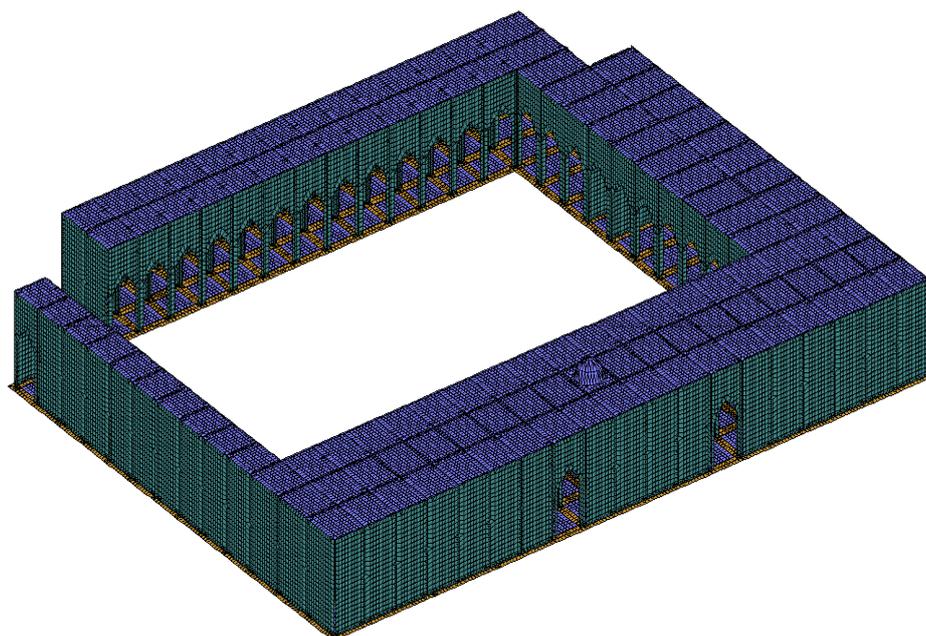


Рисунок 4.6 – Расчётная модель №2 Великой мечети в г. Алеппо соответствующая состоянию после разрушений.

Жесткостные характеристики материалов, определялись по СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции [78].

Модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке должен приниматься равным:

Для неармированной кладки по формуле 4.2

$$E_0 = \alpha R_u , \quad (4.2)$$

где α – упругая характеристика кладки, принимается по таблице 16 СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции [78];

R_u – временное сопротивление (средний предел прочности) сжатию кладки, определяемое по формуле 4.3

$$R_u = kR \quad , \quad (4.3)$$

где

k – коэффициент, принимаемый по таблице 4.1, приведённая в СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции под номером 15;

R – расчётные сопротивления сжатию кладки, принимаемые по таблицам 2–10 СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции [78] с учетом коэффициентов, приведенных в примечаниях к этим таблицам, а также в 6.10-6.15 этого же СП [78].

Таблица 4.1 – Виды кладки.

№№	Вид кладки	Коэффициент k
1	Из кирпича и камней всех видов, из крупных блоков, рваного бута и бутобетона, кирпичная вибрированная	2,0
2	Из крупных и мелких блоков из ячеистых бетонов	2,2

Для определения усилий в конструкции, перемещений, периодов и частоты колебания в результате действия сейсмических сил на первых двух этапах использовалась спектральная методика, представленная в СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [77]. Данная методика подразумевает моделирование реального здания одним стержнем с расположенными на нем массами. Расчетная сейсмическая нагрузка, приложенная к узловой точке расчетно-динамической модели и соответствующая i -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, определяется по формуле 4.4:

$$S_{oik}^j = m_k^j A \beta_i \cdot K_\psi \eta_{ik}^j \quad (4.4)$$

где m_k^j - масса здания или момент инерции соответствующей массы здания, отнесенные к точке k по обобщенной координате j , определяемые с учетом расчетных нагрузок на конструкции согласно 5.1 СП 14.13330.2018 [77];

A - значение ускорения в уровне основания. Принимаемое ускорение в расчётах варьировалось от равным 1,0 до 4,0 м/с²;

β_i - коэффициент динамичности, соответствующий j -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, принимаемый в соответствии с 5.6 СП 14.13330.2018;

K_ψ - коэффициент, принимаемый по таблице 5 СП 14.13330.2018 [77];

η_{ik}^j - коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки [23,46] и направления сейсмического воздействия, определяемый по п. 5.7, 5.8 СП 14.13330.2018 [77].

Кроме того, необходимо перевести массы и нагрузки из статических в динамические. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2016 переводит статические нагрузки в динамические (в том числе в сейсмические). Для этого необходимо задать все статические нагрузки. В таблице 4.2 представлен сбор нагрузок на расчетную схему, который производился согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [81].

Таблица 4.2 – Нагрузки на 1 м² принятые при расчете конструкций

№ п.п.	Наименование	Норм.нагр узка кг/м ²	γ_c	Расчетная нагрузка кг/м ²	Прим.
Временные нагрузки					
2	Значение ветрового давления	Не учитывается согласно п.5.1 СП 14.13330.2018 [13]			

Продолжение таблицы 4.2

3	Равномерно распределенная эксплуатационная нагрузка на покрытие и минарет	50	1,3	65	
5	Временная нагрузка на пол	500	1,2	600	
Постоянные нагрузки					
1	Нагрузки от собственного веса несущих конструкций	Вычисляется в программе ЛИРА-САПР автоматически			
3	Нагрузка от полов	125	1,3	162,5	Нагрузки приняты условно
4	Нагрузка от конструкций кровли	30	1,3	39	

На первом этапе расчётного исследования были определены деформации по землетрясению интенсивностью 7 баллов. Для расчета на землетрясение интенсивностью 7 баллов в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016 были заданы основные характеристики: тип здания – общественные, тип грунта – I, ускорение грунта (для 7-и балльного землетрясения) и направление воздействия, перпендикулярное продольной оси здания, так как в этом направлении у здания минимальная жесткость и, соответственно, это наиболее опасное направление горизонтального воздействия [22,107].

На втором этапе расчётного исследования было выполнено исследование на действие сейсмической нагрузки по заданным трёхкомпонентным акселерограммам (таблица 4.3) с различной частотой колебаний для землетрясения уровня 8,6 баллов, соответствующего установленному ранее классу сейсмостойкости для здания Великой мечети в г. Алеппо:

1. Высокочастотное землетрясение ($T=0,1-0,3c$);
2. Среднечастотное землетрясение ($T=0,4-0,7c$);
3. Низкочастотное землетрясение ($T=1,0-1,7c$).

В таблице 4.3 представлены основные характеристики применяемых акселерограмм.

Таблица 4.3 – Характеристики акселерограмм

№ п.п.	Диапазон преобладающих периодов, с	Амплитуда максимального ускорения грунта, m/s^2	Шаг дискретизации, с	Количество точек	Время действия акселерограммы, с
1	0,1-0,3	1,298	0,0125	10500	131,2375
2	0,4-0,7	1,394	0,00781	16800	131,20019
3	1,0-1,7	1,166	0,01001	17430	174,46429

Стоит отметить, что согласно п. 5.2.2 из СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [77] ускорения грунта необходимо умножить на коэффициент $K_0=2$ (из таблицы 3 [77]). Коэффициент диссипации (параметр затухания) принят $\text{ksi}=0,05$ (значение по умолчанию в ПК ЛИРА-САПР 2016 для строительных конструкций).

4.2. Анализ результатов расчётно-теоретической оценки сейсмостойкости здания Великой мечети г. Алеппо до и после разрушения с учётом установленного класса сейсмостойкости

Для оценки сейсмостойкости конструкции проводилось сравнение максимальных перемещений по X и Y и максимальные значения M_x , M_y , N_x , N_y , Q_x , Q_y в уровне покрытия мечети.

Анализ результатов на первом этапе (по землетрясению интенсивностью 7 баллов)

Для сопоставления результатов расчёта на первом этапе было выполнено исследование на землетрясение интенсивностью 7 баллов.

До разрушений

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 4.4, 4.5, 4.6 и некоторые из них показаны на рисунках 4.7–4.8.

Таблица 4.4 – Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для 7 баллов.

	До разрушений	
	Максимальные перемещения по X (X_{\max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{\max} , мм)
7 баллов	4,93	4,48

Таблица 4.5 – Значения изгибающих моментов M_X , M_Y и продольных сил N_X , N_Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, при 7 баллов.

	До разрушений			
	Максимальные M_X кН·М	Максимальные M_Y кН·М	Максимальные N_X кН	Максимальные N_Y кН
7 баллов	224,5	214,7	3726,5	5133,9

Таблица 4.6 – Значения поперечных сил Q_X , Q_Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, при 7 баллов.

	До разрушений	
	Максимальные Q_X кН	Максимальные Q_Y кН
7 баллов	4815,0	4903,3

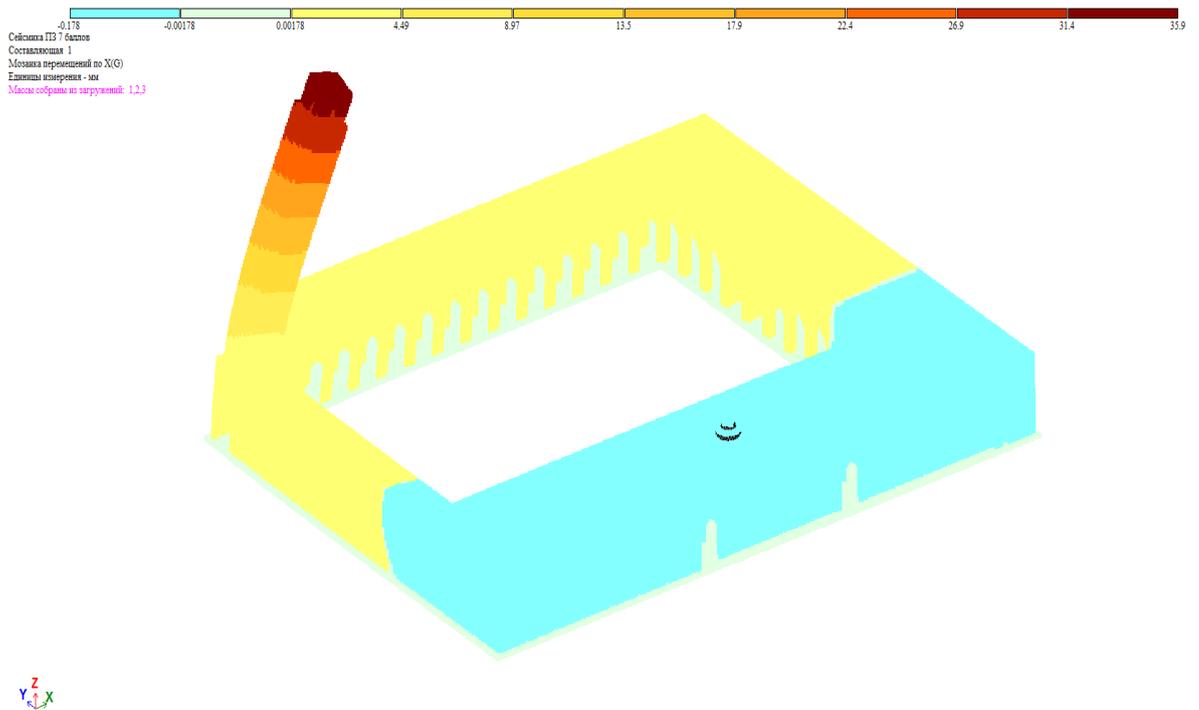


Рисунок 4.7 – Мозаика перемещений по X при землетрясении уровня 7 баллов до разрушений.

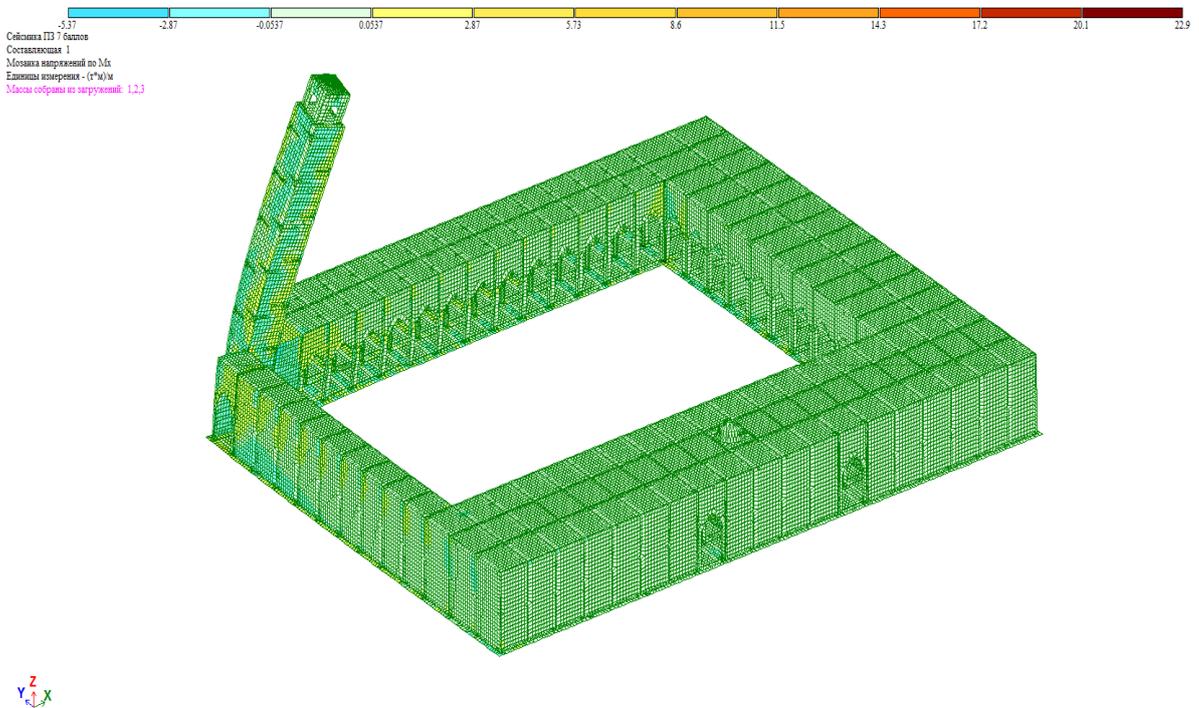


Рисунок 4.8 – Мозаика напряжений по M_x при землетрясении уровня 7 баллов до разрушений.

После разрушений:

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 4.7, 4.8, 4.9 и некоторые из них показаны на рисунках 4.9 – 4.10.

Таблица 4.7 – Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для 7 баллов.

	После разрушений	
	Максимальные перемещения по X (X_{\max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{\max} , мм)
7 баллов	4,67	6,17

Таблица 4.8 – Значения изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_x , N_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, при 7 баллов.

	После разрушений			
	Максимальные M_x кН·М	Максимальные M_y кН·М	Максимальные N_x кН	Максимальные N_y кН
7 баллов	598,1	1067,4	1667,1	1725,9

Таблица 4.9 – Значения поперечных сил Q_x , Q_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, при 7 баллов.

	После разрушений	
	Максимальные Q_x кН	Максимальные Q_y кН
7 баллов	2324,9	810,03

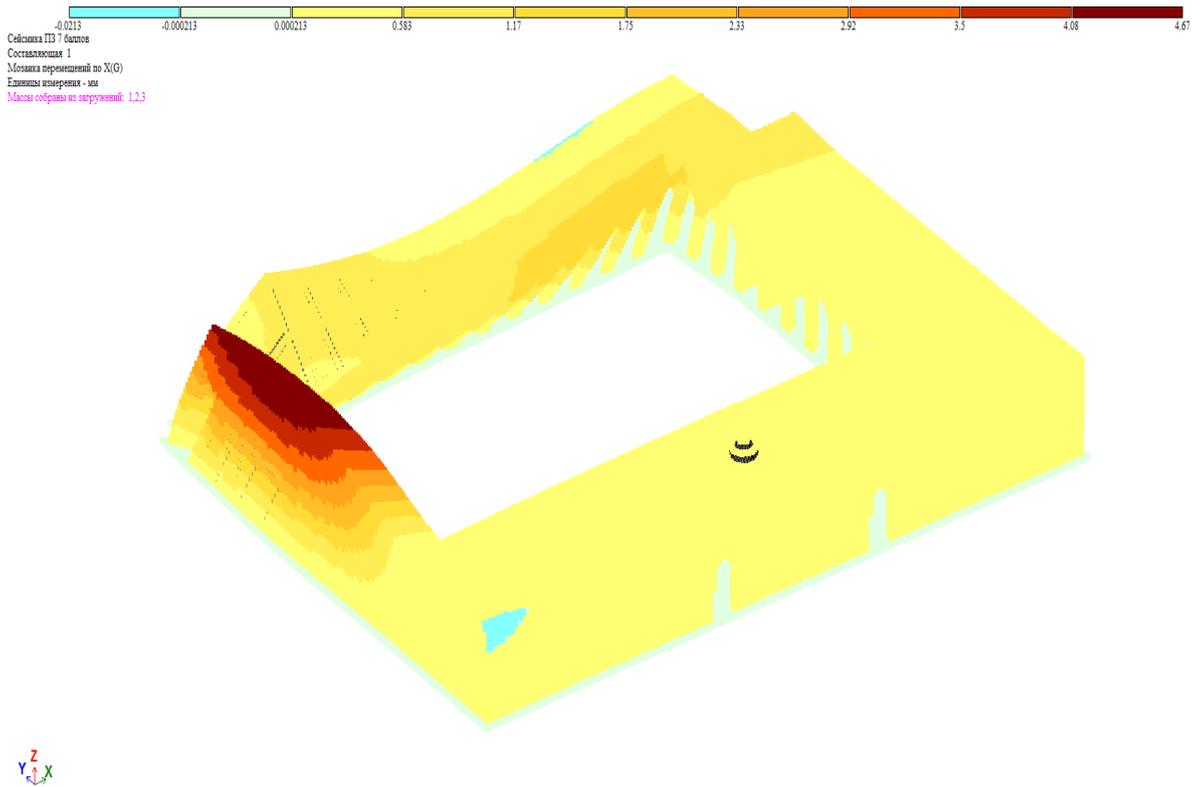


Рисунок 4.9 – Мозаика перемещений по X при землетрясении уровня 7 баллов после разрушений.

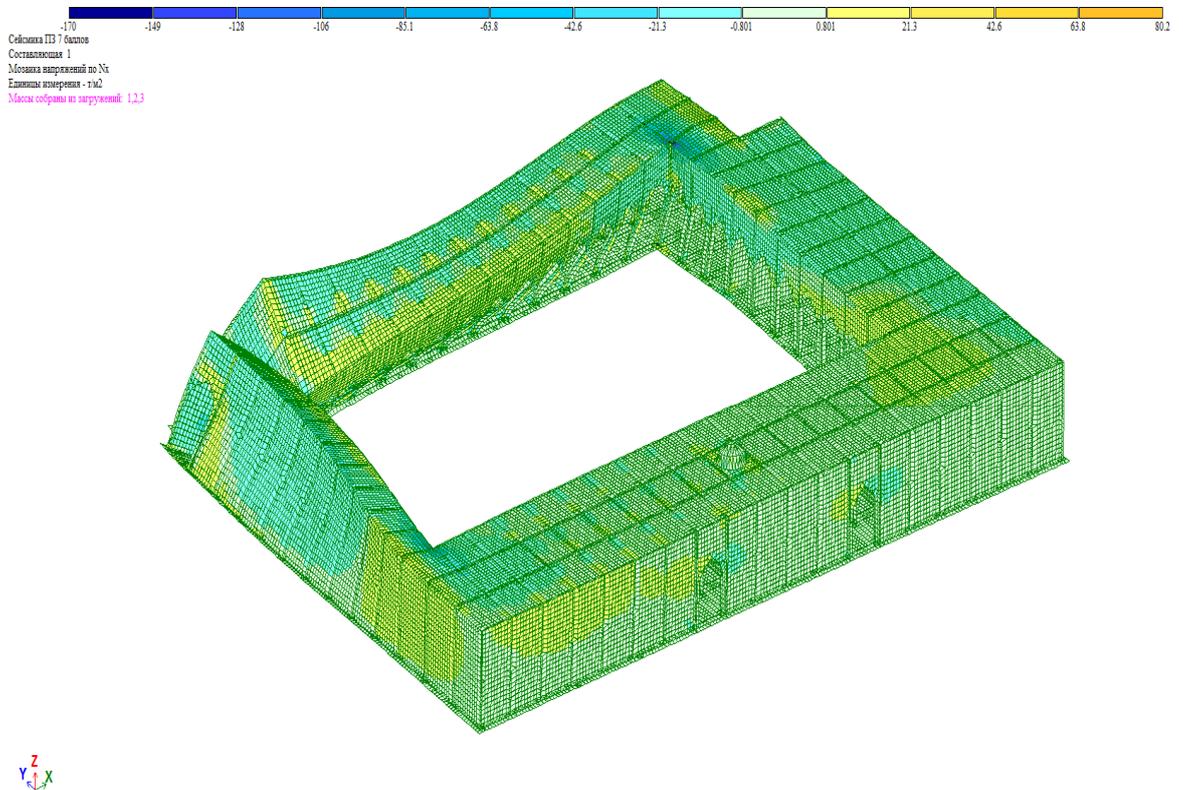


Рисунок 4.10 – Мозаика напряжений по N_x при землетрясении уровня 7 баллов после разрушений.

Анализ результатов на втором этапе (по заданным трёхкомпонентным акселерограммам) на землетрясение уровня 8,6 баллов соответствующего установленному классу сейсмостойкости

До разрушений

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 4.10 – 4.12 и некоторые из них показаны на рисунке 4.11.

Таблица 4.10 – Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения Т,с	До разрушений	
	Максимальные перемещения по X (X_{max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{max} , мм)
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	0,356	0,323
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	4,07	2,82
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	61,4	81,3

Таблица 4.11 – Значения изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_x , N_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения Т,с	До разрушений			
	Максимальные M_x кН·М	Максимальные M_y кН·М	Максимальные N_x кН	Максимальные N_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	16,08	15,49	266,74	400,11

Продолжение таблицы 4.11

Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	122,58	145,14	3147,9	4726,8
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	4256,1	3491,2	71294,7	65802,9

Таблица 4.12 – Значения поперечных сил Q_x , Q_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения $T, с$	До разрушений	
	Максимальные Q_x кН	Максимальные Q_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	345,19	352,06
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	2971,4	3157,7
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	83160,8	81493,6

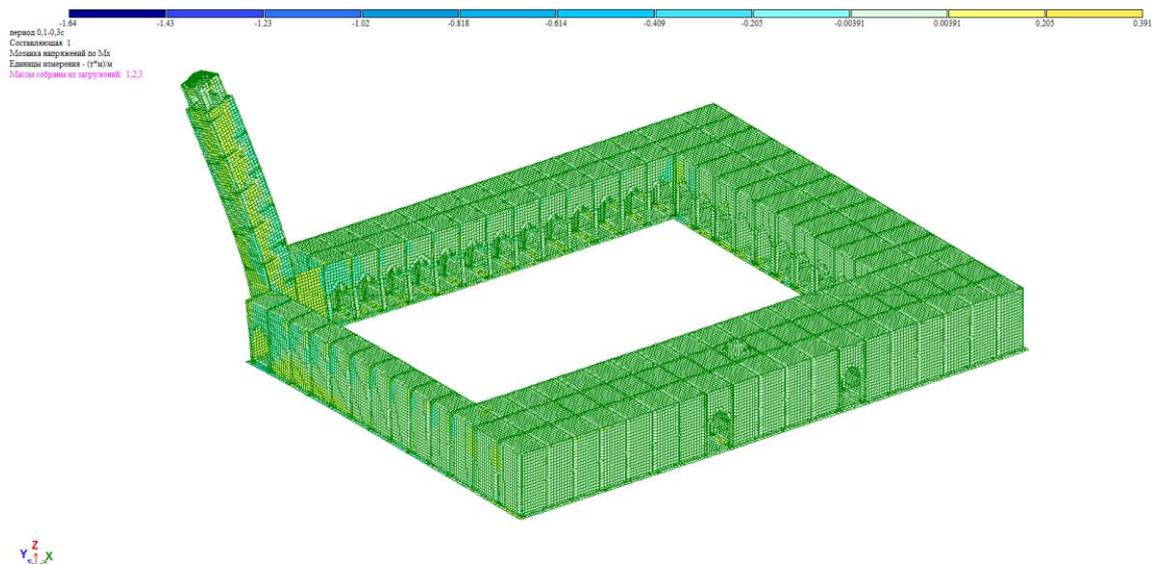


Рисунок 4.11 – Мозаика напряжений по M_x при высокочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов до разрушений.

После разрушений

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 4.13, 4.14, 4.15. и некоторые из них показаны на рисунках 4.12 – 4.13.

Таблица 4.13 Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения Т,с	После разрушений	
	Максимальные перемещения по X (X_{max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{max} , мм)
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	0,286	0,331
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	37,5	19,2
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	13,7	18,2

Таблица 4.14 – Значения изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_x , N_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения Т,с	После разрушений			
	Максимальные M_x кН·М	Максимальные M_y кН·М	Максимальные N_x кН	Максимальные N_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	3,28	5,93	87,47	89,92
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	220,65	792,38	10100,9	10493,1
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	206,9	324,6	5423,1	5648,6

Таблица 4.15 – Значения поперечных сил Q_x , Q_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

	После разрушений	
	Максимальные Q_x кН	Максимальные Q_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	123,56	44,32
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	4577,7	6796,04
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	7884,5	2422,2

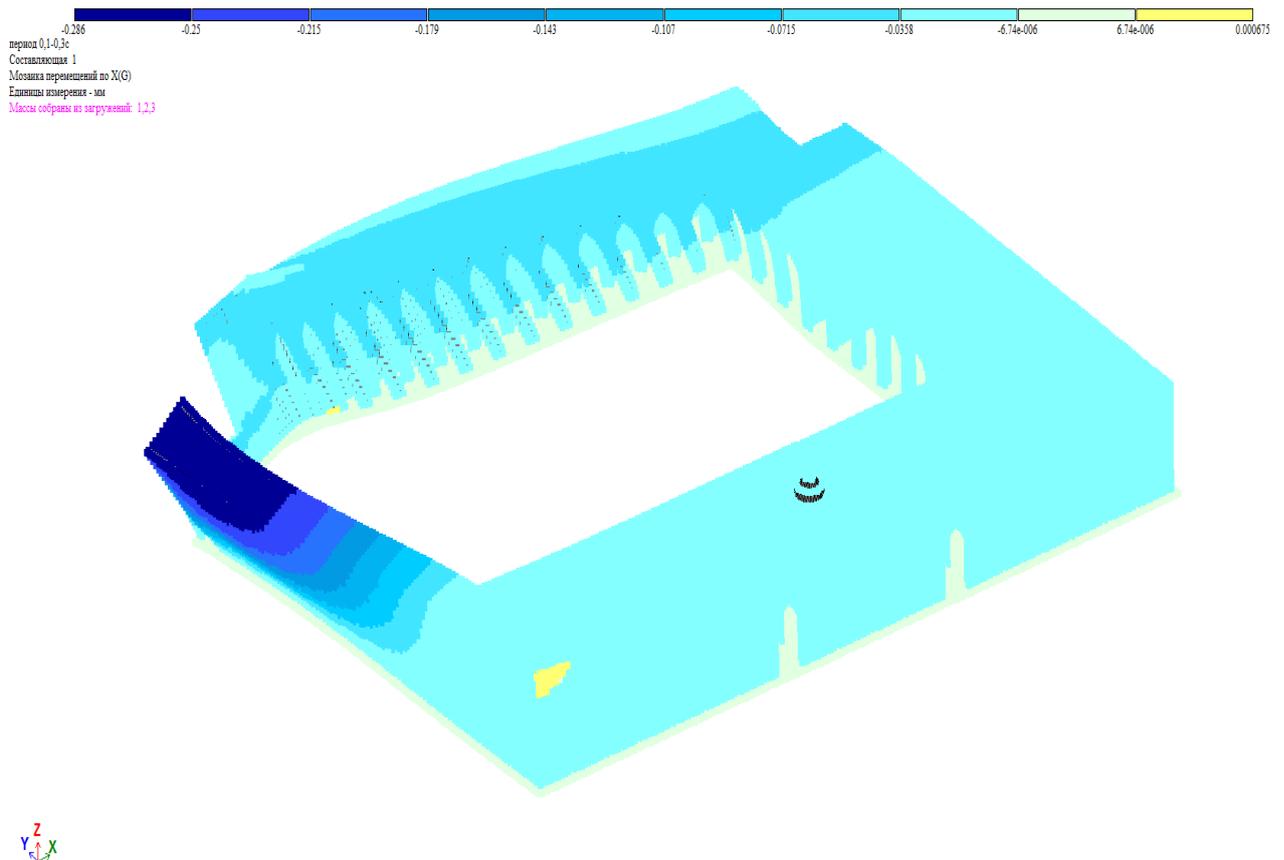


Рисунок 4.12 – Мозаика перемещений по X при высокочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов после разрушений.

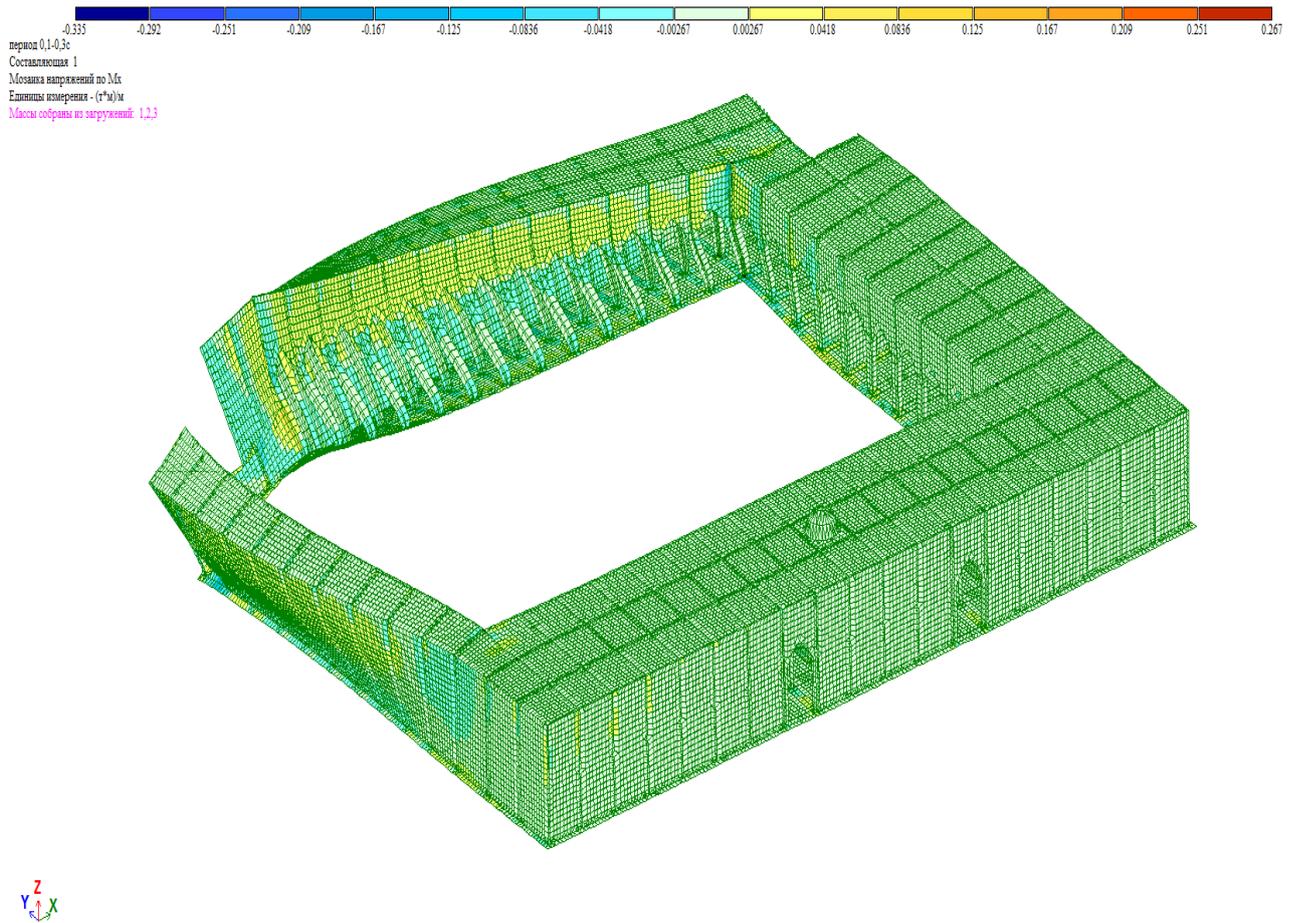


Рисунок 4.13 – Мозаика напряжений по M_x при высокочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов после разрушений.

Анализ выполненных исследований показал, что при сейсмических воздействиях от 7 баллов и ниже, независимо от частотного их состава, в культовом здании мусульманского зодчества с полученными повреждениями в ходе военных действий, в случае возникновения сейсмических воздействий они не вызовут дальнейших разрушений, чего нельзя сказать о воздействиях свыше требуемого класса сейсмостойкости равного 8,6 баллов при различном частотном спектре воздействий. Картина повреждения не только изменится в сторону её ухудшения, но может возникнуть ситуация окончательного разрушения памятника архитектуры арабского зодчества, что свидетельствует о

необходимости проведения комплекса мер по его усилению. Это было доказано расчётом. Пример такого расчёта представлен ниже.

Пример расчёта простенка до усиления для состояния здания Великой мечети в Алеппо после разрушений:

Для проведения расчёта была выбрана часть простенка здания Великой мечети (рисунок 4.14).

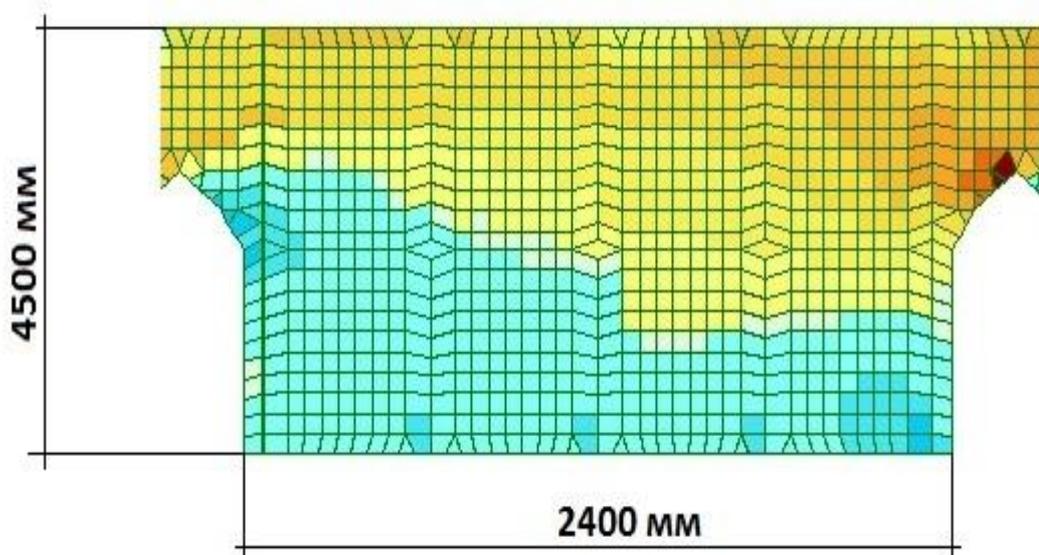


Рисунок 4.14 – Прстенек в здании Великой мечети г.Алеппо.

Расчет простенка по первой группе:

1. Исходные данные: $N=10493,1$ кН

$$e_i = \frac{M_i}{N_i} = \frac{792,38}{10493,1} = 0,08 = 8 \text{ см.}$$

2. Характеристика каменной кладки: природный камень марки 600 на растворе 4, $R=5,5$ МПа, $E=750 \cdot 2 \cdot 5,5=8250$ МПа.

3. Проверка прочности простенка:

Толщина стены $A=500$ мм. =50см., ширина простенка $b=2400$ мм. =240 см., высота простенка $H_{пр}=4500$ мм. =450 см.

$$A_c = A \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_0}{b}\right) = 50 \cdot 240 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 8}{240}\right) = 11200 \text{ см}^2$$

Гибкость простенка

$$\lambda_{hc} = \frac{N_{np}}{b_c} = \frac{450}{(240 - 2 \cdot 8)} = 2,008$$

Где $b_c = (b - 2 \cdot e_0) = (240 - 2 \cdot 8) = 224$ см.

По таблице 19 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78] по найденной гибкости простенка $\lambda_{hc} = 2,008$ находим коэффициент продольного изгиба сжатой части $\varphi = 1$.

Коэффициент продольного изгиба φ_1 при внецентренном сжатии находим по формуле 15 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78]:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi + \varphi_c}{2} = \frac{1 + 1}{2} = 1$$

Коэффициент увеличения расчётного сопротивления ω при внецентренном сжатии определяется по таблице 20 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78]:

$$\omega = 1 + \frac{e_0}{h} = 1 + \frac{8}{240} = 1,033 < 1,45$$

Несущая способность простенка можно вычислить по формуле [78]:

$$N \leq m_g \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot A_c \cdot \omega$$

$$N = 10493,1 \text{ кН} > m_g \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot A_c \cdot \omega = 1 \cdot 1 \cdot 55 \cdot 11200 \cdot 1,033 = 636328 \text{ кгс} = 6240,24 \text{ кН}, \text{ то есть прочность простенка недостаточна.}$$

Расчёт на поперечную силу $Q=2324,9$ кН выполняется с помощью формулы [78]:

$$Q \leq R_{sq} \cdot h \cdot z = 0,2 \cdot 50 \cdot \frac{2}{3} \cdot 224 = 1493,33 \text{ кгс} = 14,64 \text{ кН}$$

Где R_{sq} – расчётное сопротивление срезу: $R_{sq} = 0,02$ для марки раствора 4, следовательно, $R_{sq} = 0,02 \cdot 10 = 0,2$;

h – толщина стены;

$z = \frac{2}{3} \cdot h_c$, т.е. $\frac{2}{3}$ высоты сжатой зоны.

$$Q = 2324,9 \text{ кН} > R_{sq} \cdot h \cdot z = 14,64 \text{ кН}$$

Значит, прочность простенка на срез недостаточна, поэтому необходимо усиление каменного простенка здания Великой мечети в г. Алеппо.

Расчет простенка по второй группе:

Расчёт каменного простенка по образованию и раскрытию трещин в швах кладки не проводился, так как: $e_0 = 8 < 0,7 \cdot \frac{h_c}{2} = 0,7 \cdot \frac{224}{2} = 78,4$ см., согласно п.7.8 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78].

Проведённые выше расчёты подтвердили данные о том, что памятники культового значения мусульманского зодчества требуют усиления, для этого следующие разделы посвящены этим вопросам.

4.3.Существующие методы повышения сейсмостойкости зданий

Здания мечетей и других памятников архитектуры арабского зодчества на территории Сирии были построены из каменной кладки. Для обеспечения и повышения сейсмостойкости и усиления таких памятников архитектуры можно использовать традиционные способы, без изменения динамической схемы, которые являются основными в практике сейсмостойкого строительства, и призваны повышать несущие способности строительных конструкции путем увеличения сечений конструкций и нетрадиционные (специальные) способы усиления (рисунок 4.15), с изменением динамической схемы сооружения, которые включают в себя сейсмоизоляцию и сейсмогашение [7, 19, 91].



Рисунок 4.15 – Схема– классификация систем сейсмозащиты зданий и сооружений по принципу их работы

При выборе метода для повышения сейсмостойкости архитектурных памятников нужно руководствоваться тем, чтобы сохранить их аутентичность и оригинальный внешний облик. Иначе говоря, необходимо соблюдать баланс между повышением сейсмостойкости и сохранением аутентичности архитектурных памятников [7].

Ниже перечислены основные способы повышения сейсмостойкости и усиления каменных архитектурных памятников.

4.3.1. Традиционные способы сейсмоусиления

Основными традиционными способами сейсмоусиления конструкций каменных зданий являются [13,19,32, 86, 91]:

- инъектирование различных растворов;
- усиление стальными обоймами;
- усиление железобетонными обоймами;
- Усиление армированными растворными обоймами;
- усиление сердечниками;
- замена простенков и столбов новой кладкой.
- торкретирование по металлической сетке;
- усиление стягиванием стен здания по периметру тяжами;
- усиление перемычек металлическими уголками.

На рисунке 4.16 показана общая схема усиления и восстановления каменных конструкций [32, 86].

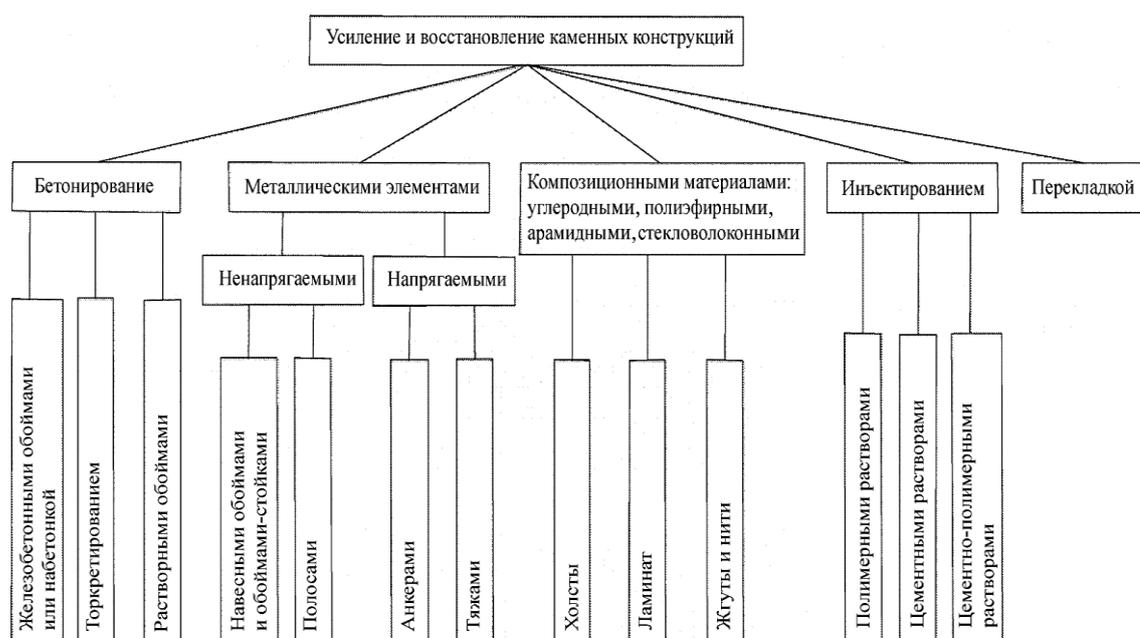


Рисунок 4.16 – Схема способов восстановления и усиления каменных конструкций.

Далее приводятся описания некоторых из этих способов.

Усиление обоймами сжатых элементов

Несущую способность каменной кладки можно повышать путем устройства обоймы (стальные, железобетонные и армированные растворные обоймы) в зоне где существуют повреждения. Такой метод считается очень эффективным, так как обойма позволяет повышать несущую способность кладки в 1,25-2,5 раза при минимальных, незначительных затратах [86]. Возможно усиление отдельных конструктивных элементов, таких как простенки и столбы (рисунок 4.17) и те участки стен, работающие на центральное и внецентренное сжатие (рисунок 4.18).

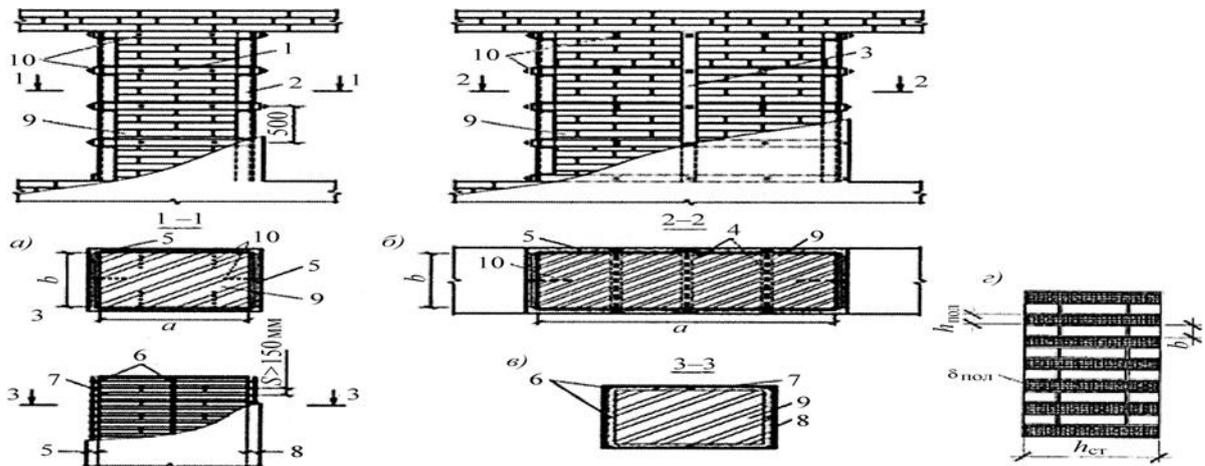


Рисунок 4.17 – Усиление обоймами каменных конструктивных элементов:

- а) – стальной обоймой при соотношении сторон сечения меньше 1:2; б) – стальной обоймой при соотношении сторон сечения больше 1:2; в) – железобетонной или армированной растворной обоймой; г) – полотном из углеродного волокна
- 1 – хомуты (планки) из полосовой стали; 2 – уголки; 3 – промежуточные вертикальные планки из полосовой стали; 4 – стяжные болты; 5 – штукатурка по сетке толщиной от 30 до 40 мм из слоя цементного раствора не ниже М 100; 6 – вертикальная арматура обоймы; 7 – сварные хомуты обоймы; 8 – железобетонная обойма толщиной от 60 до 100 мм из бетона класса В15; 9 – усиливаемый каменный элемент; 10 – химические анкеры.

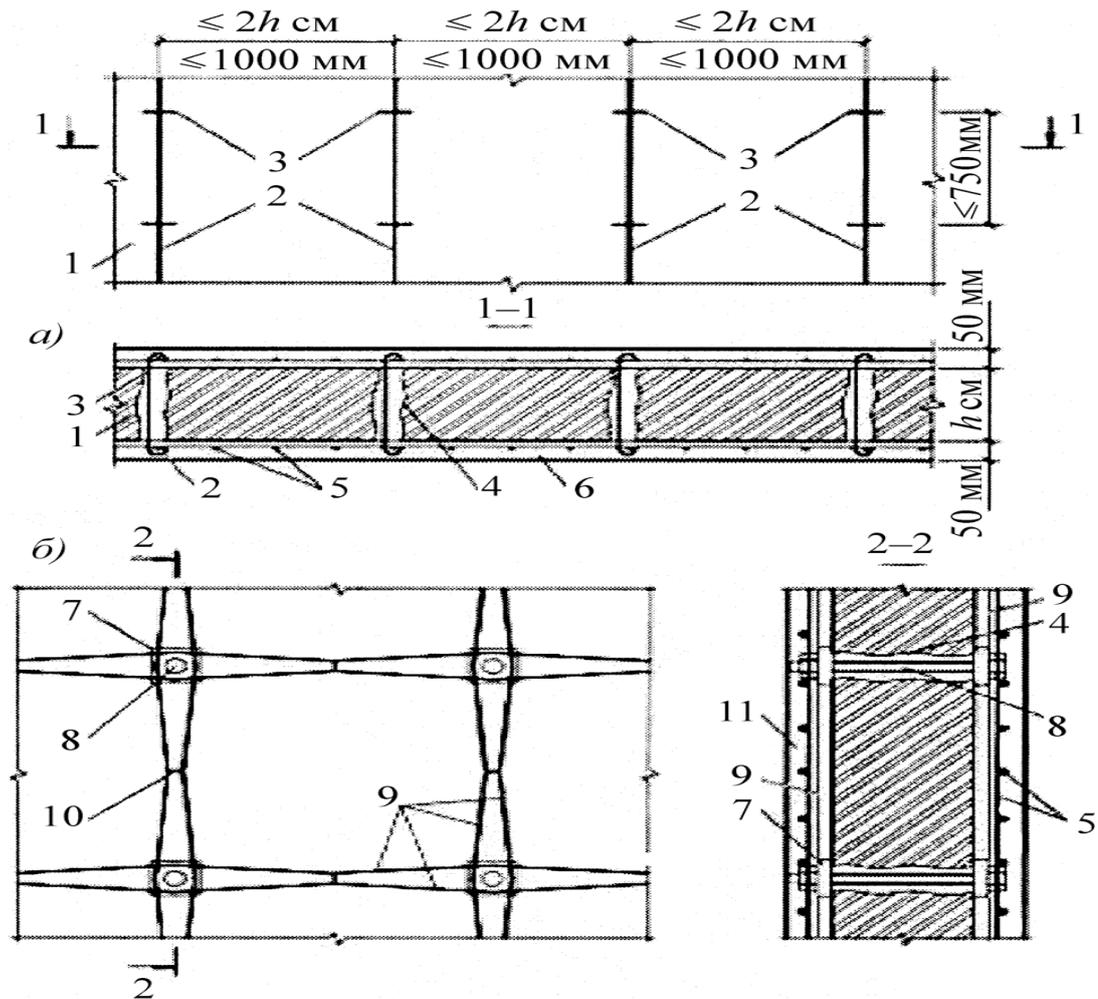


Рисунок 4.18 – Усиление участков каменных стен обоями:

а) – железобетонной; б) – штукатурной предварительно-напряженной

1 – усиливаемая стена; 2 – арматурные стержни $\text{Ø}10\text{--}14 \text{ мм}$; 3 – хомуты-связи $\text{Ø}10 \text{ мм}$; 4 – отверстия в стене; 5 – арматурные сетки, привязанные к арматурным стержням; 6 – бетон обоймы; 7 – стальные пластины с отверстиями для тяжей; 8 – тяжи-связи; 9 – арматурные стержни, приваренные к пластинам и попарно стянутые; 10 – сжимы; 11 – штукатурка из цементно-песчаного раствора.

Усиление, сердечниками, сжатых элементов

В случае необходимости сохранения аутентичности наружной стороны простенков либо если поперечные сечения таких простенков небольших размеров и нужно увеличить нагрузку на них, то в таком случае простенок можно усилить металлическим или железобетонным сердечником, который размещается в вертикальном углублении, вырубленном в простенке (рисунок 4.19).

Железобетонные сердечники могут быть установлены с одной и с двух сторон стены прикрепляя их химическими анкерами [86].

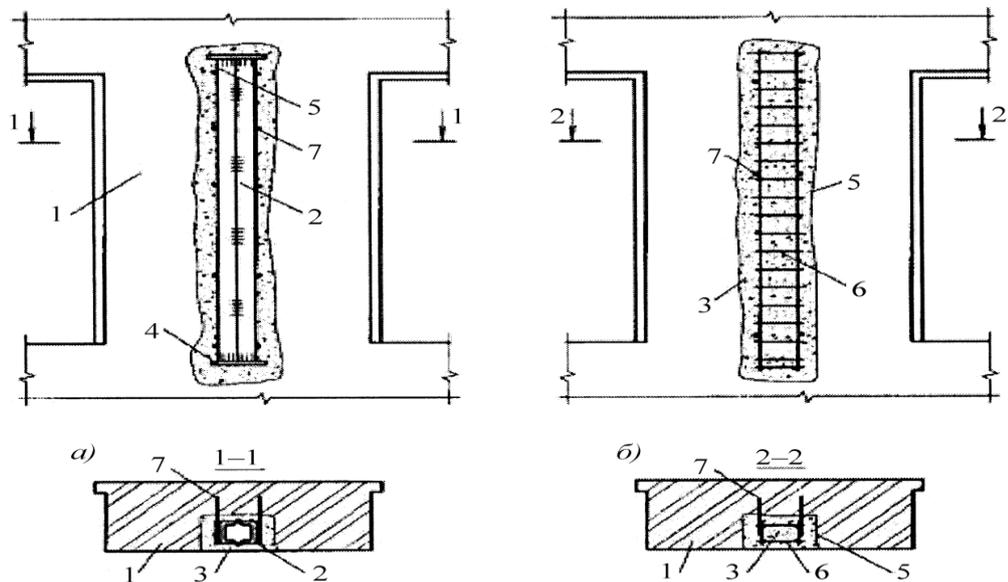


Рисунок 4.19 – Усиление, сердечником, каменных простенков:

а) – устройство сварного из двух швеллеров; б) – устройство железобетонного сердечника

1 – усиливаемый простенок; 2 – стальной сердечник; 3 – бетон класса В10–В15; 4 – опорные пластины стального сердечника; 5 – вертикальная ниша, пробитая в простенке; 6 – арматурный каркас; 7 – химические анкера.

Усиление кладки инъектированием

Если существуют сквозные трещины размером до 4 мм в кирпичной кладке необходимо заделывать их инъектированием [13] строительных растворов в трещины. А при размерах трещины в кладке 5 мм и больше, рекомендовано использовать специальные составы растворов [86]:

- растворы цементно-полимерные следующего состава 1: 0,15: 0,6, то есть цемент + (поливинилацетат и латекс) + вода следует добавить мелкий песок в количестве (от 25 % до 30 %) от массы цемента;
- растворы цементно-песчаные следующего состава 1: 0,25, то есть цемент + песок при В/Ц= от 0,7 до 0,8;

- растворы цементные беспесчаные следующего состава 1: 0 то есть цемент + песок при В/Ц= от 0,5 до 0,6 (рисунок 4.20).

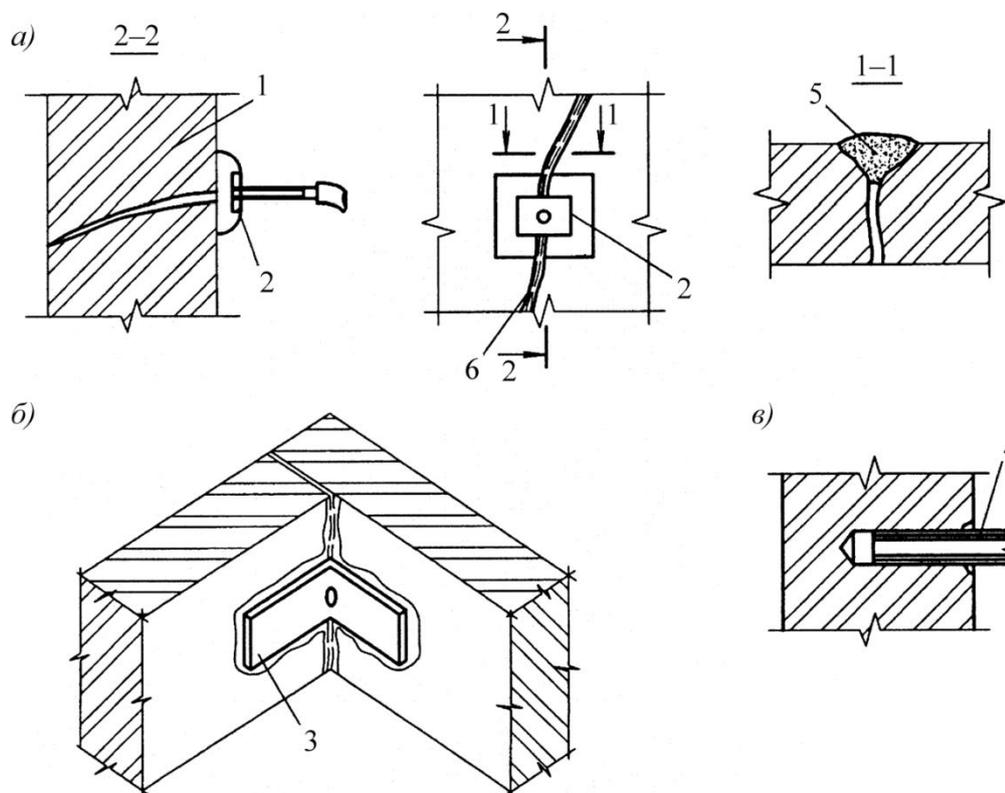


Рисунок 4.20 – Подготовка трещин к инъекцированию:

а), б) – через шайбу или уголок; в) – через штуцер

1 – стена с трещиной; 2 – шайба; 3 – уголок; 4 – штуцер; 5 – герметизация; 6 – трещина; 7 – гибкий шланг.

Перекладка столбов и простенков

В случае значительных повреждений или аварийного состояния кладки и невозможности технически и экономически, использовать способов усиления обоями или инъекцией, или др. либо другие способы недостаточны для усиления, то целесообразно перекладка кирпичных столбов и простенков что в свою очередь позволяет сохранить внешний вид здания [43]. Необходимо, предварительно разгружая простенки (рисунок 4.21) и столбы, разобрать и заменить кирпичную кладку, которая подлежит замене. руководствуясь требованиям СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции,

используют кирпич марки 100 или выше с использованием цементного раствора марки 100-150. Если необходимо, то кладку следует армировать, а после достижения раствором новой кладки половину проектной прочности демонтируют временные крепления [86]. Замену вести с обязательной перевязкой швов со старой кладкой.

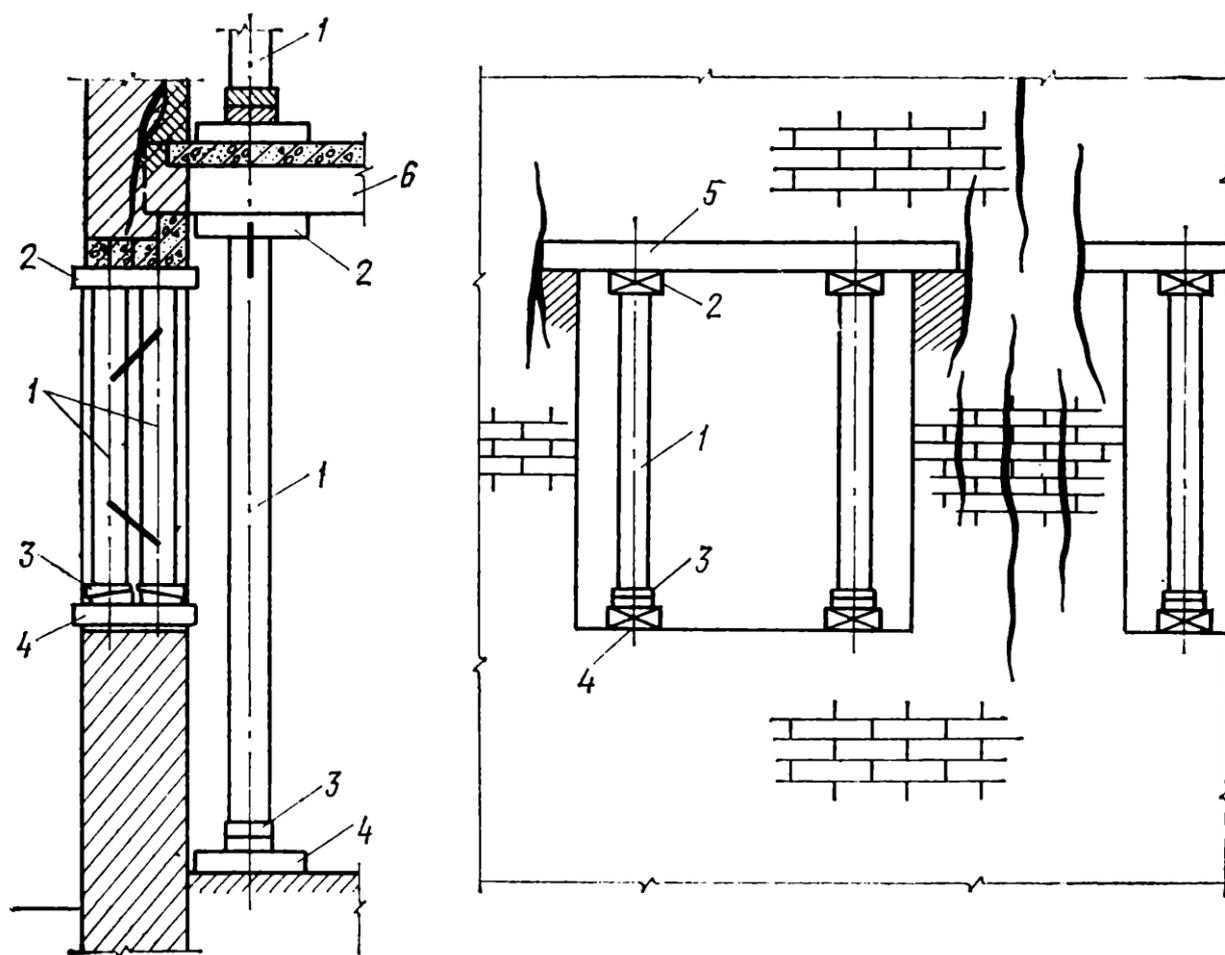


Рисунок 4.21 – Укрепление и разгрузка поврежденных простенков стойками:
1 — стойка; 2 — подкладка; 3 — клинья; 4 — лежень; 5 — перемычка; 6 — балка.

Усиление стен с локальными трещинами

Для усиления стен, в которых есть локальные трещины необходимо использование стальных накладок (рисунок 4.22), так как они будут воспринимать растягивающие напряжения в каменной кладке [13- 14, 35- 37, 50, 52, 86].

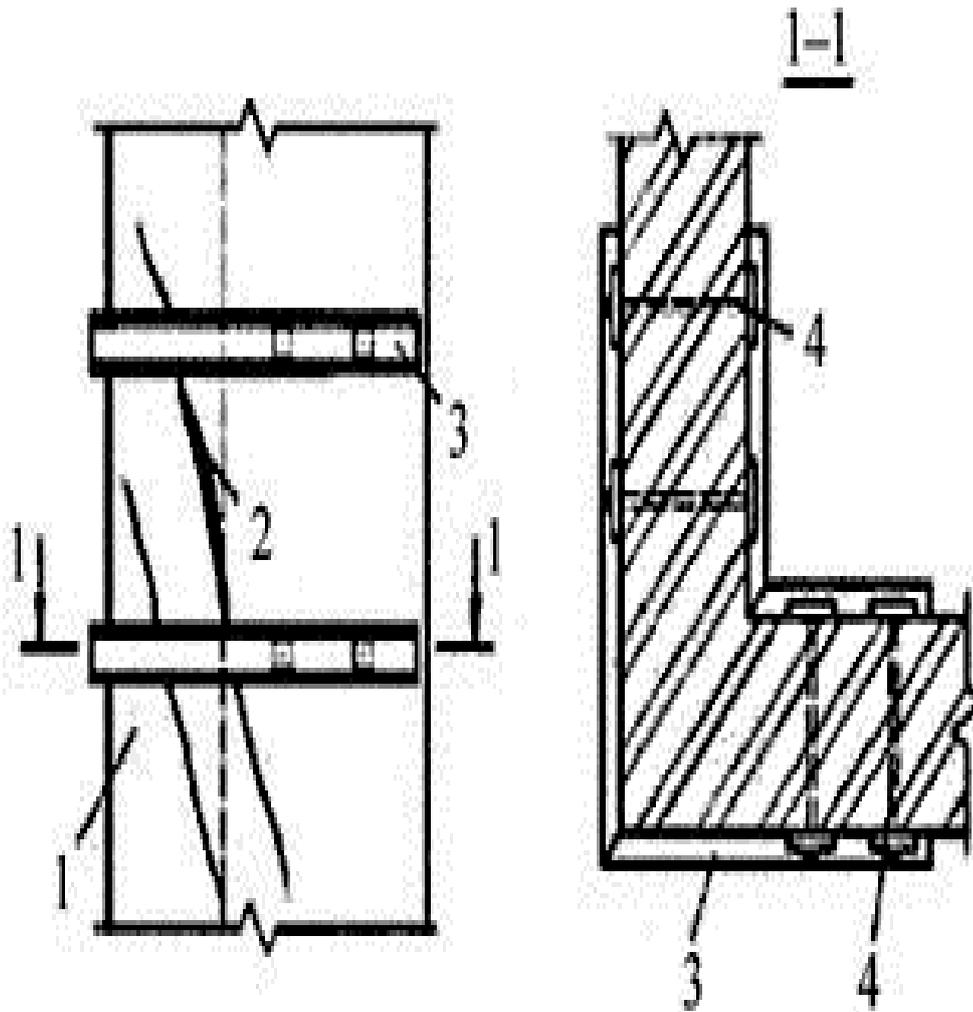


Рисунок 4.22 – Усиление стен из каменной кладки с помощью стальных накладок в зоне локальных трещин:

1 – усиливаемая стена; 2 – трещина в кладке; 3 – стальные накладки; 4 – стяжные болты.

Восстановление каменной кладки стен в зонах локальных трещин

В зонах локальных трещин для восстановления каменной кладки стен необходимо использовать шпонки, изготовленные из арматурных стержней либо из отрезков стального проката (рисунок 4.23). Шпонки могут работать на срез и растяжение, поэтому они очень эффективно включаются в работу особенно при возможных

деформациях каменной кладки стен в зоне трещин шириной раскрытия, которых до 10 мм [13- 14, 35-37, 45, 50, 52, 54, 58-59, 64-67, 73, 76, 78-79, 86,95,109,117].

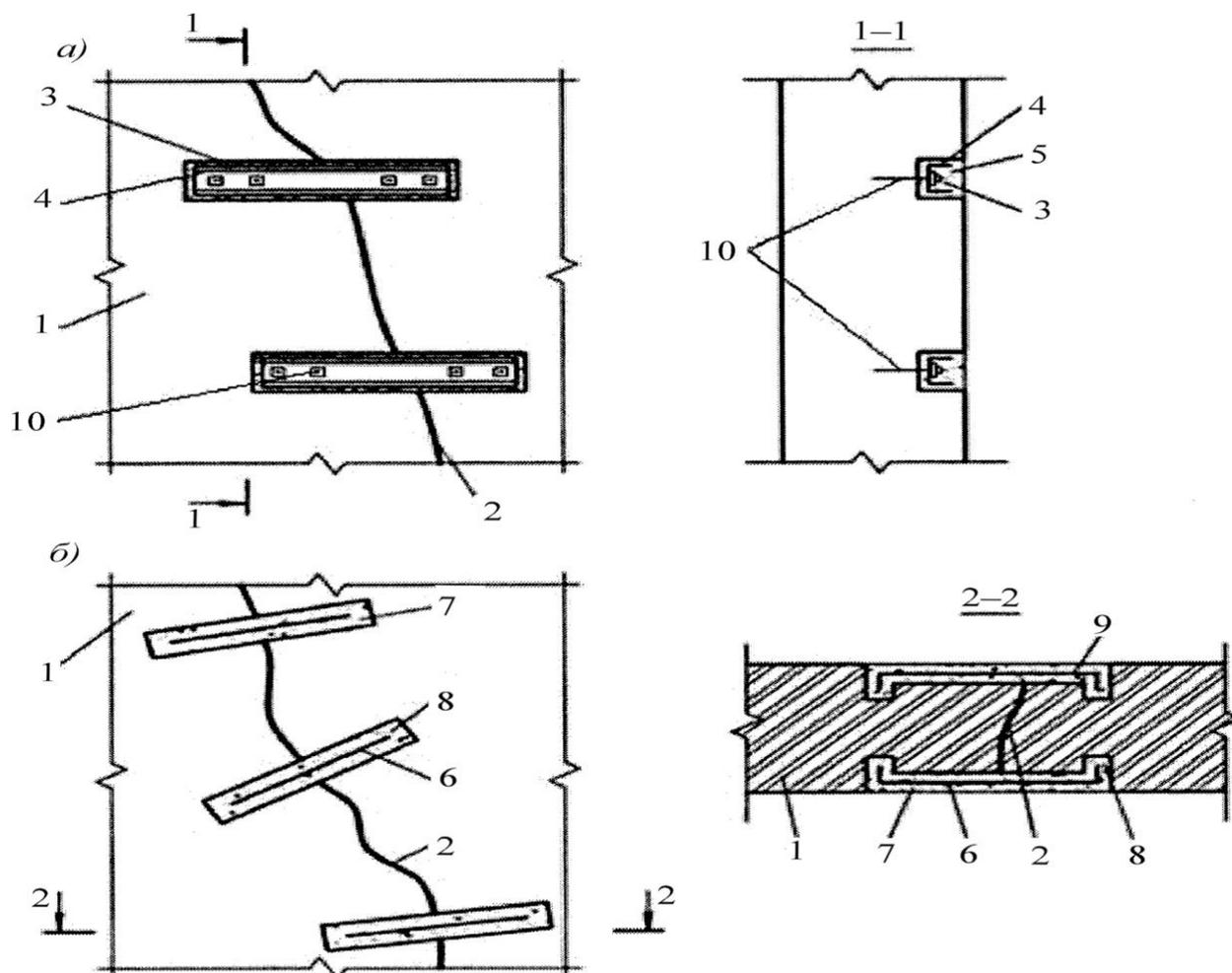


Рисунок 4.23 – Устранение локальных трещин в стенах:

а) – установкой шпонок из прокатного металла; б) – то же скоб из арматурных стержней

1 – усиливаемая стена; 2 – трещина в кладке шириной до 10 мм, инъецированная цементно-песчаным раствором после установки шпонок; 3 – штраба в стене; 4 – шпонка из прокатного металла (швеллер, уголок); 5 – полости, заполненные бетоном или раствором; 6 – скобы из арматурных стержней; 7 – паз в кладке, выбранный фрезой; 8 – углубления по концам паза, выполненные сверлом; 9 – заполнение раствором пазов и углублений; 10 – анкеры.

А если ширина раскрытия локальных трещин превышает 10 мм. и имеют незначительную протяженность, то ее необходимо восстановить с помощью простых кирпичных замков (рисунок 4.24, а) либо с помощью кирпичных замков с якорем (рисунок 4.24, б) [13- 14, 35-37, 45, 50, 52, 54, 58-59, 64-67, 73, 76, 78, 86,109].

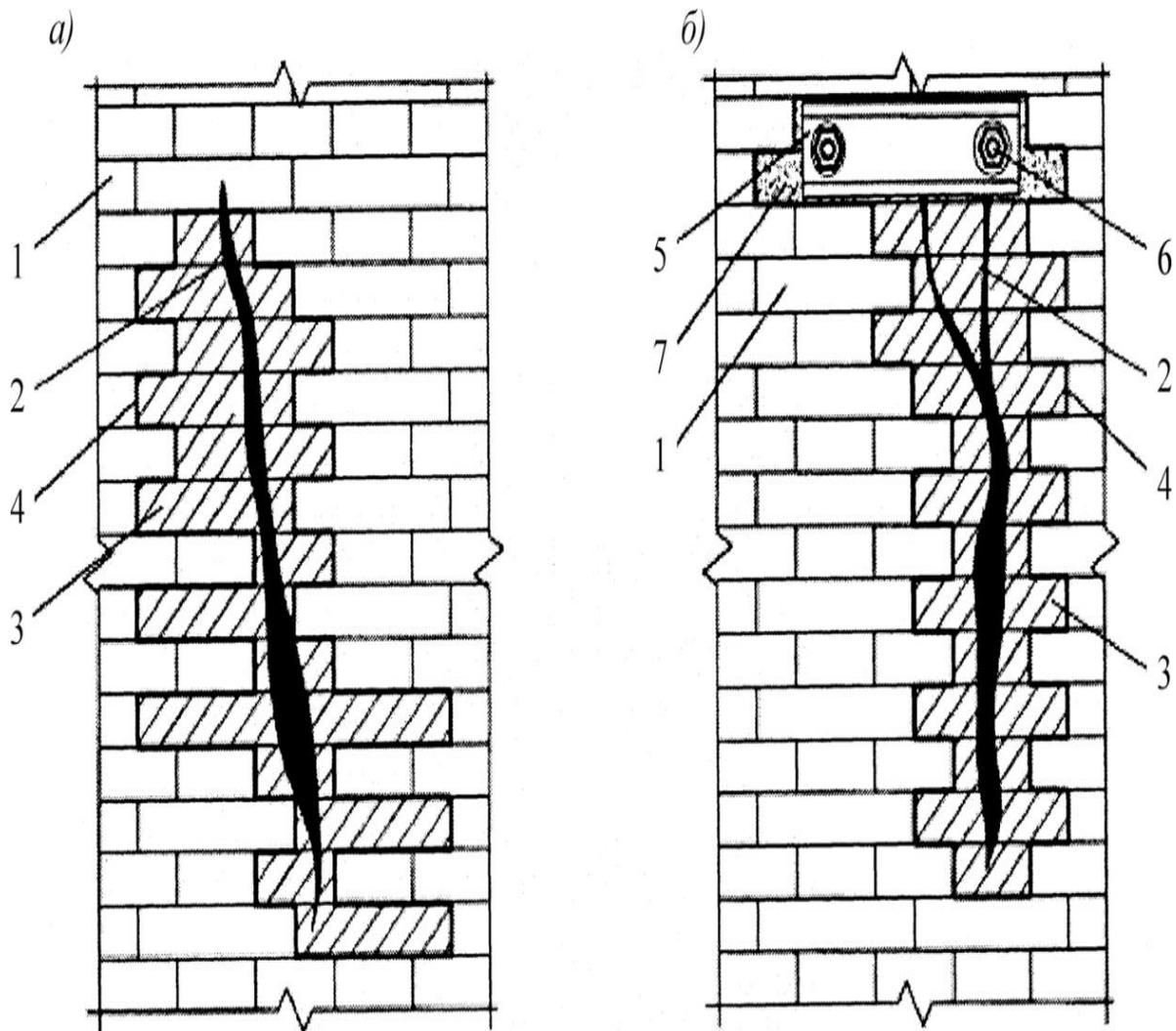


Рисунок 4.24 – Восстановление кладки стен в зонах локальных трещин:

а) – с широкими трещинами вставкой простых кирпичных замков; б) – то же вставкой кирпичных замков с якорем

1 – усиливаемая стена; 2 – трещина в кладке шириной более 10 мм; 3 – кирпичный замок в (1/2) кирпича; 4 – граница разборки поврежденной кладки; 5 – якорь из прокатного металла; 6 – анкеры; 7 – полости, заполненные раствором.

Торкретирование

Способ Торкрет-бетонирования по металлической сетке (рисунок 4.25) с одной или двух сторон, полностью или отдельными участками, применяется при усилении стен каменных зданий. Суть метода в нанесении на поверхность стены, которая предварительно покрывается металлической сеткой торкретбетоном. торкретирование считается одним из основных методов восстановления кирпичных стен. Этот метод позволяет увеличивать несущую способность поврежденной стены по сравнению с первоначальным состоянием. Практически может быть восстановлена полностью жесткость здания. существуют два способа торкретирования: сухой и мокрый. В сухом способе сухой цемент с наполнителями подается под давлением отдельно и смешивается с водой в распыляющем устройстве. а в мокром способе цемент и вода смешиваются в раствор заранее и подаются под давлением через шланг [13-14, 35-37, 45, 50, 52, 54, 58-59, 64-67, 73, 76, 78, 86].

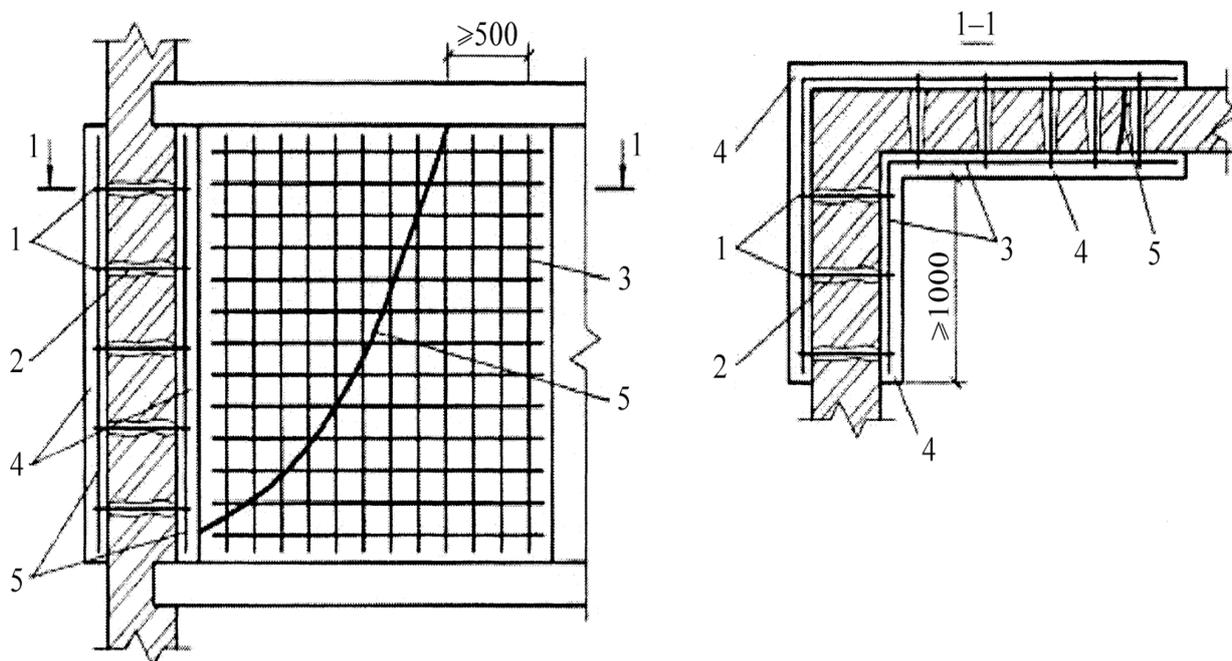


Рисунок 4.25 – Усиление стены с трещиной с помощью арматурных сеток в слое торкретбетона (торкрет штукатурки):

1 – анкеры $\varnothing 6$ мм; 2 – отверстия в стене; 3 – арматурная сетка; 4 – торкретбетон; 5 – трещина в стене.

Усиление кирпичных столбов и стен сетками и полосами из углеволокна

Опыт зарубежных стран таких стран как Италия, Франция, Испания, и др. показал перспективность и эффективность использования композитных материалов при усилении каменных конструкций.

В изгибаемых конструкциях где действуют поперечные силы возможно усилить, композитными материалами, приопорные участки и растянутые зоны. Этими материалами также можно усилить сжатые и внецентренно сжатые элементы. Композитные материалы приклеиваются специальным эпоксидным клеем перпендикулярно к оси колонны, что уменьшает поперечное деформирование и усиливает сопротивление вертикальным нагрузкам в колонне.

Если наклеить углеродные пластины по длине плоскости действия момента, то можно противостоять изгибающим моментам. А при усилении внецентренно сжатых конструкций, полосы углеволокна приклеиваются к грани усиливаемого элемента, используя высокую прочность на растяжение (таблица 4.1) композитного материала [7]. Примеры приклеивания композитных материалов при наличии вертикальных и горизонтальных трещин в каменной кладке показаны на рисунках 4.26 и 4.27.

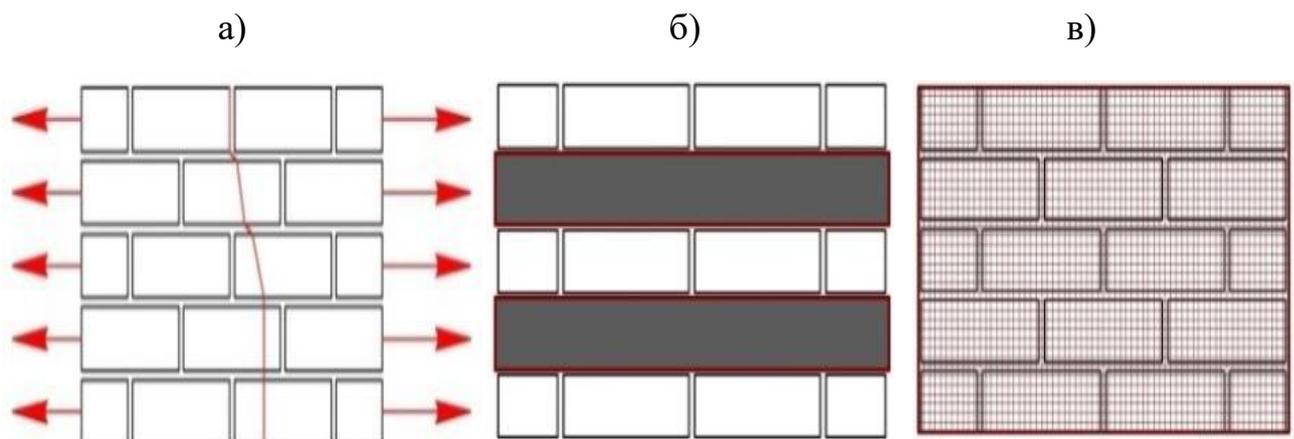


Рисунок 4.26 –Примеры расположения лент, сеток и стержней при вертикальных трещинах:

а – вертикальная трещина; б – усиление лентами; в – усиление сетками.

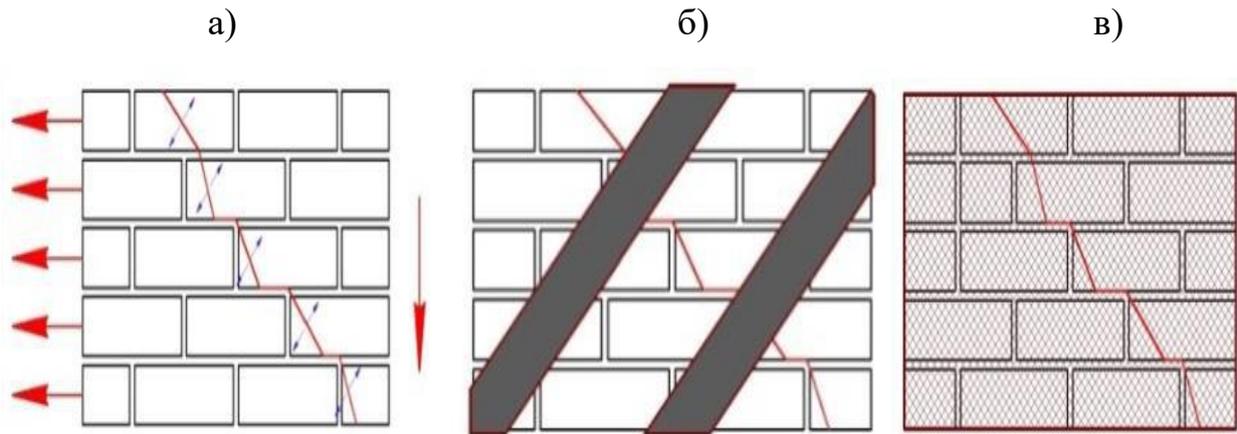


Рисунок 4.27 – Примеры расположения лент, сеток и стержней при различных диагональных трещинах:

а – диагональная трещина; б – усиление лентами; в – усиление сетками.

Как видно из таблицы 4.1 где сравниваются Физико-механические характеристики, предел прочности при растяжении у композитных материалов превышает почти в 6-10 раз значения у стали. Этот показатель является очень важным и определяющим при работе материала на растяжение.

В Российской Федерации из-за такой эффективности все чаще стали использовать усиление и повышение сейсмостойкости строительных конструкций холстами, ламинатом и сетками из композитных материалов [7, 32,34,47,48,49,63,80,85,106,111].

Таблица 4.1 – Физико-механические характеристики углеволокна и стали

Материал	Модуль Юнга, E, ГПа	Предел прочности При растяжении, σ_r МПа	Деформация при разрыве, ε_r %	Удельный вес, ρ гр/см ³
Углеволокно (лента)	240-280	3500	1,6-1,73	1,75

Продолжение таблицы 4.1

Продолжение таблицы 4.1 Сетка из углеволокна 5x5	230	3500	1,5-1,8	1,8
Сталь	206	250-400 (текучесть), 350-600 (разрыв)	20-30	7,8

Один из главных признаков повреждения каменной кладки является появление трещин, которые могут привести к полному разрушению строительных конструкций. Причин образования трещин существует очень много, например, неравномерные осадки грунта, температурно-влажностные деформации, перегрузки строительных конструкций, землетрясения и др. Общеизвестно что каменная кладка плохо работает на растяжение и когда растягивающие напряжения достигают значения больше или равными допустимым значениям напряжения (формула 4.1), она разрушается [7,32, 34,47,48,49,63,80,85,106,111]:

$$\sigma_{\text{раст.}} \geq [\sigma_{\text{раст.}}] \quad (4.1)$$

Где

$\sigma_{\text{раст.}}$ – растягивающие напряжения;

$[\sigma_{\text{раст.}}]$ – допустимые значения напряжения.

4.3.2. Нетрадиционные способы сейсмоусиления

Требования сохранения аутентичности памятников архитектуры накладывают некоторые ограничения в выборе традиционных методов сейсмоусиления, поэтому возникает необходимость в использовании нетрадиционных (специальных) методов сейсмоусиления.

Активная сейсмозащита требует дополнительные источники энергии и мало используется для защиты зданий и сооружений по причине существенных затрат, которые требуются на ее установку и обслуживание. Широкое применение получили методы пассивной сейсмозащиты, которым не требуется дополнительные источники энергии. Они подразделяются на сейсмогашение и сейсмоизоляцию [2, 3,18,60,88, 91].

Антисейсмическая опора

Исследования зданий и сооружений на резинометаллических опорах (рисунок 4.28) показали их высокую надежность. Но к сожалению затраты, на такие фундаменты очень высокие и достигают примерно 30% от стоимости здания [2,3,18,60,70,77,88, 91].

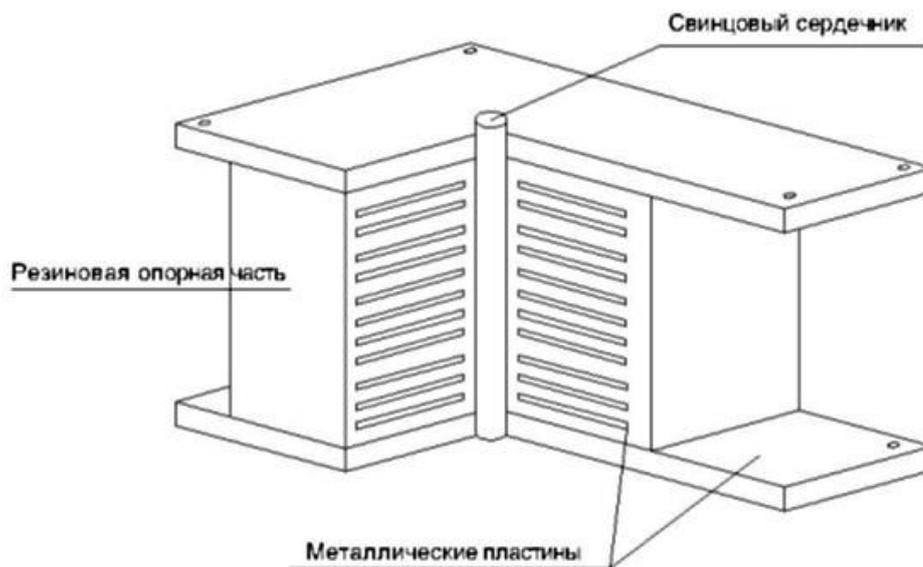


Рисунок 4.28 – Антисейсмическая опора.

Сейсмоизоляция не обеспечивающая-возвращающей силы

Сейсмоизолирующий фундамент

Сейсмоизоляция, которая не обеспечивает возвращающую силу, действующую на сейсмоизолированные части конструкции, выполняется с помощью устройства скользящего пояса и представлена в техническом решении

французской фирмы Spie Batignolle. Сейсмоизолирующий фундамент (рисунок 4.29) этой фирмы представляет собой классический пример сейсмоизоляции где была осуществлена последовательное расположение упругих и демпфирующих элементов [2,3,18,60, 72,88, 91].

Во время слабых нагрузок, когда нагрузка горизонтальная на опорную часть не превышает силу трения, это система выполняет свою функцию в линейной области. Когда увеличивается нагрузка, то преодолевается сила трения и начинается проскальзывание верхней фундаментной плиты относительно нижней. Удастся при этом существенно снизить нагрузки на здание и оборудование [2,3,18,60,72 ,88, 91].

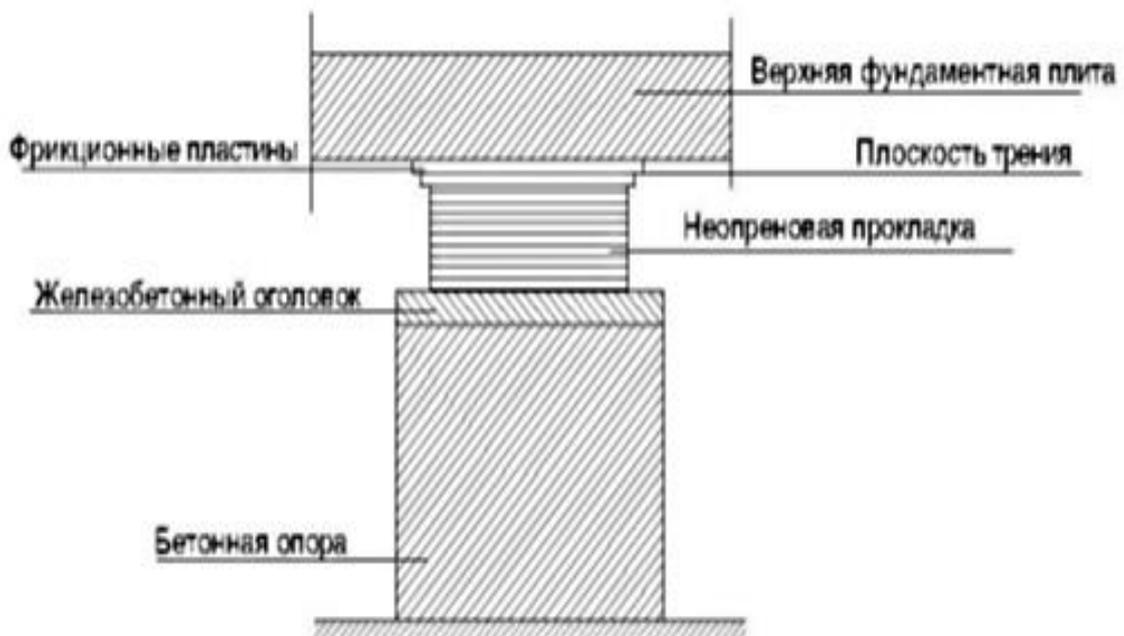


Рисунок 4.29 – Сейсмоизолирующий фундамент французской фирмы Spie Batignolle.

Сейсмоизоляция при наличии возвращающей силы

Типичный прием сейсмоизоляции если присутствует возвращающая сила являются здания с гибким нижним этажом. Гибкий этаж может быть выполнен в виде свай, каркасных стоек, упругих опор, и тому подобное (рисунок 4.30) Конструкция гибкого этажа на рисунке выполнена из гибких опор, состоящих из

упругих стержней небольшого диаметра, размещенных между подземной и надземной частями здания. Ученые в последнее время критикуют данный метод [2,3,18,60,72, 77, 88, 91].

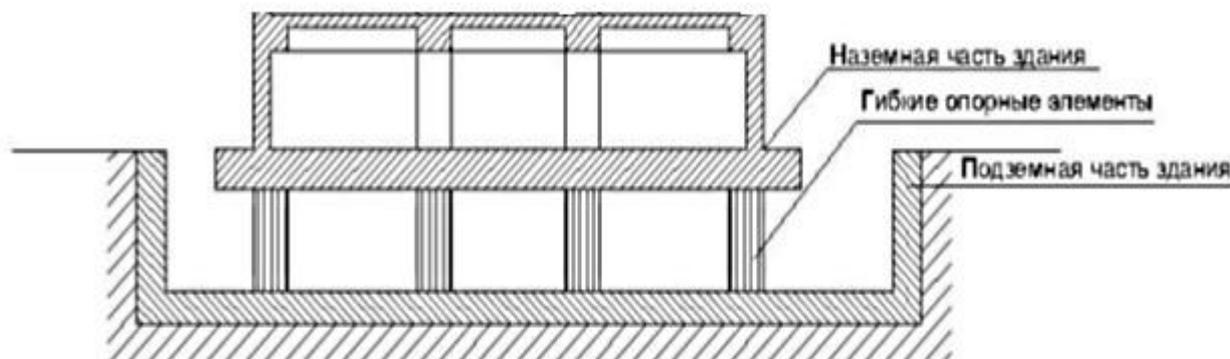


Рисунок 4.30 – Здание с гибким нижним этажом.

Эластомерная опора с демпфером

Благодаря низкой сдвиговой жесткости [77] эластомерных опор они способны изменять частотный спектр своих собственных горизонтальных колебаний в сейсмоизолированной части здания, а при деформации опор возникают восстанавливающие силы, которые стремятся возвращать сейсмоизолированную часть сооружения в исходное начальное положение. Эластомерные (резинометаллическая) опоры способны воспринимать усилия сдвига, растяжения, сжатия и кручения при перемещениях циклических в вертикальном и горизонтальном направлениях. При расчетных гравитационных нагрузках вертикальные деформации эластомерных опор, обычно, не более нескольких миллиметров. При горизонтальных нагрузках опоры деформируются или (могут деформироваться) на несколько сот миллиметров.

Эластомерные опоры у которых низкая способность к диссипации энергии обычно используют, вместе со специальными демпферами (Рисунок 4.31) вязкого или гистерезисного типа, которые позволяют компенсировать низкую способность эластомерных опор к диссипации энергии сейсмических колебаний [77].

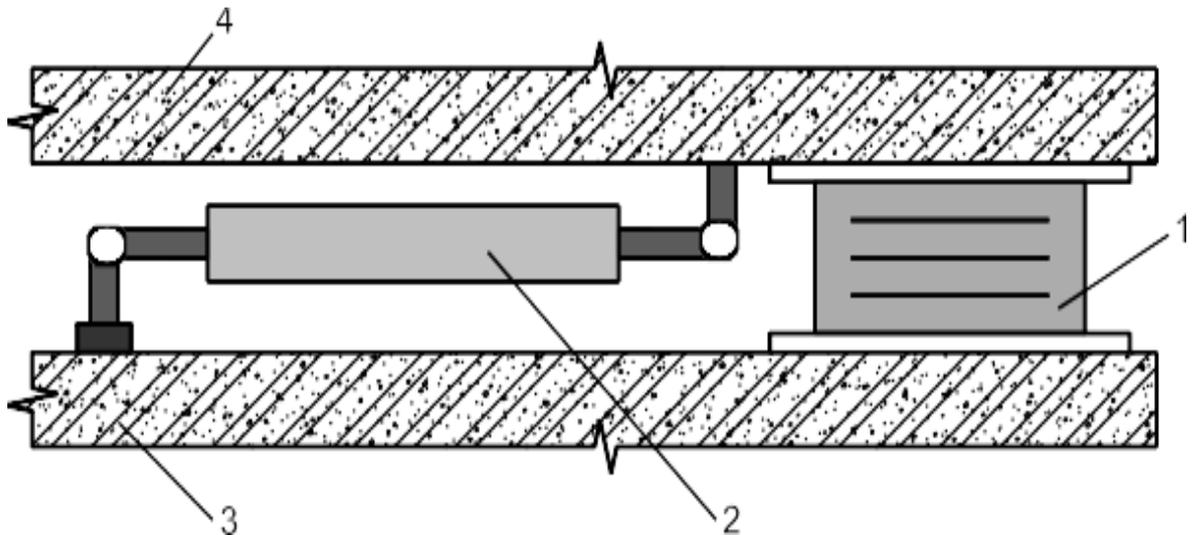


Рисунок 4.31 – Сейсмоизолирующая система, состоящая из эластомерной опоры с низкой способностью к диссипации энергии и демпфера:

1 – эластомерная сейсмоизолирующая опора; 2 – демпфер; 3 – несейсмоизолированная часть сооружения; 4 – сейсмоизолированная часть сооружения.

Анализ вышеизложенного материала свидетельствует о том, что в настоящее время широко применяется в практике и зарубежного и российского сейсмостойкого строительства и традиционные и нетрадиционные методы сейсмозащиты. Для повышения сейсмостойкости в моей диссертационной работе рассмотрен комплекс и тех и других методов

4.4. Предлагаемые решения для сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества с использованием традиционных методов

Памятники архитектуры мусульманского зодчества на территории Сирии были построены из каменной кладки. Для обеспечения сейсмостойкости и усиления таких памятников одним из возможных способов является использование традиционных подходов, без изменения динамической схемы, которые являются основными в практике сейсмостойкого строительства и призваны повышать несущую способность строительных конструкций путем увеличения сечений конструкций и нетрадиционные [91] (специальные) способы усиления, с изменением динамической схемы сооружения, которые включают в себя сейсмоизоляцию и сейсмогашение. При выборе метода для повышения сейсмостойкости архитектурных памятников нужно руководствоваться тем, чтобы сохранить их аутентичность и оригинальный внешний облик. Иначе говоря, необходимо соблюдать баланс между повышением сейсмостойкости и сохранением аутентичности архитектурных памятников.

Предлагается сейсмоусиление памятников архитектуры Сирии, а именно каменных колонн и стен, с использованием спиральных (винтовых) стержней (рисунок 4.32, а), проволоки (рисунок 4.32, б) из нержавеющей стали и стержней из углеполимера (рисунок 4.33). Использование этих элементов позволяет сохранять аутентичность этих памятников и одновременно не утяжелять их, из-за того, что такие материалы имеют легкий вес.



Рисунок 4.32– Спиральные стержни (а) и проволока (б) из нержавеющей стали.



Рисунок 4.33 – Стержни из углеполимера.

Стержни из углеполимера CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) Bars

Одним из инновационных традиционных методов сейсмоусиления (усиления) зданий и сооружений является углепластики так называемые (CFRP) или (Carbon Fiber Reinforced Polymer), которые представляют собой полимерные композитные материалы, армированные углеродным волокном, и известные как альтернатива традиционному армированию из стальных стержней, каменных и других строительных конструкций. Они отличаются легкостью и устойчивостью к коррозии, а также высокой прочностью на разрыв и высоким модулем упругости. Эти полимеры доступны в различных видах, включая ткани и арматурные стержни. Многочисленные исследования показали, что системы FRP эффективны в увеличении прочности каменных стен, подверженных [105].

Спиральные стержни из нержавеющей стали (stainless steel helical rods)

Стержни и проволока из нержавеющей стали имеют малый диаметр поэтому при их использовании требуются небольших размеров канавки и отверстия что в свою очередь почти не влияет на прочность ремонтируемой конструкции и не требует большого расхода раствора для швов. Модуль упругости таких спиральных стержней равен $E = 150 \text{ кН/мм}^2$ [105].

Технология усиления каменной кладки

Существует и используется в последнее время в Европе такая технология под названием “Stitching Cracked Walls” что означает «техника зашивки потрескавшихся стен». Эта техника заключается в использовании спиральных (винтовых) стержней, изготовленных из нержавеющей стали так называемых (stainless steel screw helical (screw) rods). Такой способ является современным и эффективным методом для усиления каменной кладки против трещин и растрескивания.

Этот метод позволяет усилить стены и колонны особенно в местах образования трещин и увеличивать несущую способность по сравнению с первоначальным состоянием. Практически может быть восстановлена полностью жесткость здания, не нарушая при этом его внешнего облика.

Прочность на разрыв материала таких стержней в два раза больше чем прочность обычной арматуры.

Установка стержней выполняется следующим образом (рисунок 4.34):

- 1.С помощью дисковой пилы прорезают канавку в самом горизонтальном растворном шве кладки, (допускается также прорезание канавок вне горизонтального растворного шва кладки, то есть в самом кладочном материале);
- 2.Глубина канавки около 60 мм (или половины каменного кирпича), минимальная ее ширина 10 мм;
- 3.Канавка должна быть очищена водой и просушена сжатым воздухом с последующим нагнетанием с помощью пистолета вяжущий раствор внутрь канавки;
- 4.Затем выполняется монтаж стержня в канавку;
- 5.Нагнетают сверх стержня вяжущий раствор для его закрепления и выполняют окончательные работы [105].



Рисунок 4.34 –Технология ремонта стен с трещинами называемая в Европе «Stitching Cracked Walls» предлагаемая компании «Thor Helical»:

1. прорезать канавку в шве между камнями; 2. очистка канавки водой и сжатым воздухом; 3.впрыскивание специального вяжущего раствора на глубину около 1 см вглубь канавки; 4. установка стержня его проталкиванием вглубь канавки примерно на её середине и заделка шва шпателем тем же раствором; 5. –Заделка трещины с помощью инъецирования раствора.

Укрепление кладки при наличии трещин

1. Выполнить те же шаги, указанные выше;
2. Стержень устанавливается так чтобы охватывал 500 мм с каждой стороны трещины (рисунок 4.35).
3. Выполняют инъецирование трещин раствором затем осуществляются окончательные работы и покраска при необходимости.

Вместо винтовых стержней из нержавеющей стали для усиления кладки в том числе поврежденной можно использовать стержни из углеполимера, который

является композиционным материалом устойчивым к коррозии больше чем нержавеющая сталь [105].

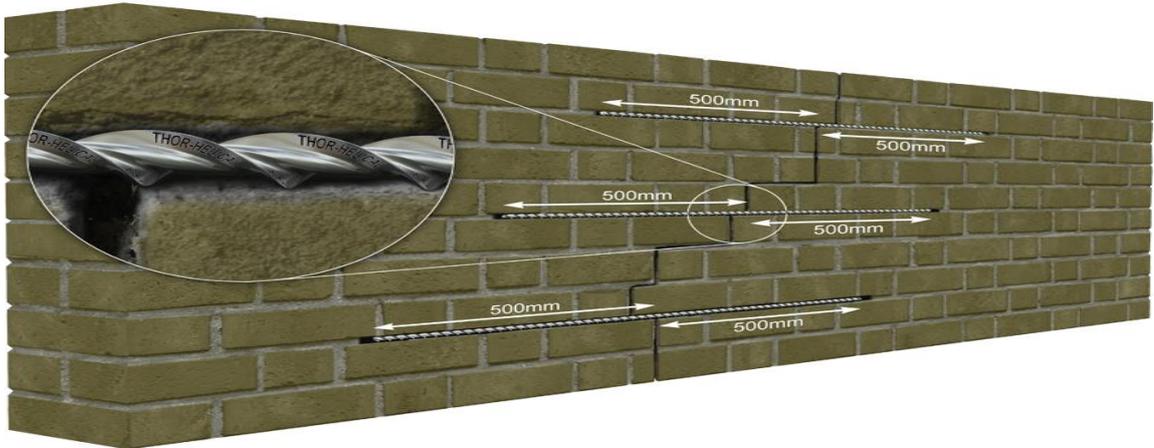


Рисунок 4.35 –Технология ремонта стен с трещинами называемая в Европе «Stitching Cracked Walls»

Укрепление и анкеровка перемычек при наличии трещин

1. Осуществляется с помощью винтовых стержней из нержавеющей стали, которые вкручиваются в заранее подготовленные отверстия в теле обычных и (или) арочных перемычек (рисунок 4.36) [105].

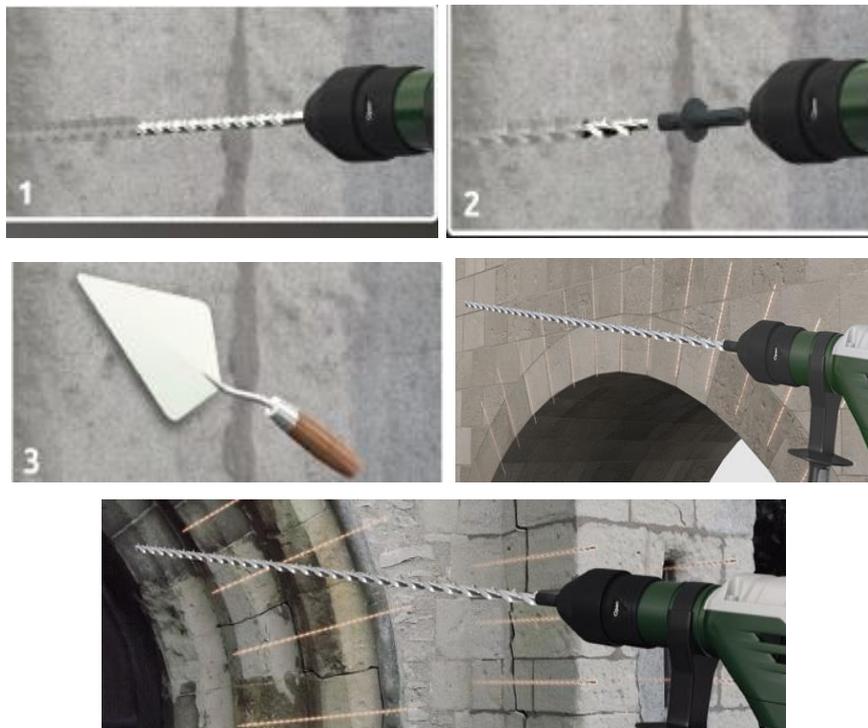


Рисунок 4.36 – Укрепление и анкеровка перемычек стержнями при наличии трещин.

Укрепление и анкеровка угловых стен при наличии трещин

1. Осуществляется с помощью винтовых стержней нержавеющей стали которые вкручиваются в заранее подготовленные отверстия в теле кладки стены (рисунок 4.37);



Рисунок 4.37 – Анкеровка угловых стен стержнями при наличии трещин.

2. для усиления углов стен можно использовать проволоку из нержавеющей стали загнутую в форме буквы русского алфавита Г (рис. 4.38).



Рисунок 4.38 – Укрепление угловых стен при наличии трещин.

Такие стержни выпускаются в различных странах Европы. Например, в Англии они выпускаются компании «Thor Helical» и компании «Гидрозо» в России. Стержни выпускаются диаметром 5, 6, 7, 8 и 9 мм, стандартной длины 1 м и 2 м.

Стержни из углеполимера выпускаются различными компаниями, например, швейцарской компанией «Sika» выпускаются диаметром 4, 6, 8, 10 и 12 мм.

Технология установки стержней достаточно известна в строительстве и заключается в следующем:

1. С помощью дисковой пилы прорезают канавку в самом горизонтальном растворе шва кладки, (допускается также прорезание канавки вне горизонтального растворного шва кладки, то есть в самой кладке);
2. Глубина канавки около 60 мм, минимальная ее ширина 10 мм;
3. Канавка должна быть очищена водой и просушена сжатым воздухом с последующим нагнетанием с помощью пистолета вяжущий раствор внутрь неё;
4. Затем выполняется монтаж стержня в канавку;
5. Нагнетается поверх стержня вяжущий раствор для его закрепления, затем выполняются окончательные работы [105].

Иллюстрация процесса установки стержней показана на рисунках 4.39 и 4.40.

Усиление производится с учетом установленного класса сейсмостойкости мечети на 8,6 баллов, который был определен в третьей главе.

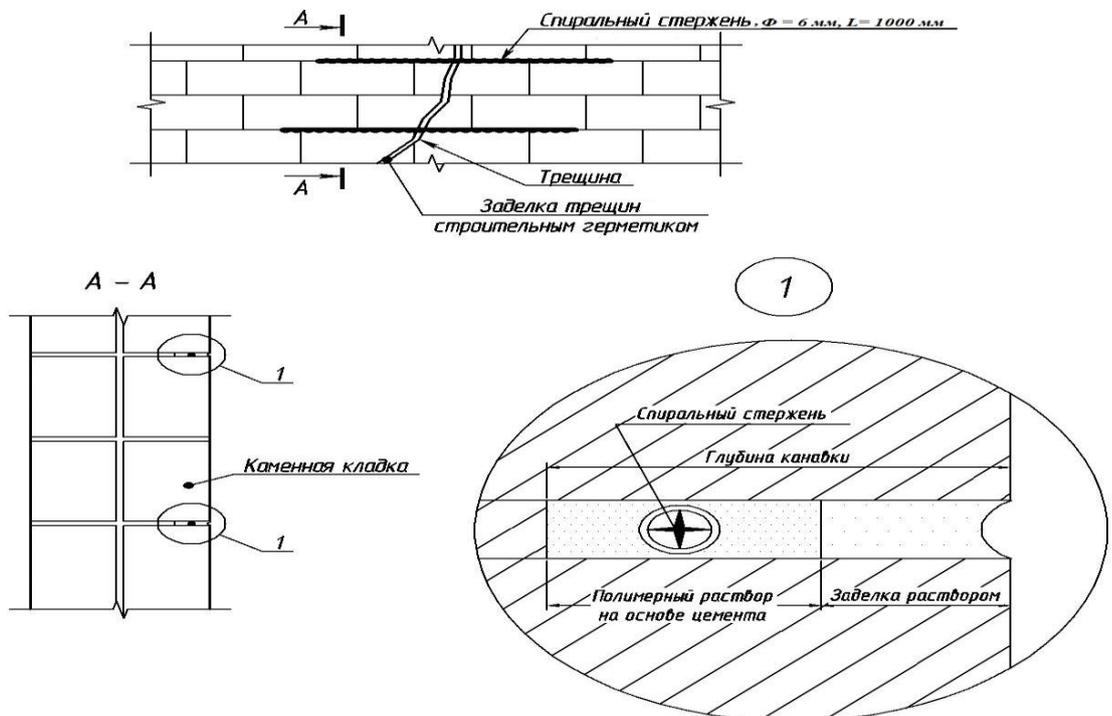


Рисунок 4.39 – Укрепление и заделка кладки Великой мечети г. Алеппо против трещин с помощью спиральных стержней из нержавеющей стали.

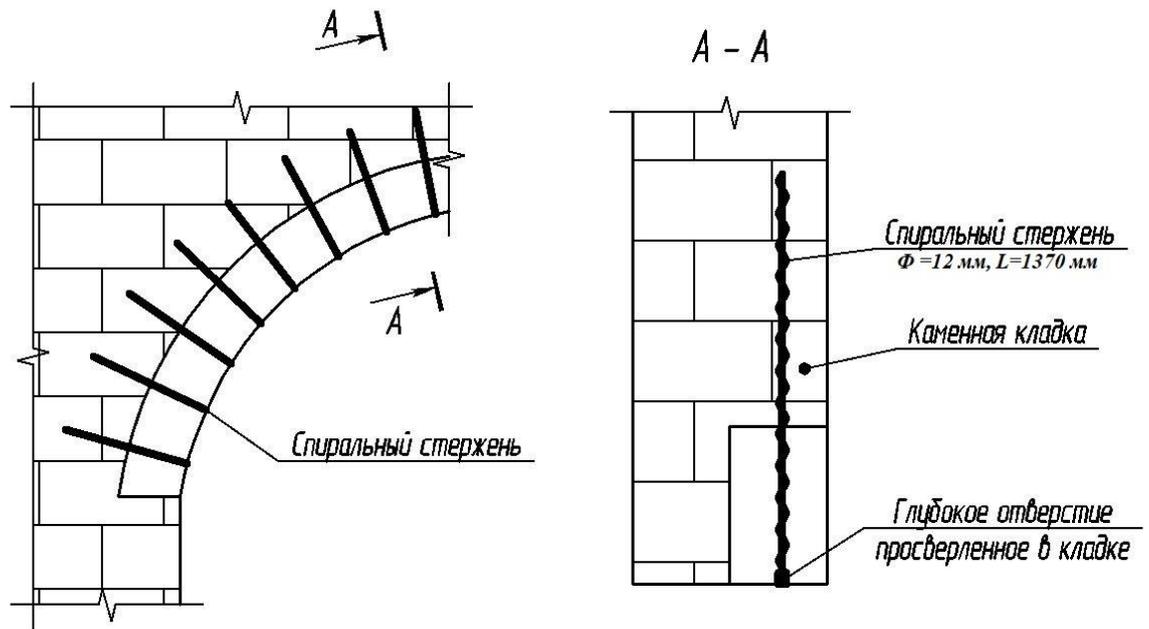


Рисунок 4.40 – Укрепление и анкеровка арочных перемычек и арок Великой мечети г.Алеппо при наличии трещин с помощью спиральных стержней из нержавеющей стали.

Для обоснования эффективности использования предлагаемых решений на следующем этапе исследования была выполнена расчётно-теоретическая оценка предлагаемых решений сейсмоусиления после восстановления на рассматриваемом культовом здании мусульманского зодчества Великой мечети в г. Алеппо.

4.5 Проверка эффективности принятых решений с использованием традиционных методов сейсмоусиления после восстановления с учетом класса сейсмостойкости

Для оценки эффективности предлагаемых решений были выполнены расчёты с использованием расчётной модели №3 соответствующей её состоянию после восстановления с использованием традиционных методов усиления. Для этого на этом этапе исследования была построена *третья модель*, соответствующая состоянию после восстановления, которая была построена по

тому же принципу, как и первая модель мечети, но имеющая другие исходные параметры и жесткостные характеристики материалов:

Для фундамента коэффициент альфа принят $\alpha = 1500$, $R = 1,2$ МПа, что соответствует бутовый камень марки 1000 на растворе марки 25. Следовательно модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки E_0 при кратковременной нагрузке для фундамента равен: $E_0 = 1500 \cdot 2 \cdot 1,2 = 3600$ МПа = $= 366972,47706$ т/м²

Для стены коэффициент альфа $\alpha = 1500$ $R = 7,0$ МПа, что соответствует природный камень марки 600 на растворе марки 25, $R_{sku} = 17,95$ МПа, что соответствует кладке, усиленной стержнями из углепластика и спиральными стержнями из нержавеющей стали. Следовательно, модуль упругости (начальный модуль деформации) кладки усиленной вышеуказанными стержнями E_0 при кратковременной нагрузке равен: $E_0 = 1500 \cdot 2 \cdot 17,95 = 53850$ МПа = $5491171,737$ т/м².

Расчётная модель №3 представлена на рисунке 4.41.

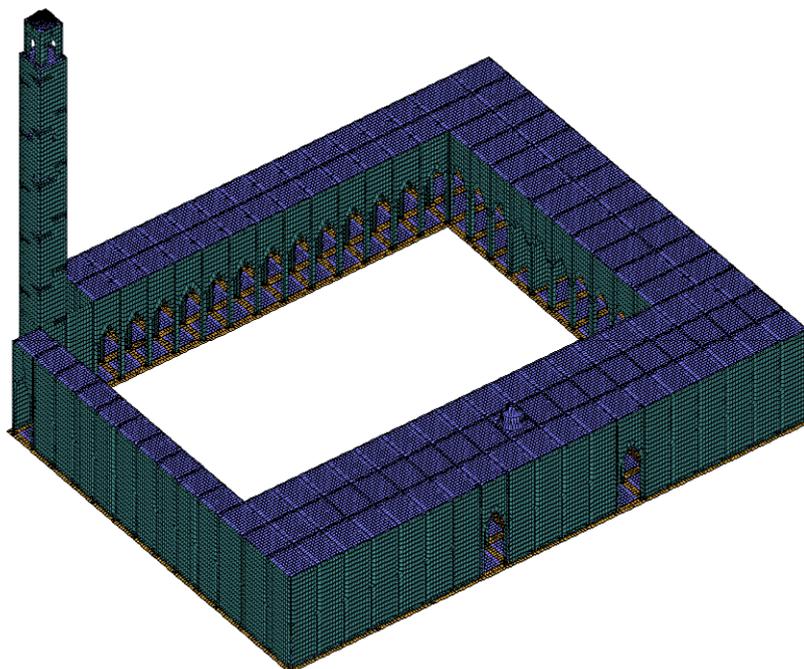


Рисунок 4.41 – Расчётная схема №3 Великой мечети в г. Алеппо соответствующая состоянию после восстановления.

Анализ результатов (по заданным трёхкомпонентным акселерограммам) на землетрясение уровня 8,6 баллов соответствующего установленному классу сейсмостойкости

После восстановления

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 4.19 – 4.21 и некоторые из них показаны на рисунках 4.42– 4.45.

Таблица 4.19 – Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения T,с	После восстановления	
	Максимальные перемещения по X (X_{max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{max} , мм)
Высокочастотное землетрясение (T= 0,1 – 0,3с)	0,219	0,199
Среднечастотное землетрясение (T= 0,4 – 0,7с)	4,68	3,28
Низкочастотное землетрясение (T= 1,0 – 1,7с)	13,7	18,2

Таблица 4.20 – Значения изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_x , N_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения T,с	После восстановления			
	Максимальные M_x кН·М	Максимальные M_y кН·М	Максимальные N_x кН	Максимальные N_y кН
Высокочастотное землетрясение (T= 0,1 – 0,3с)	19,6	18,14	278,5	236,3

Продолжение таблицы 4.20

Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	282,4	323,6	6227,2	5285,8
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	1892,7	1490,6	20136,8	14219,7

Таблица 4.21 – Значения поперечных сил Q_x , Q_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения $T, с$	После восстановления	
	Максимальные Q_x кН	Максимальные Q_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	1176,8	2462,3
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	18534,6	38834,5
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	85808,6	90417,7

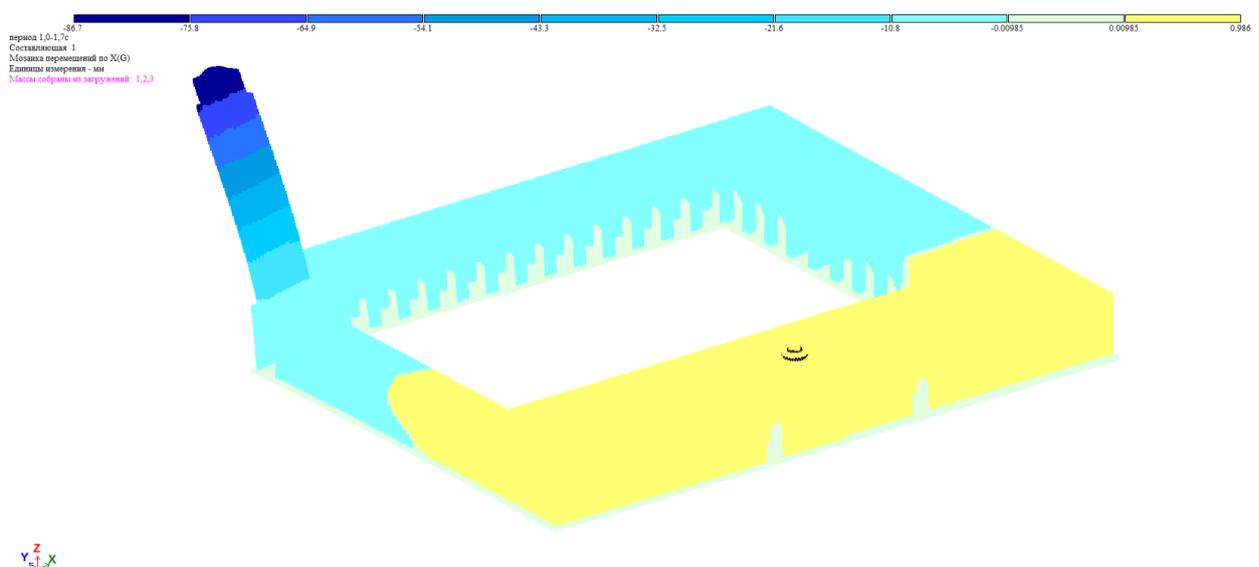


Рисунок 4.42 – Мозаика перемещений по X после восстановления здания Великой мечети в г.Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

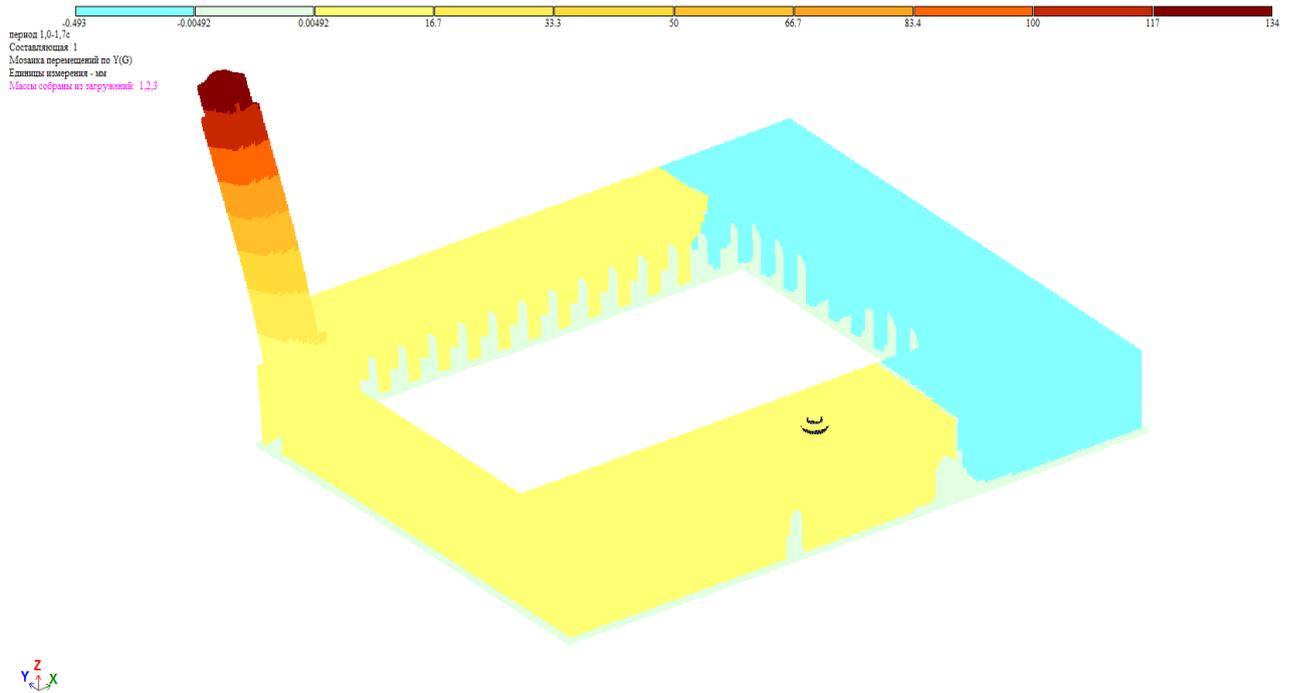


Рисунок 4.43 – Мозаика перемещений по Y после восстановления здания Великой мечети в г.Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

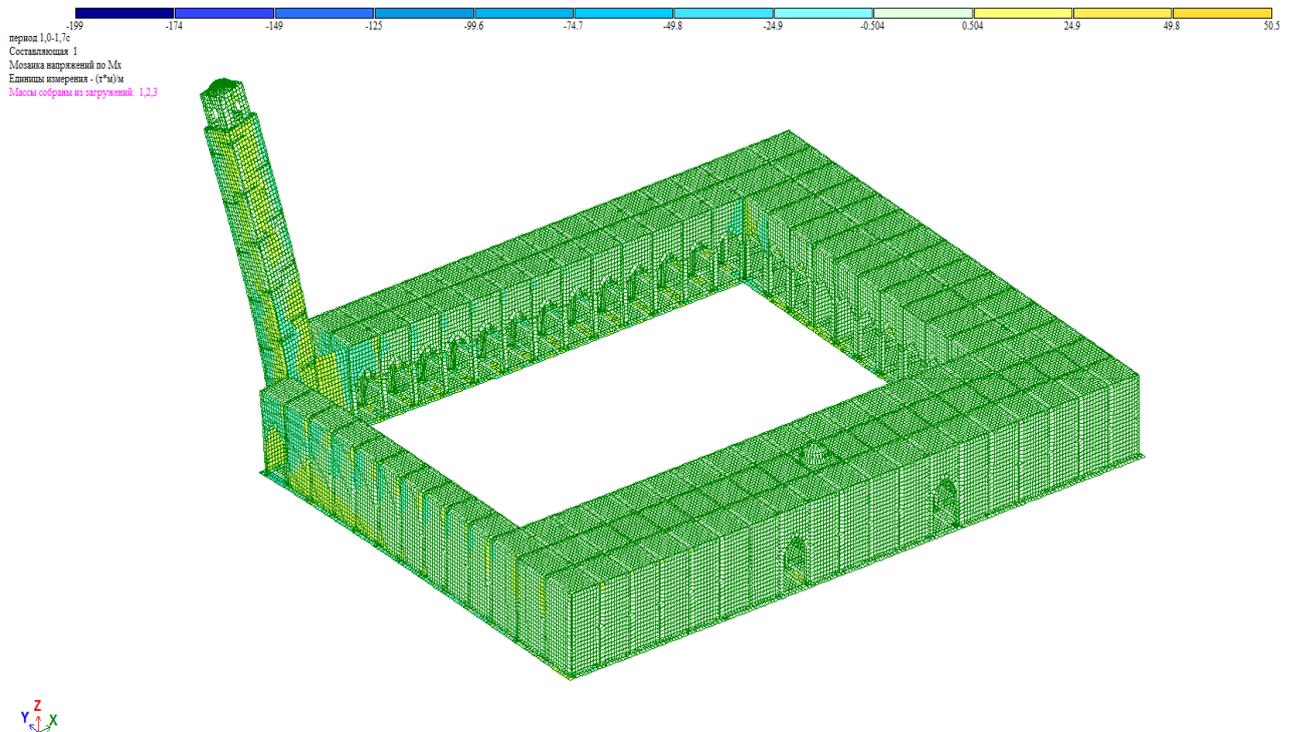


Рисунок 4.44 – Мозаика напряжений по M_x после восстановления здания Великой мечети в г.Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

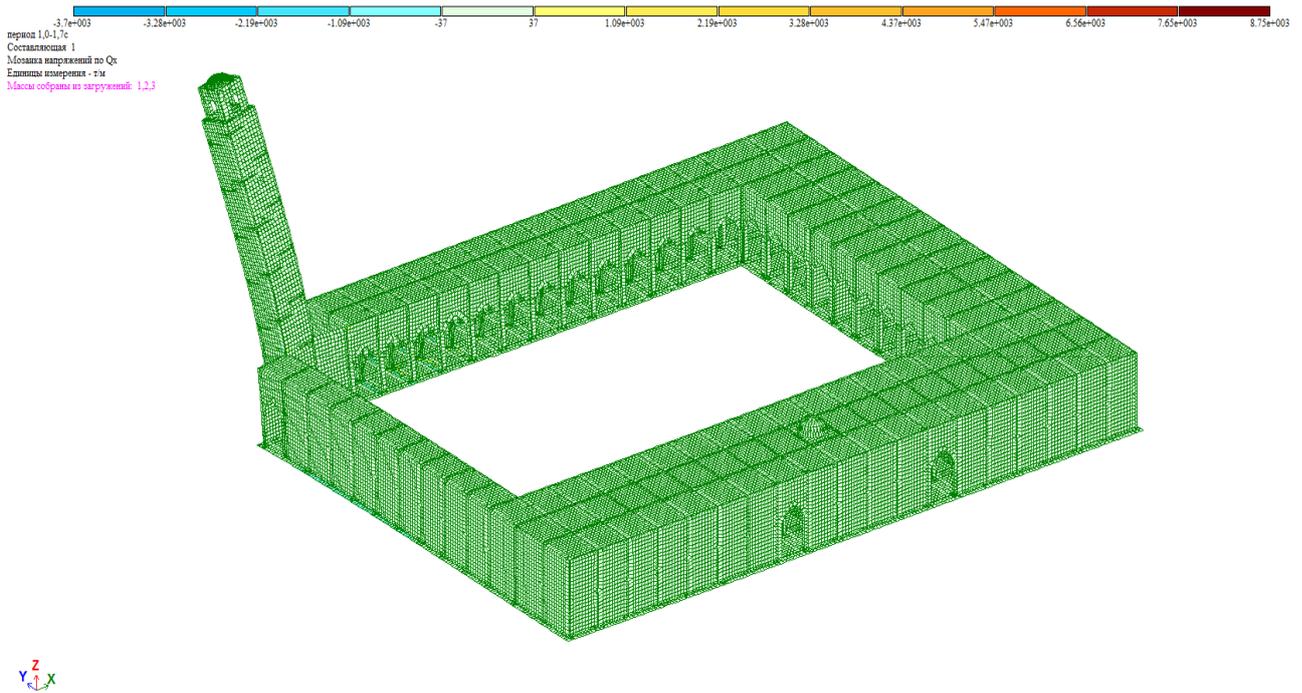


Рисунок 4.45 – Мозаика перемещений по Q_x после восстановления здания Великой мечети в г. Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

Проверка несущей способности стены

Были выполнены расчёты несущей способности стены с учётом предлагаемого усиления. Это усиление было обосновано расчетом, представленном далее. Суть расчёта заключается в определении зон строительных конструкций, в которых напряжения превышают допустимые значения. Недостаток несущей способности кладки в каждом элементе компенсируется армированием спиральными стержнями из нержавеющей стали и (или) стержнями из углеполимера. Для определения наличия избыточных напряжений, использовалась формула 4.5.

Методика расчета каменных строительных конструкций, армированных стержнями из углеполимера или спиральными стержнями из нержавеющей стали в случае внецентренного сжатия, основана на расчётных методах из СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78], по следующему алгоритму по формулам (4.5-4.9):

$$N \leq m_g \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot A_c \cdot \omega \quad (4.5)$$

где:

N – расчётная продольная сила; m_g – коэффициент, учитывающий эффект длительной нагрузки; m_k – коэффициент работы кладки ($m_k = 1$ для кладки без повреждений, $m_k = 0,7$ для кладки с повреждениями); φ – коэффициент потери устойчивости принимаемый по СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78]; A – площадь сечения усиливающего элемента (спирального стержня из нержавеющей стали или стержня из углеполимера); R_{sku} – прочность усиленной армированием кладки, который можно найти по формуле 4.6, то есть для расчёта усиления строительных конструкций из каменной кладки с помощью стержней из композитных материалов и спиральных стержней из нержавеющей стали, следует прибавить к расчетному сопротивлению кладки расчетное сопротивление усиливающего элемента (стержней из углеполимера или спиральных стержней из нержавеющей стали) [7,32,34,4749,54,63,78,80,85]:

$$R_{sku} = k \cdot R + R_{\text{стержня}} \quad (4.6)$$

где:

R – расчетное сопротивление кладки;

$R_{\text{стержня}}$ – расчетное сопротивление усиливающего элемента, которое можно найти по формуле 4.7:

$$R_{\text{стержня}} = \frac{2 \cdot \mu_{\text{пов}} \cdot R_{sn}}{100} \quad (4.7)$$

где: R_{sn} – расчетное сопротивление усиливающего элемента (стержней) на растяжение;

$\mu_{\text{пов}}$ – коэффициент поверхностного армирования, который вычисляется по формуле 4.8:

$$\mu_{\text{пов}} = \frac{A_s}{A_k} \cdot 100 \quad , \quad (4.8)$$

где:

A_s – площадь сечения арматуры;

A_k – площадь сечения кладки.

Формулу 4.6 можно записать в следующем виде (формула 4.9):

$$R_{sku} = k \cdot R + \frac{2 \cdot \mu_{пов} \cdot R_{sn}}{100} \quad (4.9)$$

Пример расчёта простенка после усиления для состояния здания Великой мечети в Алеппо после восстановления:

Расчет простенка:

Для проведения расчёта была выбрана часть простенка здания Великой мечети (рисунок 4.46).

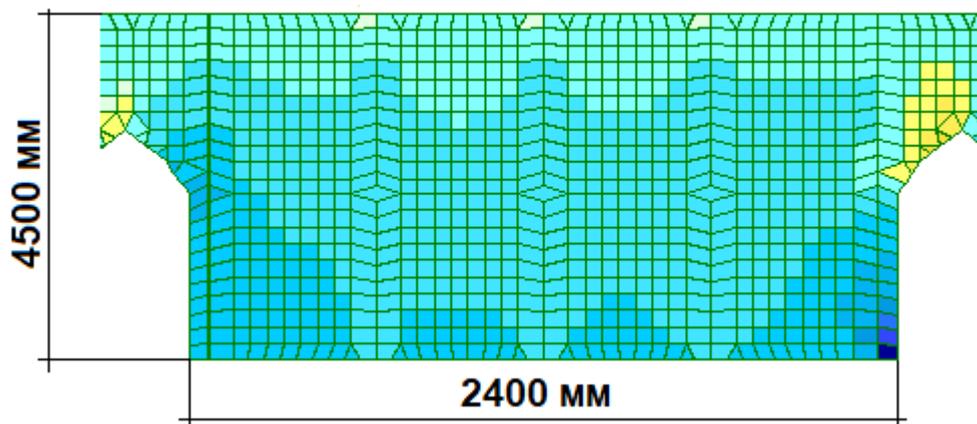


Рисунок 4.46 – Простенок в здании Великой мечети г.Алеппо.

1. Исходные данные: $N=14219,7$ кН

$$e_i = \frac{M_i}{N_i} = \frac{1490,6}{14219,7} = 0,104 = 10,4 \text{ см.}$$

2. Характеристика каменной кладки: природный камень марки 600 на растворе 25, $R=7$ МПа, $E=1500 \cdot 2 \cdot 7=21000$ МПа.

3. Проверка прочности простенка:

Толщина стены $A=500$ мм. =50см., ширина простенка $b=2400$ мм.=240 см., высота простенка $H_{пр}=4500$ мм. =450 см.

$$A_c = A \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_0}{b}\right) = 50 \cdot 240 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 10,4}{240}\right) = 11000 \text{ см}^2$$

Гибкость простенка

$$\lambda_{hc} = \frac{H_{пр}}{b_c} = \frac{450}{(240 - 2 \cdot 10,4)} = 2,052$$

Где $b_c = (b - 2 \cdot e_0) = (240 - 2 \cdot 10,4) = 219,2$ см. – высота сжатой зоны сечения простенка.

Гибкость простенка

$$\lambda = \frac{H_{пр}}{b} = \frac{450}{240} = 1,875$$

По таблице 19 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78] по найденной гибкости простенка находим коэффициент продольного изгиба сжатой части $\varphi = 1$.

Коэффициент продольного изгиба φ_1 при внецентренном сжатии находим по формуле 15 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78]:

$$\varphi_1 = \frac{\varphi + \varphi_c}{2} = \frac{1 + 1}{2} = 1$$

Коэффициент увеличения расчётного сопротивления ω при внецентренном сжатии определяется по таблице 20 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [78]:

$$\omega = 1 + \frac{e_0}{h} = 1 + \frac{10,4}{240} = 1,043 < 1,45$$

По формулам 4.6-4.9 находим расчётное сопротивление кладки, усиленной стержнями:

$$R_{\text{стержня}} = \frac{2 \cdot \mu_{\text{ПОВ}} \cdot R_{sn}}{100}$$

$$\mu_{\text{ПОВ}} = \frac{A_s}{A_k} \cdot 100$$

$$\begin{aligned} R_{skl} &= k \cdot R + R_{\text{стержня}} = k \cdot R + \frac{2 \cdot \mu_{\text{ПОВ}} \cdot R_{sn}}{100} = \\ &= 2 \cdot 713,8 + \frac{2 \cdot 0,04 \cdot 503736,74}{100} = 1427,6 + 402,9 = \\ &= 1830,5 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2} = 17,95 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Шаг стержней продиктован расстоянием между швами, где расстояние между швами равно 300 мм, а толщина стены 500 мм (рисунок 4.47).

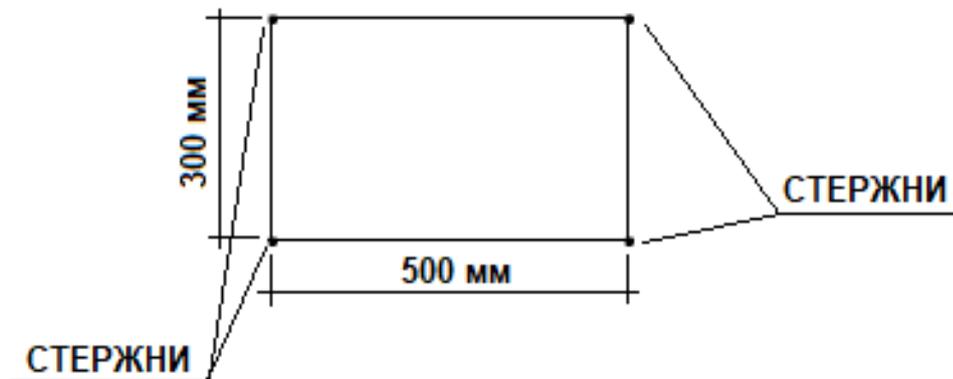


Рисунок 4.47 – Расположение стержней в простенке.

Несущая способность простенка можно вычислить по формуле [78]:

$$N \leq m_g \cdot \varphi_1 \cdot R_{sku} \cdot A_c \cdot \omega$$

$$N = 14219,7 \text{ кН} < m_g \cdot \varphi_1 \cdot R_{sku} \cdot A_c \cdot \omega = 1 \cdot 1 \cdot 179,95 \cdot 11000 \cdot 1,043 = \\ = 2064566,35 \text{ кгс} = 20246,48 \text{ кН}, \text{ то есть прочность простенка достаточна.}$$

Таким образом, усиление здания Великой мечети в г. Алеппо с помощью вышеуказанных стержней является необходимым, эффективным и оправданным шагом.

В здании Великой мечети г. Алеппо особое значение было уделено минарету, который учитывался в расчётной схеме. Стоит заметить, что минарет отделён швами от галереи мечети

Восстановление разрушенного в результате военных действий минарета Великой мечети г. Алеппо производится с использованием традиционных решений, принятых в сейсмостойком арабском строительстве.

План минарета [8-10] в основании квадратный с размерами 4,85 x 4,85, его высота 45 метров (рисунки 4.48-4.49).



Рисунок 4.48 – 3D минарета Великой мечети г. Алеппо, Сирия.

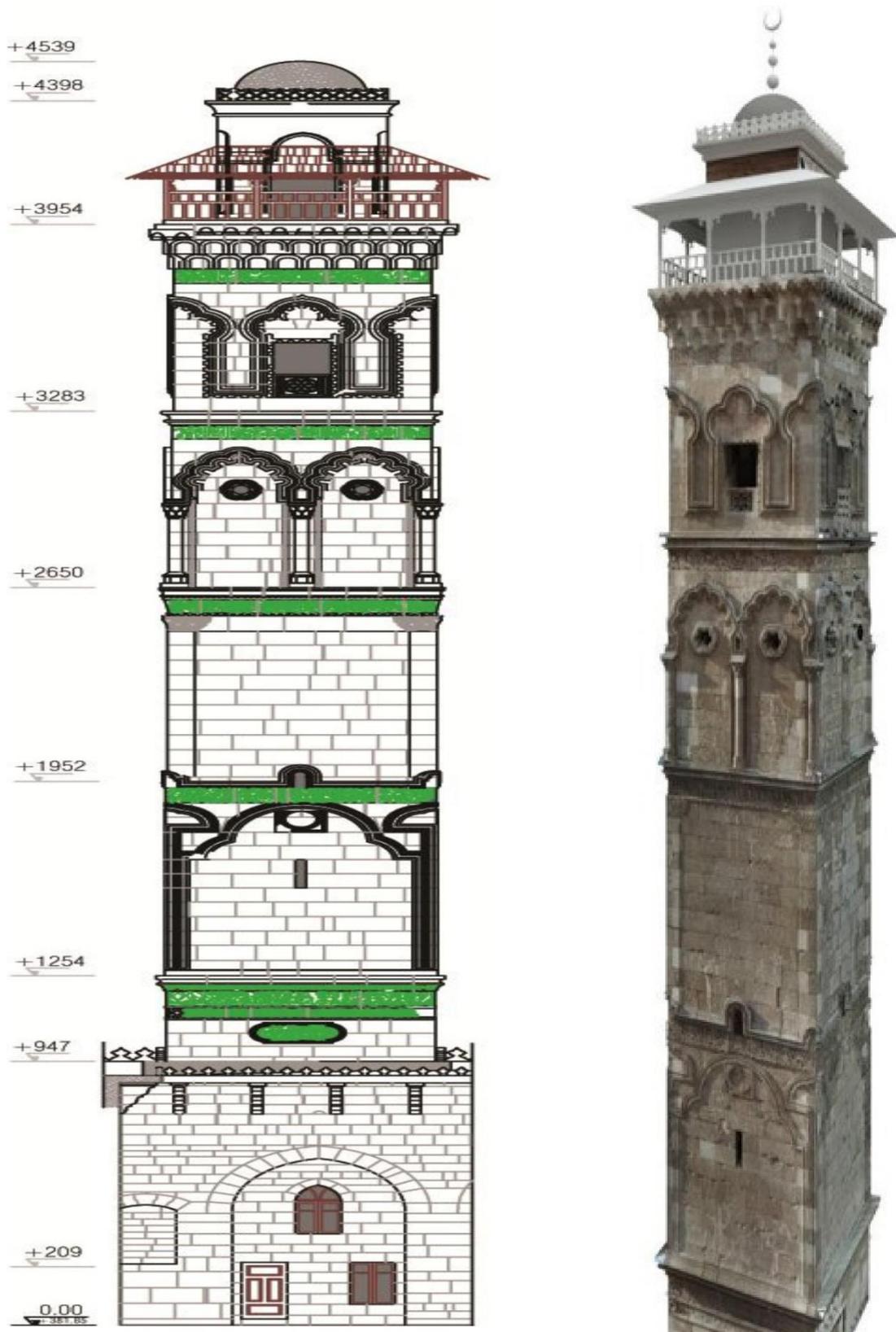


Рисунок 4.49 – Минарет Великой мечети г. Алеппо, Сирия.

Для оценки сейсмостойкости минарета проводилось сравнение максимальных перемещений по X и Y и максимальных значений M_X , M_Y , N_X , N_Y , Q_X , Q_Y в уровне верхней точки минарета. На рисунке 4.50 показана расчётная модель минарета Великой мечети г. Алеппо, а на рисунках 4.51-4.52 показаны мозаики перемещений по X и Y полученные в результате выполненного расчёта.

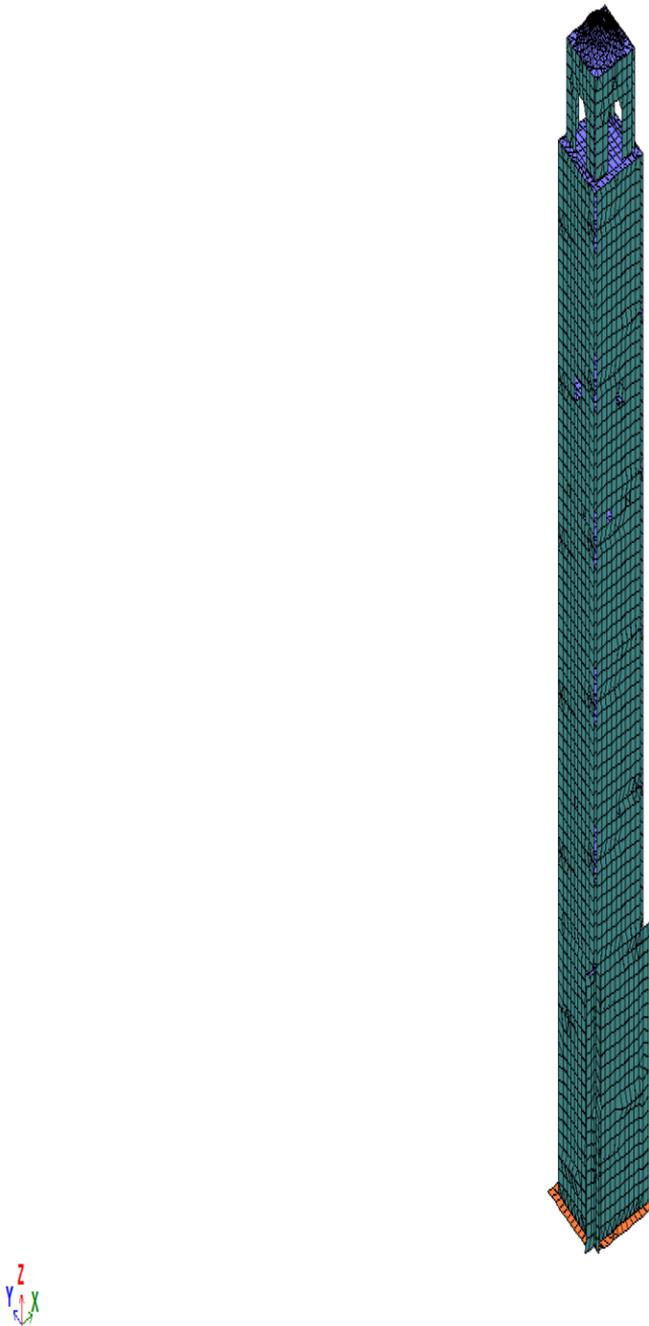


Рисунок 4.50 – Расчётная схема минарета Великой мечети г. Алеппо, Сирия.

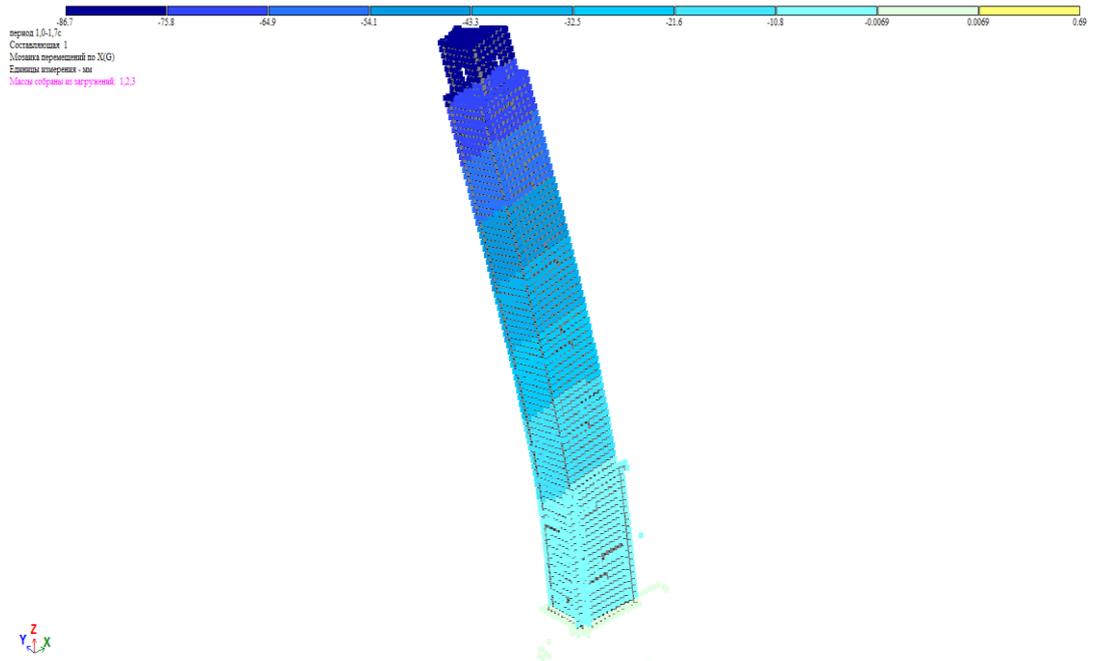


Рисунок 4.51 – Мозаика перемещений по X минарета Великой мечети г. Алеппо, Сирия, при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

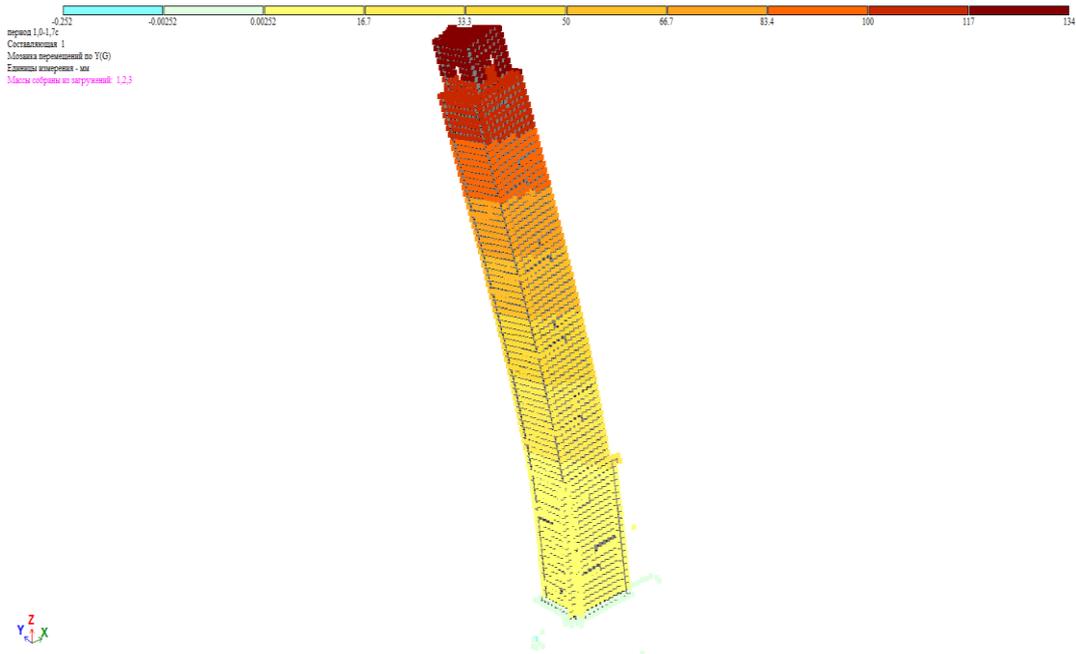


Рисунок 4.52 – Мозаика перемещений по Y минарета Великой мечети г. Алеппо, Сирия, при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

Анализ результатов расчёта минарета показал снижение значений перемещений и усилий в минарете по сравнению с образцовым состоянием до разрушений.

4.6. Выводы по главе

1. На основании выполненных исследований установлено что независимо от частотного состава воздействия при интенсивности 8,6 баллов оставшиеся части Великой мечети в г. Алеппо получают окончательное разрушение.
2. Дан обзор существующих методов повышения сейсмостойкости зданий включающий традиционные, так и нетрадиционные подходы.
3. Предложены решения для сейсмоусиления и восстановления культовых зданий мусульманского зодчества на примере здания Великой мечети в г. Алеппо с использованием традиционных методов в виде армирования стержнями из углеполимера и спиральными стержнями из нержавеющей стали.
4. Выполнена расчётно-теоретическая оценка предлагаемых решений сейсмоусиления после восстановления, результаты которой показали эффективность принятого решения.

Здания и сооружения культового значения, такие как мусульманские мечети, являются в первую очередь общественными зданиями, и местом скопления большого количества людей во время молитвы. Если случится землетрясение в это время, то неизбежно последуют такие реакции людей как паника, страх, давка и возможно даже разрушение здания. Для предотвращения таких реакции и сохранения жизни людей и самого здания применение нетрадиционного подхода в виде сейсмоизоляции всего здания мечети может явиться оправданным решением. Обоснование возможности применения сейсмоизоляции мечети представлено в следующем разделе диссертации.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ СЕЙСМОЗАЩИТЫ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ МУСУЛЬМАНСКОГО ЗОДЧЕСТВА НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЙ МЕЧЕТИ Г. АЛЕППО

В этой главе продолжены мероприятия по сейсмоусилению здания Великой мечети в г. Алеппо, с использованием нетрадиционных подходов в виде сейсмоизоляции всего здания мечети, так как оно является социально важным зданием культового значения, где скапливается большое количество верующих людей.

Далее выполнена расчётно-теоретическая оценка сейсмостойкости здания мечети и представлены её результаты после предлагаемого решения по усилению нетрадиционным методом в виде сейсмоизоляции всего здания с целью оценить возможность и эффективность применения предложенного решения.

Методика расчетного исследования подробно описана ранее в четвертой главе. Расчёт выполнялся в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016, позволяющий получить все необходимые параметры системы, такие как усилия в элементах, перемещения, периоды колебаний, а также визуализировать формы колебаний.

5.1. Предлагаемое сейсмоусиление культового здания мусульманского зодчества с использованием нетрадиционных методов в виде сейсмоизоляции

Как показали исследования зданий и сооружений, усиленные сейсмоизолирующими резинометаллическими [104] опорами (рисунок 5.1), они имеют высокую надежность. К сожалению затраты, на такие усиления очень высоки, но они вполне окупаются важностью и ценностью здания или сооружения с точки зрения архитектуры и культурного наследия [2, 12 15, 18, 23, 26, 38-39, 41- 42, 46, 55, 60 ,72, 77, 88, 91- 92, 96- 97,116,118].

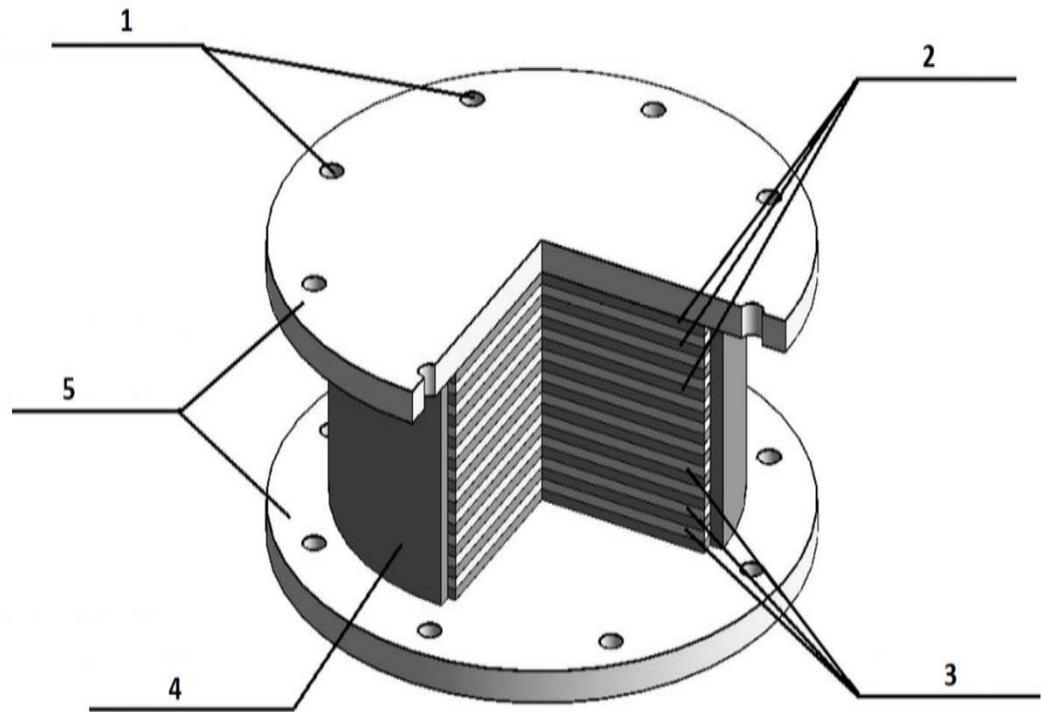


Рисунок 5.1 – Эластомерная опора с высокой способностью к диссипации энергии:

- (1) – отверстия под болты для крепления опоры к субструктуре и суперструктуре;
 (2) – слой резины; (3) – пластины стальные; (4) – резиновое покрытие, защищающее внутренние слои резины и металла; (5) – Верхняя и нижняя стальные пластины для крепления к субструктуре и суперструктуре.

Для сейсмоизоляции Великой мечети в г.Алеппо предлагается использовать под колоннами и стенами сейсмоизолирующие резинометаллической опоры с высокой способностью к диссипации энергии марки SI-N 400/100, (рисунки 5.2 - 5.3), производства итальянской компании «FIP INDUSTRIALE» разработанные для максимального перемещения равного ± 200 мм. Резиновая смесь (N- обычная резина) использованная при производстве опоры SI-N 400/100 имеет динамический модуль упругости при сдвиге (G_{din})=0,4 МПа.



Рисунок 5.2 – Эластомерная опора «SI-N 400/100» производства итальянской компании «FIP INDUSTRIALE» в разрезе.



Рисунок 5.3 – Обозначения размеров эластомерной опоры марки «SI-N 400/100».

Характеристики такой опоры приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расшифровка технических характеристик РМО марки «SI-N 400/100» от завода-изготовителя «FIP INDUSTRIALE».

№№	Характеристики сейсмоизолирующей резинометаллической опоры с высокой способностью к диссипации энергии.	Маркировка резинометаллической опоры SI-N 400/100
1	V - Максимальная вертикальная нагрузка с учетом сейсмического воздействия на изолятор, кН.	1180
2	F_{zd} - Максимальная вертикальная нагрузка без учета сейсмического воздействия на изолятор, кН.	3720
3	K_e - Эффективная горизонтальная жесткость, кН/мм.	1,01
4	K_v - Вертикальная жесткость, кН/мм.	912
5	D_g - Диаметр резины, мм	400
6	t_e - Общая толщина резины, мм	100
7	h - Высота, без учета внешних стальных пластин, мм	178
8	H - Общая высота, включая внешние стальные пластины, мм	228
9	Z - Длина стороны внешних стальных пластин, мм	450
10	W - Вес сейсмоизолирующей опоры, кг	166
РМО проектирована для максимального перемещения равного ± 200 мм		

5.1.1. Проектные проработки установки сейсмоизоляции

На рисунках 5.4–5.6 приведены планы и разрезы Великой мечети в г. Алеппо.

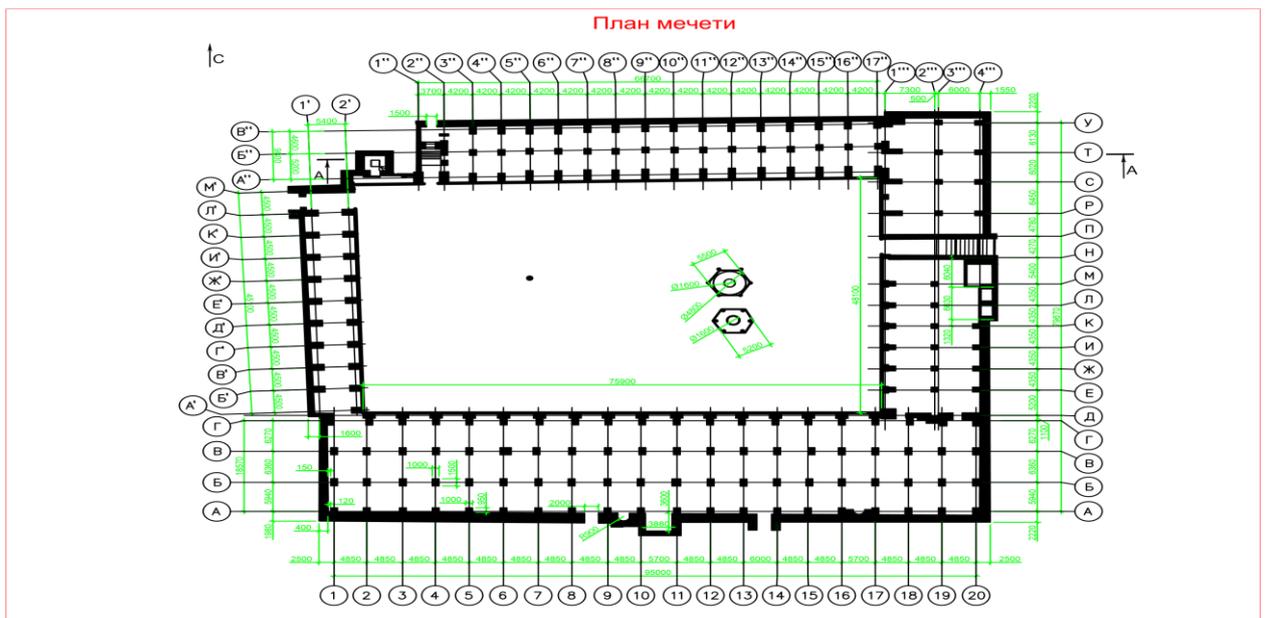


Рисунок 5.4 – План мечети.

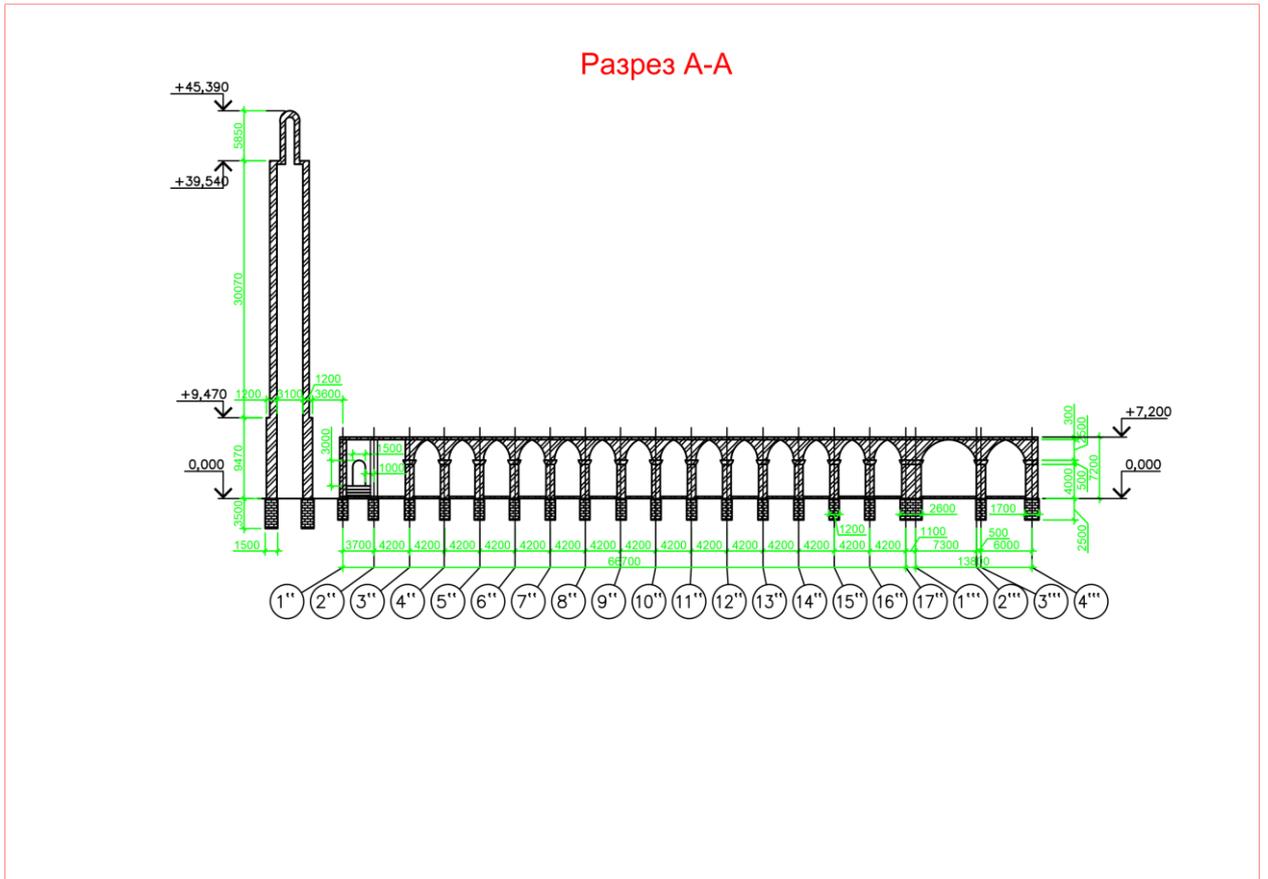


Рисунок 5.5 – Разрез А-А мечети.

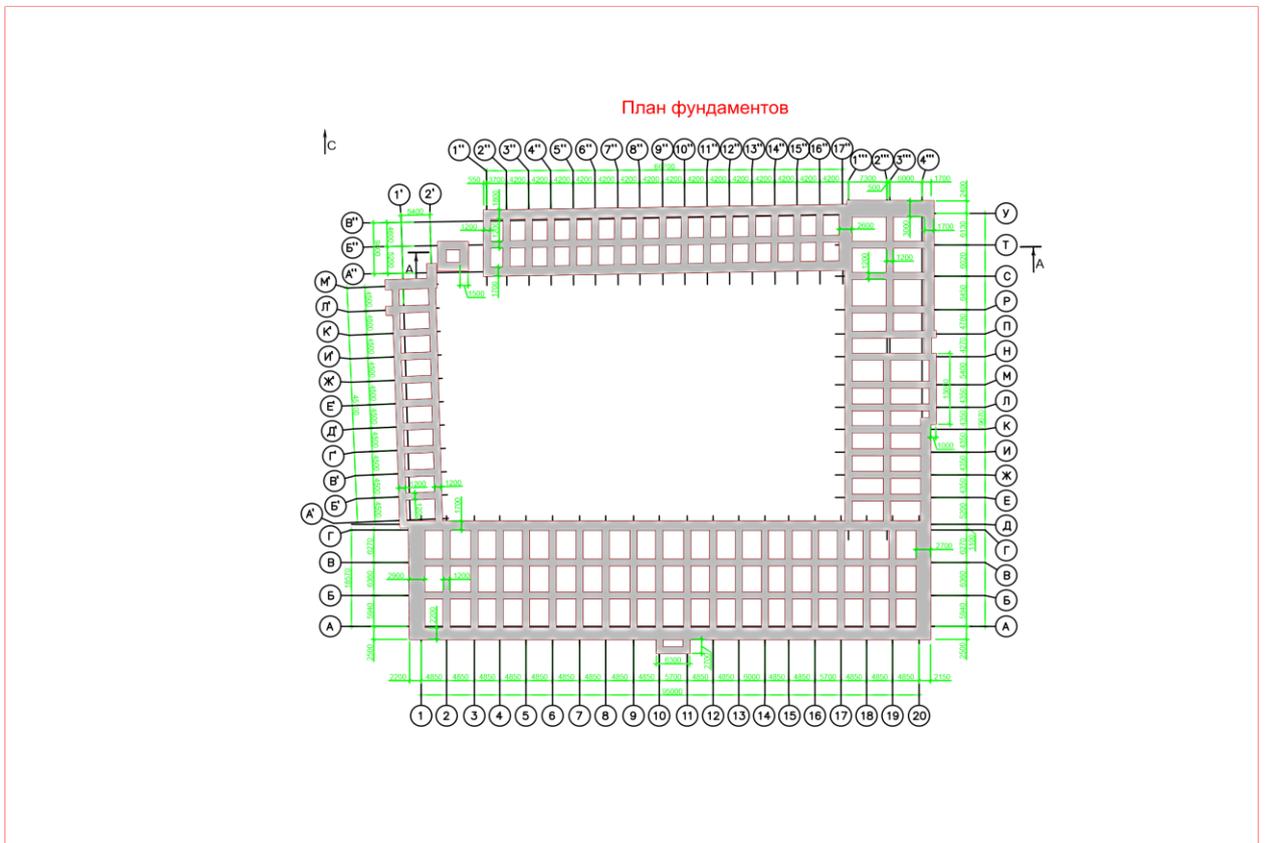


Рисунок 5.6 – План фундамента мечети.

Расположение сейсмоизолирующих резинометаллических опор на плане фундамента мечети

Общее количество установленных сейсмоизолирующих резинометаллических опор (РМО) марки «SI-N 400/100» производства компании «FIP INDUSTRIALE» под зданием Великой мечети г.Алеппо 216 штук, они расположены внизу здания между верхом фундамента и надфундаментной частью здания. На рисунке 5.7 точками показано расположение РМО на плане фундамента, а на рисунках 5.8-5.9 установленная сейсмоизолирующая опора (РМО) под зданием великой мечети г Алеппо (в разрезе).

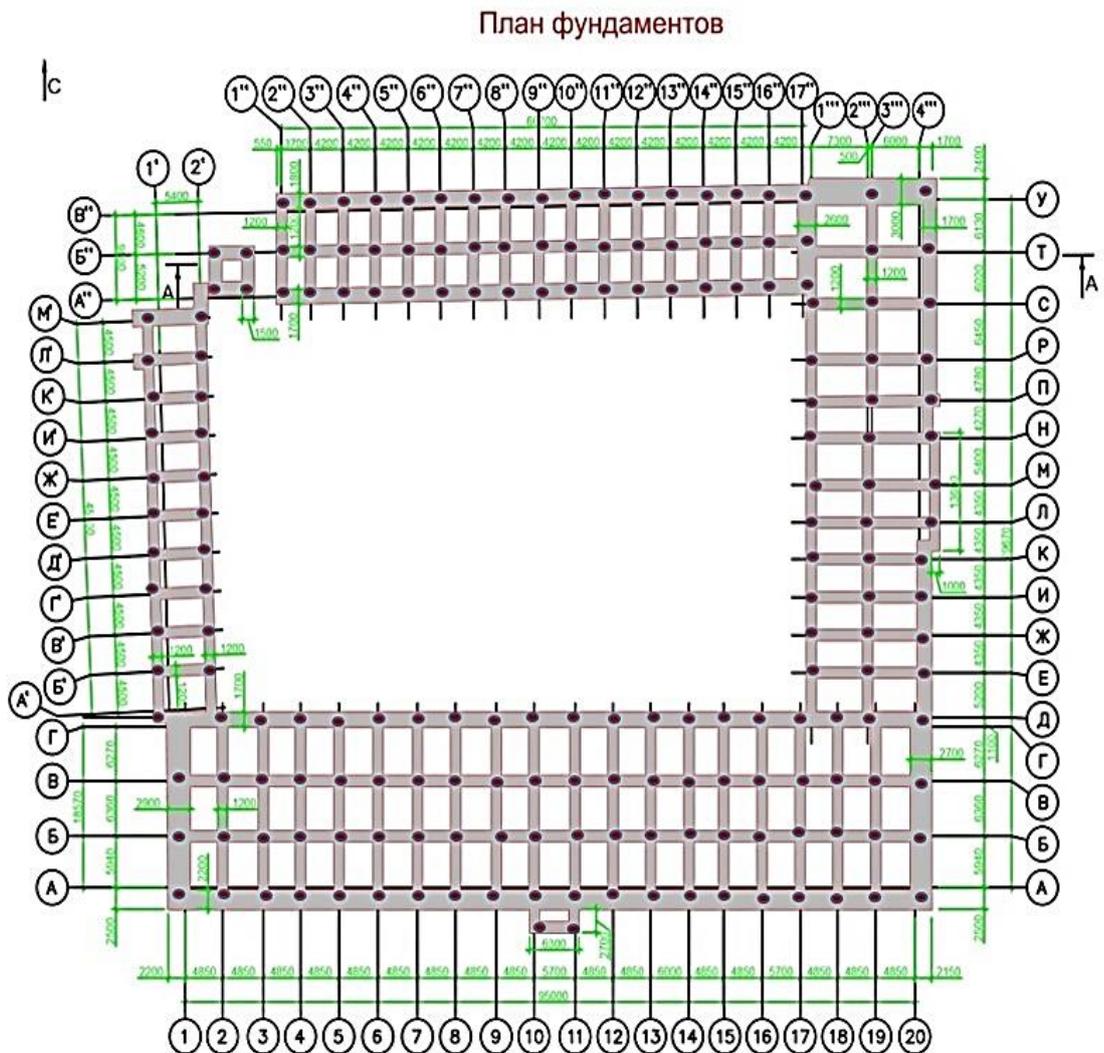


Рисунок 5.7 – расположение сейсмоизолирующих РМО под зданием мечети.

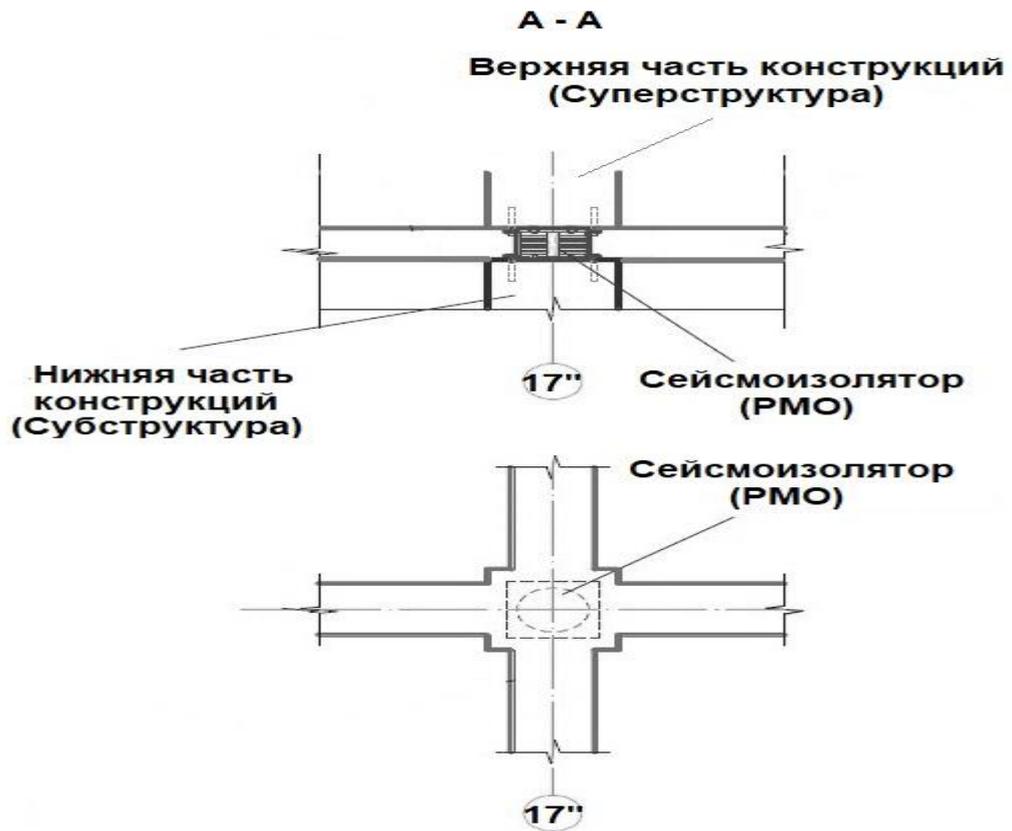


Рисунок 5.8 – Установленная сейсмоизолирующая опора (PMO) под зданием великой мечети г Алеппо (в разрезе).

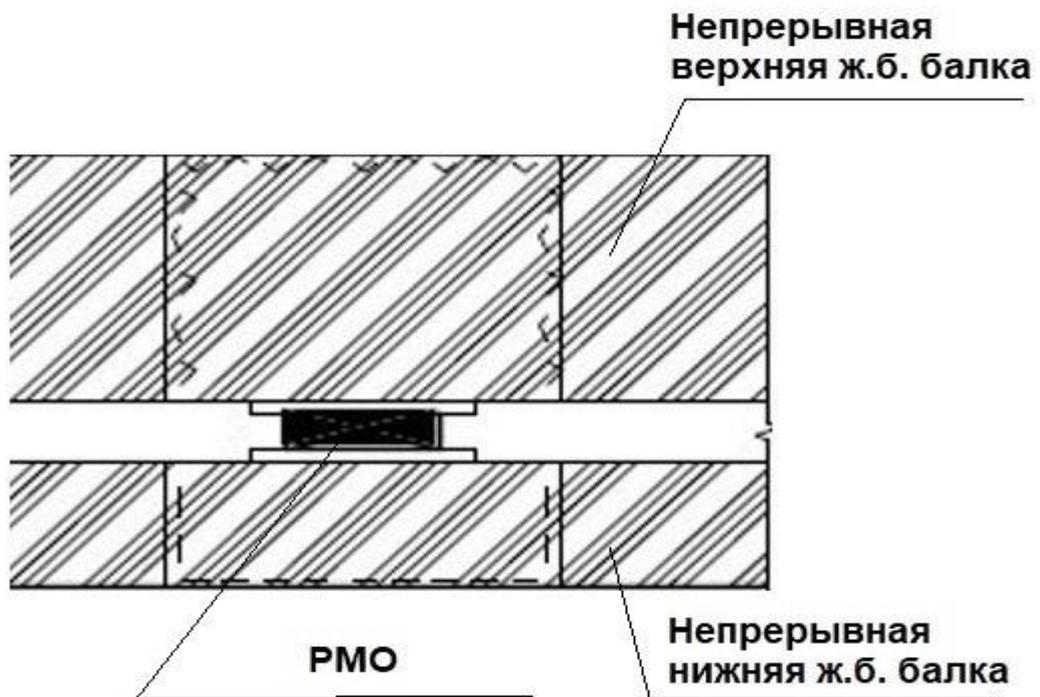


Рисунок 5.9 – фрагмент разреза, установленного под зданием Великой мечети г.Алеппо, сейсмоизолятора (PMO).

Технология установки сейсмоизолирующих опор в конструкциях архитектурных памятников широко известна и в России, и за рубежом. Учитывая, конструктивные особенности рассматриваемого культового здания (наличие минарета, протяжённость длинных галерей и т.п.) на примере Великой мечети в г. Алеппо, была использована технология, разработанная М.Г. Мелкумяном [113] и внедрённая в различные архитектурные памятники зодчества.

5.1.2. Технология установки сейсмоизолирующих резинометаллических опор

Технология установки сейсмоизолирующих резинометаллических опор (РМО) для каменных стен Великой мечети г. Алеппо

На рисунке 5.10. наглядно показана технология и порядок установки РМО. Данная технология используется в стенах где прорубается прямоугольный проем армируется арматурным каркасом, его нижняя часть, устанавливается и анкеруется стальная пластина с анкерными гильзами для крепления будущего РМО, наращивается арматурный каркас влево и вправо и пропускаются по обеим сторонам стены для создания непрерывной нижней железобетонной [83] балке по всему периметру здания непосредственно над фундаментом. Затем бетонируется арматурный каркас под РМО. После достижения бетоном проектной прочности закрепляется РМО на нижней стальной пластине.

После установке и крепления РМО на нижней стальной пластине сверху сооружается верхний арматурный каркас с закрепленной анкерами на нем верхней стальной пластиной для крепления РМО сверху. Далее наращивается арматурный каркас влево и вправо и пропускаются по обеим сторонам стены для создания непрерывной верхней железобетонной балке по всему периметру здания непосредственно под стены. Затем бетонируется верхний арматурный каркас над РМО. После достижения бетоном проектной прочности закрепляется РМО к верхней стальной пластине. Между двумя проемами, где находятся РМО, вырезаются три маленьких проёма для крепления к стене поперечного арматурного каркаса, для связывания арматурных каркасов связывающих, два

соседних РМО, созданных для формирования нижней и верхней железобетонных балок, над фундаментом и непосредственно под стеной. Затем бетонируются арматурные каркасы между двумя РМО, образуя, таким образом, нижнюю и верхнюю неразрезные железобетонные балки по всем несущим стенам здания. Части существующих стен между РМО, после достижения бетоном проектной прочности, удаляются, создавая зазоры, и здание окажется отделенным от фундамента и связанным с ним только сейсмическими изоляторами (РМО).

На рисунке 5.10 показан подробно весь процесс, а на рисунке 5.11 показан этот же процесс, но в 3d. Следует помнить о том, что прорубать больше двух проемов подряд нежелательно, далее через две опоры повторяется цикл.

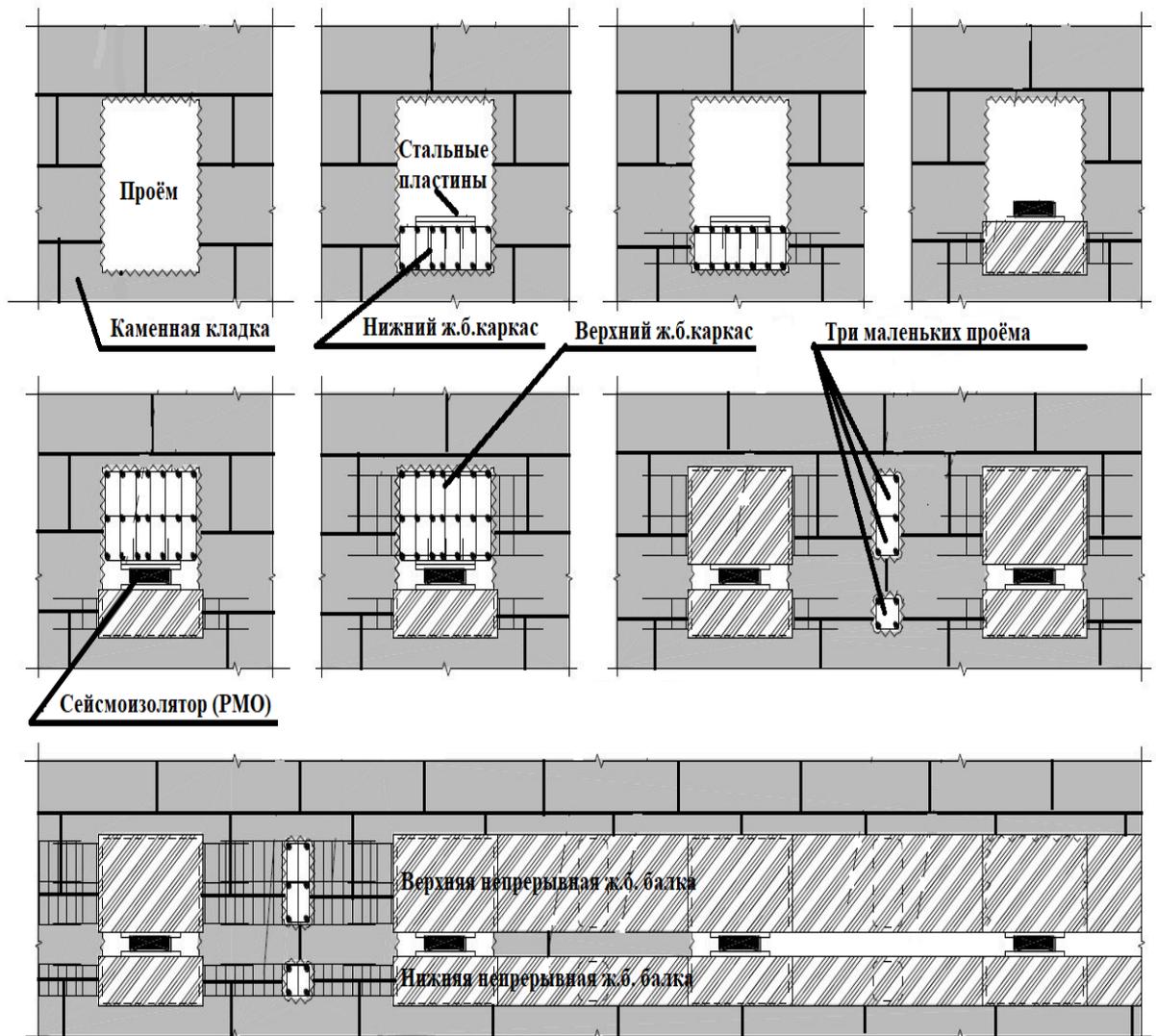


Рисунок 5.10 – Технология установки РМО под стенами здания Великой мечети г.Алеппо, Сирия.

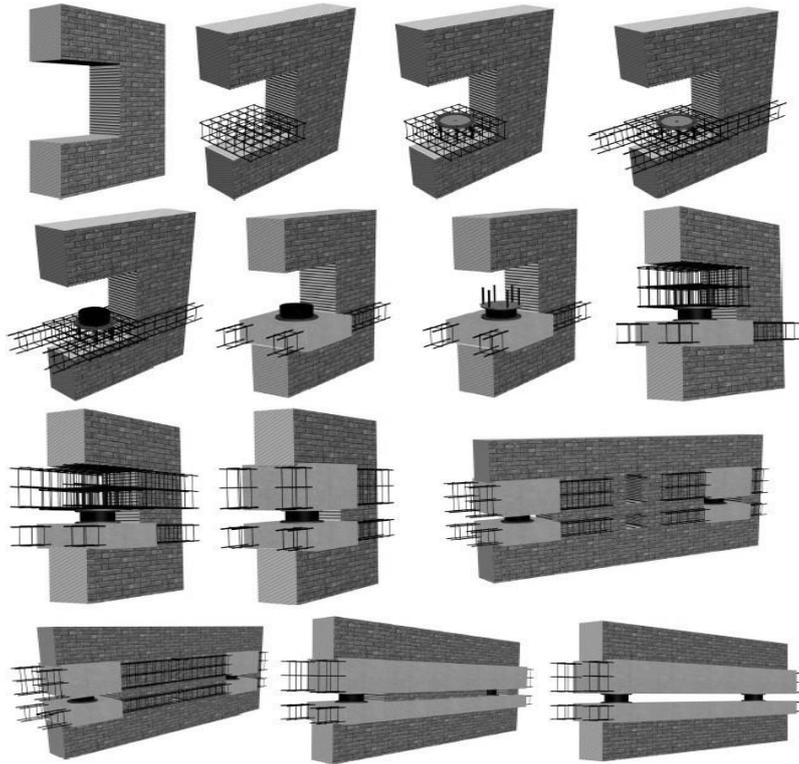


Рисунок 5.11 – Технология установки РМО под стенами здания в 3d разработанная Мелкумяном М.Г.

Технология установки сейсмоизолирующих резинометаллических опор (РМО) для каменных колонн й Великой мечети г. Алеппо

В каменных колоннах (1) РМО устанавливаются в следующей последовательности:

1. Поверхность колонн (1) подготавливается к бетонированию (рисунок 5.12, а);

2. Устанавливается опалубочный и арматурный каркас, затем в опалубку заливается бетон. Толщина железобетонного слоя составляет 100 мм (2) (рисунок 5.12, б);

3. После достижения бетоном проектной прочности затвердевания в средней части колонны прорезаются (рисунок 5.12, в) отверстия (3); В это время вертикальная нагрузка здания временно передается на бетонные опоры (2);

4. Устанавливается опалубка, нижний арматурный каркас (4) (рисунок 5.12, г); и бетонируется несущая часть сейсмоизолятора в том числе и стальная пластина (5) с анкерными гильзами для крепления РМО к колонне. Далее устанавливается сейсмоизолятор (РМО). Устанавливаются опалубки, верхний металлический каркас (4) над РМО и бетонируется;

При установке сейсмоизолятора (6) в проектное положение, необходимо выровнять его основание в горизонтальной плоскости [120]; При монтаже опалубки под основание изолятора, опалубка должна быть шире самого изолятора, верх опалубки выставляется на 1 см выше низа изолятора.

5. После того, как все опоры установлены на свои места и после достижения бетоном проектной прочности, бетонный кожух разрезается в нужных местах (рисунок 5.12, д), и вертикальная нагрузка полностью передается на сейсмоизолирующие опоры.

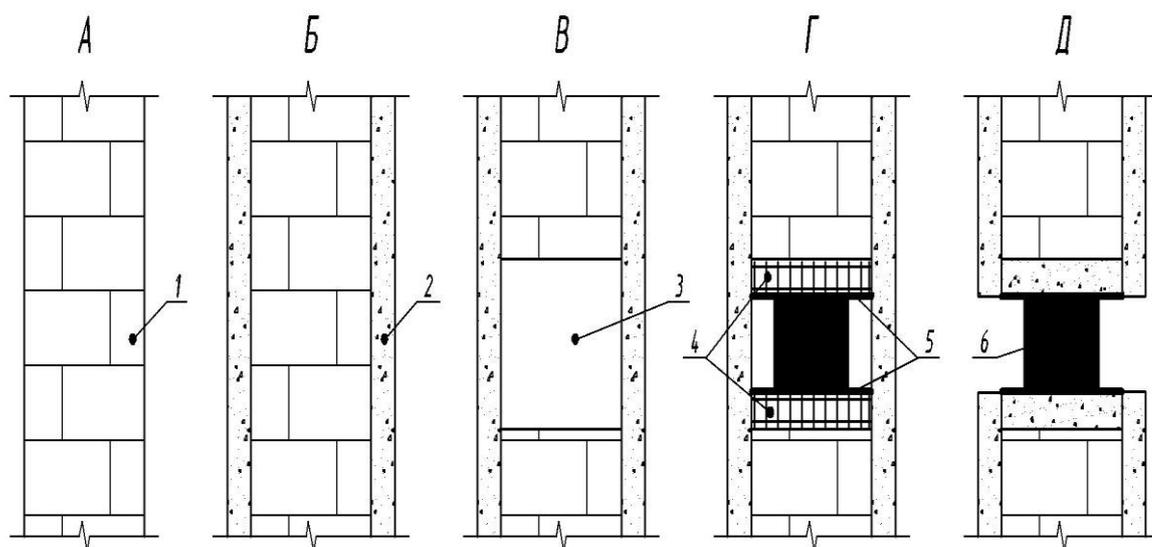


Рисунок 5.12 – Порядок установки сейсмоизоляторов (РМО) под колоннами здания Великой мечети г.Алеппо, Сирия:

- 1 - кирпичная кладка колонны; 2 – внешний железобетонный каркас;
 3 – прорезанная часть колонны; 4 – арматурные каркасы; 5 - стальной лист (стальная пластинка) для крепления РМО к колонне; 6 – сейсмоизолирующая резинометаллическая опора.

5.2. Проверка эффективности принятых решений с использованием нетрадиционных методов сейсмоусиления в виде сейсмоизоляции с учетом установленного класса сейсмостойкости

Для оценки эффективности предлагаемых решений были выполнены расчёты с использованием расчётной модели №4 соответствующей её состоянию после сейсмоизоляции с использованием нетрадиционных методов усиления. Для этого на этом этапе исследования была построена *четвёртая модель*, соответствующая состоянию после сейсмоизоляции и имеющая те же исходные данные и жесткостные характеристики материалов, что и для третьей модели, которая соответствует состоянию мечети после восстановления, но с добавлением стержневых элементов (КЭ №55), моделирующих упругую связь между узлами. Жесткость этих связей соответствует характеристикам выбранной сейсмоизолирующей резинометаллической опоры (РМО) марки SI-N 400/100 производства компании «FIP INDUSTRIALE», технические характеристики которой приведены ранее в таблице 5.1. Расчётная модель №4 представлена на рисунке 5.13, а на рисунке 5.14 показан фрагмент расчётной модели №4 с установленными РМО под зданием.

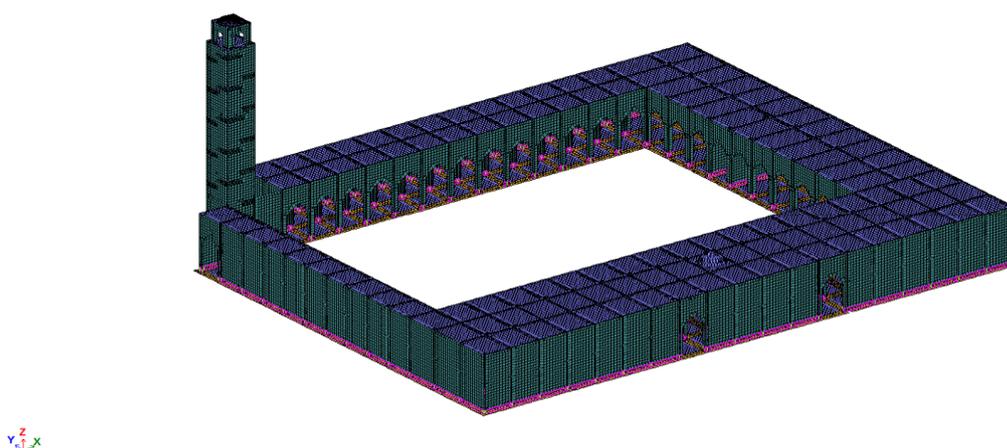


Рисунок 5.13 – Расчётная схема №4 Великой мечети в г. Алеппо соответствующая состоянию после сейсмоизоляции с использованием сейсмоизолирующих резинометаллических опор (РМО) под зданием.

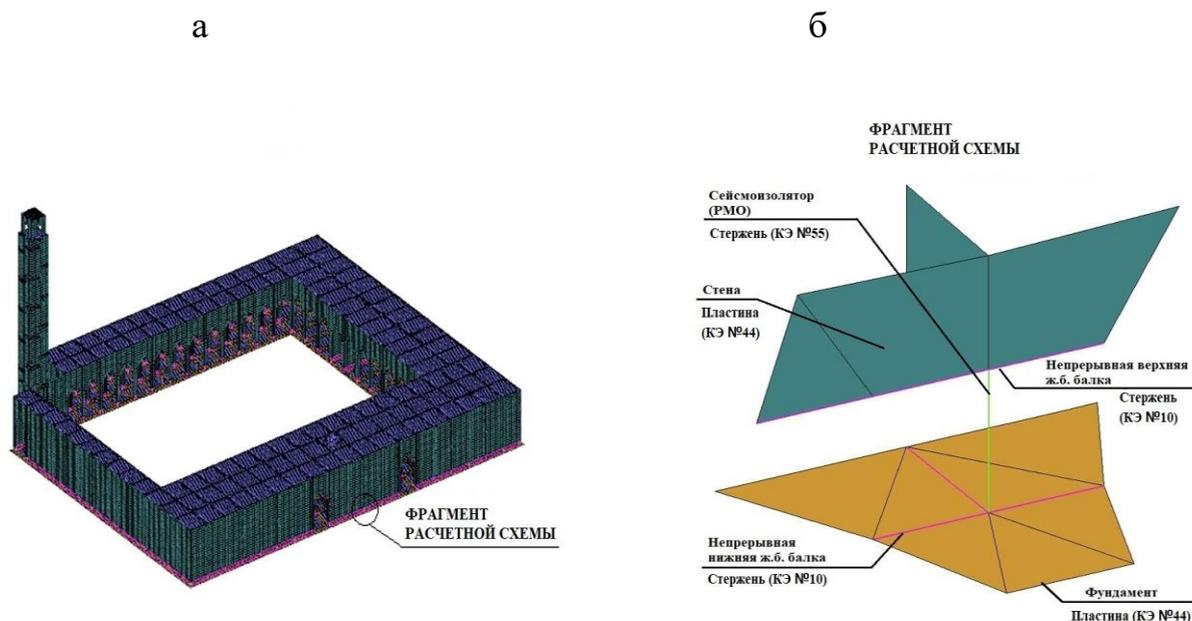


Рисунок 5.14 – Расчетная модель Великой мечети в г. Алеппо:

а – после сейсмоизоляции; б – фрагмент разреза установленной под зданием мечети сейсмоизолирующей опоры (РМО).

Анализ результатов на этапе после сейсмоизоляции (по трёхкомпонентным акселерограммам) на землетрясения уровня 8,6 баллов соответствующего установленному классу сейсмостойкости.

После сейсмоизоляции

Результаты сведены для удобства сравнения в таблицы 5.5 – 5.7 и показаны на рисунках 5.15–5.18

Таблица 5.5 – Значения максимальных перемещений по X и Y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения Т,с	После сейсмоизоляции	
	Максимальные перемещения по X (X_{max} , мм)	Максимальные перемещения по Y (Y_{max} , мм)
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3c$)	2,38	4,83

Продолжение таблицы 5.5

Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	7,16	6,23
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	30,3	106

Таблица 5.6 – Значения изгибающих моментов M_x , M_y и продольных сил N_x , N_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения $T, с$	После сейсмоизоляции			
	Максимальные M_x кН·М	Максимальные M_y кН·М	Максимальные N_x кН	Максимальные N_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	61,68	25,01	531,5	222,6
Среднечастотное землетрясение ($T= 0,4 - 0,7с$)	77,17	54,03	669,7	549,1
Низкочастотное землетрясение ($T= 1,0 - 1,7с$)	1363,1	511,9	11669,9	4471,8

Таблица 5.7 – Значения поперечных сил Q_x , Q_y в здании Великой мечети в г. Алеппо, для различных периодов землетрясения.

Периоды землетрясения $T, с$	После сейсмоизоляции	
	Максимальные Q_x кН	Максимальные Q_y кН
Высокочастотное землетрясение ($T= 0,1 - 0,3с$)	641,3	565,8

Продолжение таблицы 5.7

Среднечастотное землетрясение (T= 0,4 – 0,7с)	760,01	661,9
Низкочастотное землетрясение (T= 1,0 – 1,7с)	14415,8	12748,7

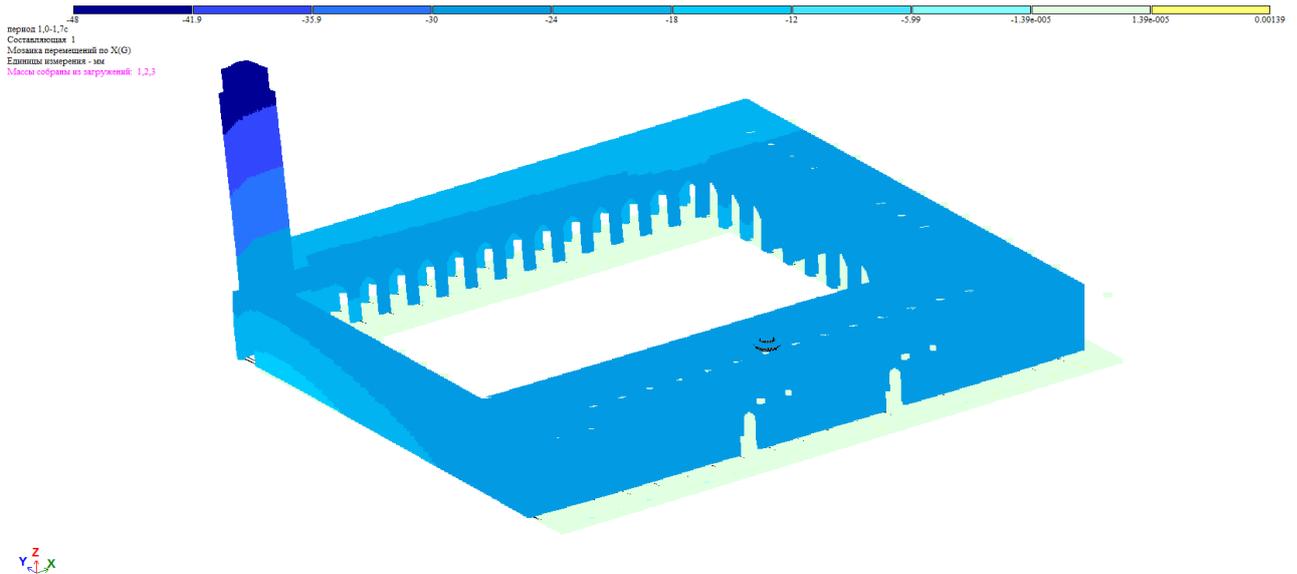


Рисунок 5.15 – Мозаика перемещений по X после сейсмоизоляции здания Великой мечети в г.Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

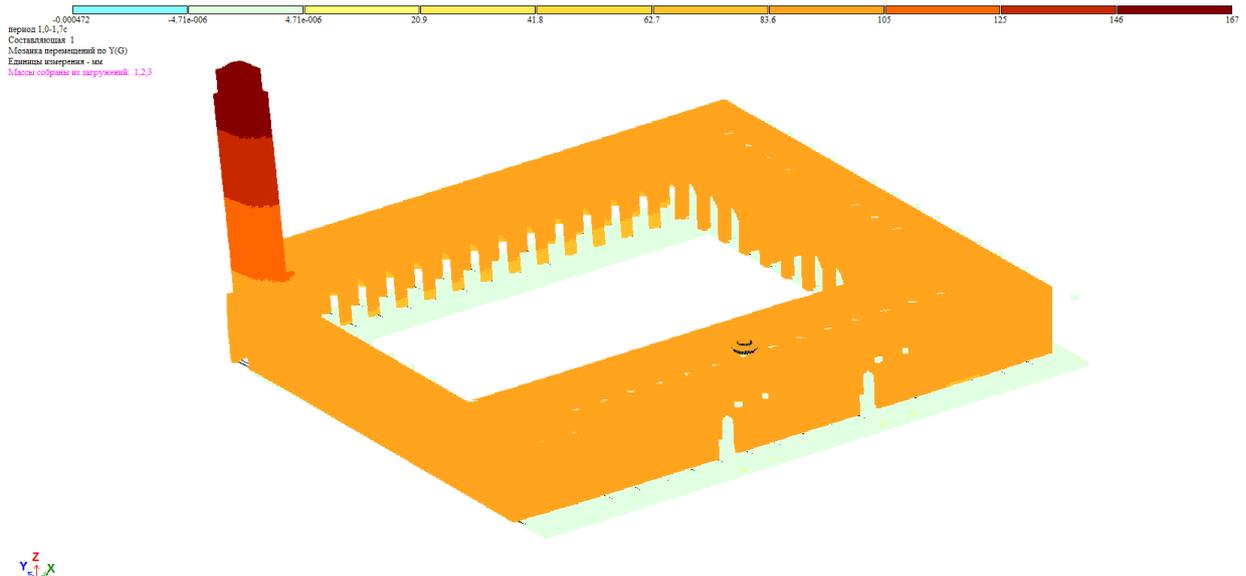


Рисунок 5.16 – Мозаика перемещений по Y после сейсмоизоляции здания Великой мечети в г.Алеппо при низкочастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

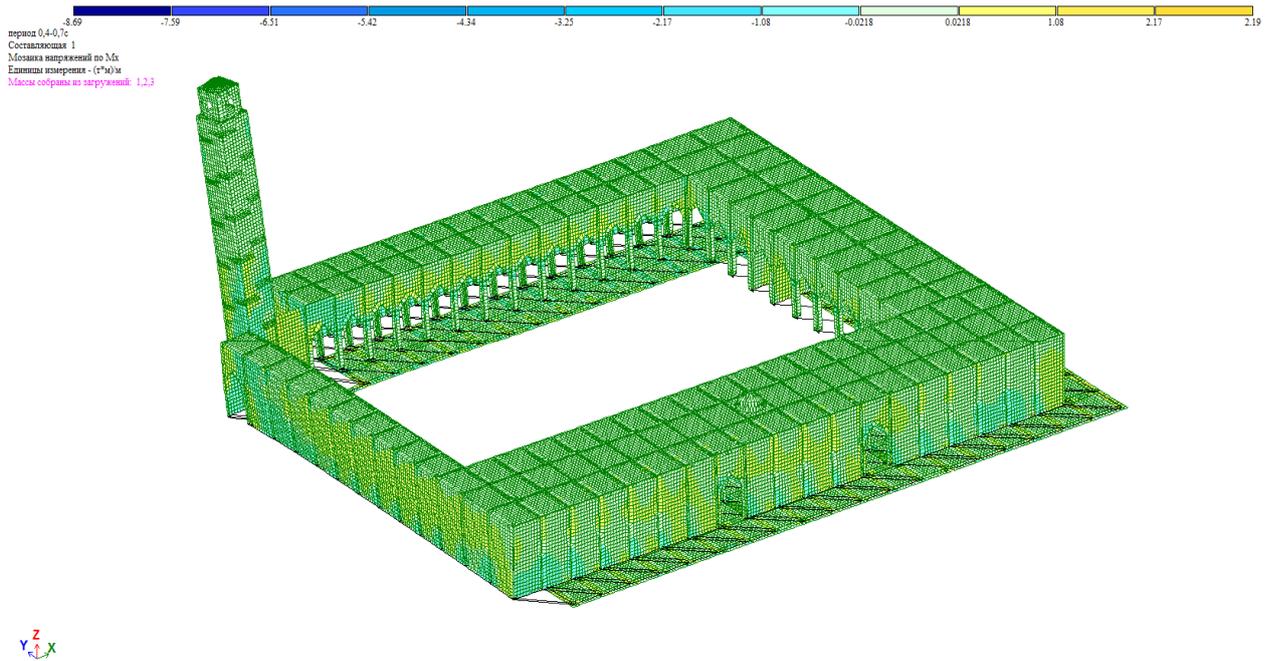


Рисунок 5.17 – Мозаика напряжений по M_x после сейсмоизоляции здания Великой мечети в г.Алеппо при среднечастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

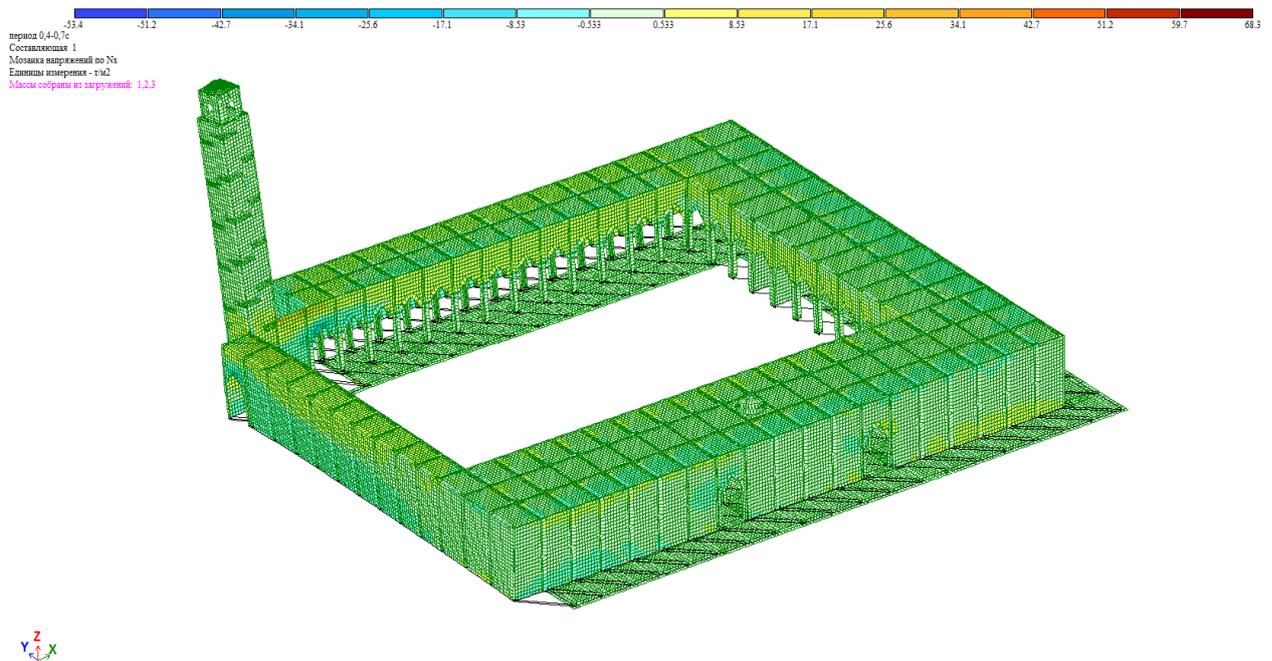


Рисунок 5.18 – Мозаика напряжений по N_x после сейсмоизоляции здания Великой мечети в г.Алеппо при среднечастотном землетрясении уровня 8,6 баллов.

В результате сейсмоизоляции как следует из исследования в целом, удалось снизить значения перемещений, изгибающих моментов, продольных и

поперечных сил при разных частотах в 2,5-3 раза, что свидетельствует об эффективности принятого решения

5.3. Выводы по главе

1. Предложены решения для сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества на примере здания Великой мечети в г. Алеппо с использованием нетрадиционных методов в виде сейсмоизоляции с помощью резинометаллических сейсмоизолирующих опор с высокой способностью к диссипации энергии.
2. Анализ результатов расчёта показал целесообразность и эффективность данного способа сейсмоусиления здания Великой мечети в г. Алеппо и снижение усилий и деформации в его строительных конструкциях.
3. Анализ полученных результатов свидетельствует, что значения максимальных перемещений X , Y , изгибающих моментов M_x , M_y , продольных сил N_x , N_y и поперечных сил Q_x , Q_y имеют различные показатели в зависимости от характера сейсмического воздействия и снизились почти в 3 раза. Полученные результаты оказали принципиальное значение на выбор методов сейсмоусиления Великой мечети в г. Алеппо.
4. Выбранный метод сейсмоусиления позволил снизить значения вышеуказанных деформации что в свою очередь важно для безопасности и дальнейшего существования Великой мечети в г. Алеппо являющаяся памятником архитектуры, включенном в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ сейсмической обстановки территории Сирии свидетельствует о её высокой активности вызванной наличием, находящихся вблизи её территории тектонических разломов, а также отсутствием в настоящее время, развитой сейсмологической службы, позволяющей вести постоянный контроль и мониторинг за возникающими сейсмическими воздействиями.
2. Анализ памятников архитектуры в Сирии, показал, что на этой территории существует большое количество памятников различных архитектурных направлений таких как Римской, Средневековой, Мусульманской и Османской культур, многие из которых входят в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, особо значимое место среди них по количеству людей, посещающих эти памятники, занимают культовые здания мусульманского зодчества.
3. Оценка последствий сильных землетрясений, прошедших на территории Сирии, показала, что степень повреждений в архитектурных памятниках имеет различный характер. Некоторые памятники имеют незначительные повреждения и дефекты в виде трещин, например, Мечеть Омара в г.Босра, некоторые имеют серьёзные повреждения, связанные с частичным обрушением элементов конструкции, например, в Великой мечети в г.Алеппо.
4. Последствия военных действий на территории Сирии с 2011 г. существенно добавили количество повреждений, а в некоторых случаях привели к полному уничтожению некоторых частей памятников архитектуры. Выполненная предварительная оценка степени полученных повреждений на примере известных культовых зданий мусульманского показала, что наиболее ощутимые повреждения произошли в здании культового значения Великой мечети в г. Алеппо.
5. Для обоснования сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества выполнено уточнение реальной сейсмичности территории Сирии.

6. Разработана методика расчета применительно к культовым зданиям мусульманского зодчества с учетом возможных ущербов при землетрясениях различной интенсивности, позволяющая установить необходимый класс сейсмостойкости.
7. Выполнен расчетно-теоретический анализ культовых зданий на примере мечети в Алеппо без и с учетом военных действий. Установлено что наличие повреждений, вызванных военными действиями, может явиться причиной окончательного обрушения объекта.
8. Рекомендуются для повышения сейсмостойкости памятников архитектуры использовать традиционные и нетрадиционные подходы.
9. Оценка предлагаемых мер по сейсмоусилению с помощью традиционных и нетрадиционных подходов показала, что они позволяют сохранить аутентичность и оригинальный облик зданий и являются эффективными средствами сейсмозащиты.

Перспективой дальнейшей разработки данной темы является:

- возможность развития нормативной базы сейсмостойкого строительства в Сирии с учетом выполненных исследований в этой диссертации;
- распространение предлагаемых конструктивных мероприятий на другие памятники арабского зодчества.

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- 1.Альдреби З.А. Исторические каменные башни: обзор, сейсмическая уязвимость, поведение во время землетрясения, сейсмоусиление/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. – № 6. – С. 49–66, DOI 10.37153/2618-9283-2020-6-49-66.
- 2.Альдреби З.А. Методика расчета культовых сооружений с учетом их заполняемости применительно к мечетям Ближнего Востока/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019.– № 2. – С. 43–48.
- 3.Альдреби З.А. Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии/ З. А. Альдреби // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2.– С. 302–310.
- 4.Альдреби З.А. Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций архитектурных памятников в Сирии с помощью современных композитных материалов/ З. А. Альдреби // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 4.– С. 576–582.
- 5.Альдреби З.А. Сейсмическая опасность территории Сирии/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019.– № 6. – С. 43–48.
- 6.Белаш Т.А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий / Т. А. Белаш, З.А. Альдреби // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016.– № 5. – С. 58–63.
- 7.Белаш Т.А., Альдреби З.А. Оценка сейсмостойкости архитектурных памятников зодчества на территории Сирии / З.А. Альдреби// Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020.–1(44). – С. 21–25.

8. Aldrebi Z. A. Most suitable types of seismic isolation for use in old mosques in Syria/ Z. A. Aldrebi//Earthquake engineering. Constructions Safety, 2021, no. 1, pp.57-77, DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-57-77.
9. Aldrebi Z.A. Strengthening of building structures of historical masonry buildings in Syria with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods and stainless steel helical rods. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 120–133. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-120-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-120-133).

Другие публикации по теме диссертации:

- 10.Альдребби З.А. Повреждения строительных конструкций памятников архитектуры Сирии: Сборник тезисов докладов национальной конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе-2019», Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС,18 апреля 2019г.» // Сборник тезисов Национальной научно-технической конференции. – СПб: ПГУПС, 2020. – С.16-19.
- 11.Альдребби З.А. Повышение устойчивости минаретов мечетей против сейсмического и ветрового воздействий с помощью инерционных демпферов. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020.– № 4. – С. 55–68.
- 12.Альдребби З.А. Сейсмостойкость архитектурных памятников Сирии. // Научно – практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Тезисы докладов. Москва, АО «НИЦ «Строительство», 1-2 декабря 2016 г. С. 121-122.
- 13.Альдребби З.А. Учет экономических и социальных потерь при оценке сейсмического риска для памятников архитектуры в Сирии: Сборник докладов научной конференции, посвященной 210-летию ПГУПС Императора Александра I и 155-летию кафедры «Здания» «Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга», Санкт-Петербург, ПГУПС,17 апреля 2019г. – С. 10-13.
- 14.Белаш Т.А., Альдребби З.А. Оценка повреждений Сирийских архитектурных памятников, полученных в результате землетрясений и военных действий.

Теория и практика расчёта зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Международная научно-практическая конференция. Сборник докладов и тезисов. Москва, НИУ МГСУ, 21.06.2017 г. С. 49-53.

15.Белаш Т.А., Альдреби З.А. Оценка сейсмологической обстановки территории Сирии. XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1- 6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС (Российская Ассоциация по Сейсмостойкому Строительству и защите от природных и техногенных воздействий). //Сборник тезисов конференции. – М.: 2019. - С. 90-91.

16.Belash T.A., Aldrebi Z.A. Assessment of Seismic Resistance of Islamic Architecture Monuments on the example of the Great Mosque of Aleppo taking into account the Seismic Zoning of the Territory of Syria , IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering V.1079 (Number 5, chapter 4) (2021) 052036, 6 p., doi:10.1088/1757-899X/1079/5/052036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Я.М. Модели сейсмического риска и методологические проблемы планирования мероприятий по смягчению сейсмических бедствий. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №6, 2004, С.31–38.
2. Айзенберг Я.М., Смирнов В.И., Бычков С.И., Сутырип Ю.А. Эффективные системы сейсмоизоляции. Исследования, проектирование, строительство. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений 2002. – № 1. – С.31–37.
3. Альдреби З.А. Исторические каменные башни: обзор, сейсмическая уязвимость, поведение во время землетрясения, сейсмоусиление/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. – № 6. – С. 49–66, DOI 10.37153/2618-9283-2020-6-49-66.
4. Альдреби З.А. Методика расчета культовых сооружений с учетом их заполняемости применительно к мечетям Ближнего Востока/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019.– № 2. – С. 43–48.
5. Альдреби З. А., Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии/ З. А. Альдреби // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2.– С. 302–310.
6. Альдреби З.А. Повреждения строительных конструкций памятников архитектуры Сирии: Сборник тезисов докладов национальной конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе-2019», Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС, 18 апреля 2019г.» // Сборник тезисов Национальной научно-технической конференции. – СПб: ПГУПС, 2020. – С.16-19.
7. Альдреби З.А. Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций архитектурных памятников в Сирии с помощью современных

- композитных материалов/ З. А. Альдреби // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 4.– С. 576–582.
8. Альдреби З.А. Повышение устойчивости минаретов мечетей против сейсмического и ветрового воздействий с помощью инерционных демпферов. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020.– № 4. – С. 55–68.
 9. Альдреби З.А. Сейсмическая опасность территории Сирии/ З.А. Альдреби// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. – № 6. – С. 43–48.
 - 10.Альдреби З.А. Сейсмостойкость архитектурных памятников Сирии. // Научно – практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Тезисы докладов. Москва, АО «НИЦ «Строительство», 1-2 декабря 2016 г. С. 121-122.
 - 11.Альдреби З.А. Учет экономических и социальных потерь при оценке сейсмического риска для памятников архитектуры в Сирии: Сборник докладов научной конференции, посвященной 210-летию ПГУПС Императора Александра I и 155-летию кафедры «Здания» «Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга», Санкт-Петербург, ПГУПС,17 апреля 2019г. – С.10-13.
 - 12.Бадьин Г.М., Сычёв С.А. Современные технологии строительства и реконструкции зданий. – СПб: БХВ-Петербург, 2013. –288 с.
 - 13.Бедов А. И. Проектирование, восстановление и усиление каменных и армокаменных конструкций/ А.И. Бедов, А. И.Габитов //Учебное пособие для вузов –Москва: Издательство АСВ, 2008. – 566 с.
 - 14.Бедов А.И., Щепетьева Т.А. Проектирование каменных и армокаменных конструкций: Учебное пособие. – М.: – Издательство АСВ,2003. –240 с.: ISBN 5-93093-120-8.
 - 15.Безухов, Н.И. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах. 3-е издание, переработанное / Н.И. Безухов, О.В. Лужин, Н.В. Колкунов // Москва: Высшая школа, 1987. - 264 с.

16. Белаш Т. А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий / Т. А. Белаш, З. А. Альдреби // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. – № 5. – С. 58–63.
17. Белаш Т. А., Ульяницкая Е. И., Шустова А. А., Зависимость функции распределения коммерческого ущерба при возможных землетрясениях от типа сооружения / Т.А. Белаш, Е.И. Ульяницкая, А.А. Шустова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. –2017. № 1 (28). – С. 26–29.
18. Белаш Т.А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. –175 с. ISBN 978-5-89035-981-0.
19. Белаш Т.А. Особенности строительства и эксплуатации сейсмостойких зданий // Известия ПГУПС. 2008. № 4. – С. 6 –16.
20. Белаш Т.А., Альдреби З.А. Оценка повреждений Сирийских архитектурных памятников, полученных в результате землетрясений и военных действий. Теория и практика расчёта зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Международная научно-практическая конференция. Сборник докладов и тезисов. Москва, НИУ МГСУ, 21.06.2017 г. С. 49-53.
21. Белаш Т.А., Альдреби З.А. Оценка сейсмологической обстановки территории Сирии. XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1- 6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС (Российская Ассоциация по Сейсмостойкому Строительству и защите от природных и техногенных воздействий). //Сборник тезисов конференции. – М.: 2019. - С. 90-91.

- 22.Белаш Т.А., Альдреби З.А. Оценка сейсмостойкости архитектурных памятников зодчества на территории Сирии / З.А. Альдреби// Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020.–1(44). – С. 21–25.
- 23.Бирбраер, А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер – СПб: Наука, 1998. – 255 с., ISBN 5-02-024883-5.
- 24.Богданова М.А., Сергин К.С., Сигидов В.В., Уздин. Оценка эффективности инвестиций в условиях повышенного риска. Экономическая кибернетика: системный анализ и управление. Сб. научных трудов. Вып.19, СПб, Изд. Санкт-Петербургского университета экономики и финансов, 2009, С.90–98.
- 25.Брук С.И. Население мира этнодемографический справочник.Академия наук СССР.Институт этнографии им. Н.Н. Миклухо-Маклая Москва: Изд-во Наука, 1981. 880 с.
- 26.Вахрина, Г.Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий / Г.Н. Вахрина, В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – №1. – С.29 – 39.
- 27.Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков: / учеб. пособие для студ. высш. учеб. Заведений/ Я.Д. Вишняков, Радаев Н.Н. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия». 2008 – 368 с.
- 28.Воронец В.В., Сахаров О.А., Уздин А.М. Оценка статистических характеристик экономического сейсмического риска. Сейсмостойкое строительство, №2, 2000, С. 6–8.
- 29.Всеобщая история архитектуры. В 12 т./ Гл.ред. А.В. Власов; Гос.ком. по гражд. строительству и архитектуре при Госстрое СССР. Науч.-исслед. Ин-т теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т.8: Архитектура стран Средиземноморья, Африки и Азии VI-XIX вв. / отв.ред.Ю.С. Яралов- М.: Стройиздат, 1969. – 491 с.
- 30.Всеобщая история архитектуры. В 12 т./ Гл.ред. Н.В. Баранов; Гос.ком. по гражд. Строительству и архитектуре при Госстрое СССР. Науч.-исслед. Институт теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т.1:

- Архитектура древнего мира/ отв.ред.О.Х. Халпахчян- М.: Стройиздат, 1970. – 512 с.
- 31.Всеобщая история архитектуры. В 12 т./ Гл.ред. Н.В. Баранов; Гос.ком. по гражд. строительству и архитектуре при Госстрое СССР. Науч.-исслед. Институт теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т.2: Архитектура античного мира (Греция и Рим) / отв.ред.В.Ф. Маркузон – М.: Стройиздат, 1973. – 712 с.
- 32.Гасиев А. А. Сейсмоусиление стен кирпичных зданий внешним армированием на основе углеволокнистой ткани. дис. ... канд. техн. наук, Спец. 05.23.01. М., 2015. 196 с.
33. ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартиформ, 2017. – 32 с.
- 34.Грановский А. В. Применение углеволокнистой ткани для усиления стен из ячеистобетонных блоков в зданиях, возводимых в сейсмоопасных регионах /А.В.Грановский, Б.К.Джамуев// Промышленное и гражданское строительство– 2012– № 4– С. 44-47.
- 35.Гроздов В.Т. Дефекты конструкции каменных зданий и методы их устранения. СПб: ВИСИ, 1994. – 145 с.
- 36.Гроздов В.Т. Некоторые вопросы ремонта и реконструкции зданий. – СПб: Издательский дом «KN+», 1999. 72 с.
- 37.Гроздов В.Т. Усиление строительных конструкций. СПб: ВИТУ, 1997. –264 с.
- 38.Давыдова, Г.В. Генерация расчетных акселерограмм для оценки сейсмического риска / Г.В. Давыдова, С.В. Огнева, А.М. Уздин, М.Ю. Федорова //Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – №4. – С.42 – 47.
- 39.Долгая, А.А. Методика оценки и рекомендации по заданию уровня расчетного сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений различной степени ответственности / А.А. Долгая, А.В.

- Индейкин, А.М. Уздин // Экспресс-информация ВНИИТПИ. Сер." Сейсмостойкое строительство". – 1996. – № 4. – С.16 – 22.
- 40.Дубянский А.И., Алджабасини Х. Способы оценки сейсмичности территории Сирии // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2019. Том 20, № 1. С. 79—84.
- 41.Жиленко О.Б., Алексеенко В.Н. Обеспечение сейсмостойкости памятников архитектуры Южного бережья// Строительство и техногенная безопасность. 2010. — вып.33–34. – С. 77–87.
- 42.Иванова, Т.В. Моделирование расчетного сейсмического воздействия в условиях ограниченной сейсмологической информации / Т.В. Иванова, Ю. Гуань, О.П. Нестерова, С.В. Прокопович, Л.Н. Смирнова, А.М. Уздин, Д.А. Ивашинцов // Инженерно – строительный журнал. – 2017. – №7(75). – С. 129 – 138.
- 43.Казачек В.Г. под ред. В.И. Римшина Обследование и испытания зданий и сооружений. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство» направления подготовки «Строительство». –4-е изд., перераб. и доп. – М., 2012. – 669 с.
- 44.Кейлис-Борок В.И., Нерсесов И.А., Яглом А.М. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства. // М., изд. АН СССР. –1962. с.46.
- 45.Корчинский И.Л., Поляков С.В. и др. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. М.: Госстройиздат, 1961. – 488 с.
- 46.Корчинский, И.Л. Расчет сооружений на сейсмические воздействия / И.Л. Корчинский // Научное сообщение ЦНИИПС. – М.: Стройиздат, 1954. – 76 с.
- 47.Костенко А. Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно-сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле- и стекловолокном. дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.23.01 / А.Н. Костенко – М.: ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко, 2010. – 243 с.
- 48.Костенко А. Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно-сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле- и

стекловолокном. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Спец. 05.23.01. М., 2010. 29 с.

49. Кучеренко В. А. Научно-технический отчет по теме: Экспериментальные исследования прочности и деформативности кирпичных стен и стен из ячеистого бетона, усиленного материалами фирмы BASF, М.: ЦНИИСК им. Кучеренко 2010. 183 с.
50. Кучеренко В. А. Рекомендации по усилению каменных конструкций зданий и сооружений / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1984. – 36 с.
51. Максименко Д. Д., Уздин А. М., учет социальных потерь при оценке сейсмического риска / Д.Д. Максименко, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. –2017. № 1 (28). – С. 30-35.
52. Мартемьянов А.И., Ширин В.В. Способы восстановления зданий и сооружений, поврежденных землетрясением. М.: Стройиздат, 1978. –204 с.
53. Мельник В.В. Архитектура традиционного жилого дома Дамаска конца XIX- XX веков. дис. ... канд. архитектуры, специальность: 18.00.01 / В.В. Мельник – СПб, 2007. –165 с.
54. Напетваридзе Т.Ш. Мероприятия по антисейсмическому усилению конструкций зданий, являющихся памятниками архитектуры. // Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство. – 1987. вып.5. – С. 3 –7.
55. Напетваридзе Т.Ш. Методика оценки сейсмической опасности для памятников архитектуры. // Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство. 1983. – вып.6. – С. 4 – 8.
56. Овсянников Ю.М. История памятников архитектуры. От пирамид до небоскребов. М.: Галарт - Арт-Пресс, 2001. - 287 с.
57. Омар Х.М. Механизмы землетрясений и напряженное состояние земной коры в Сирии/ Х.М. Омар, Р.Э. Татевосян, Ю.Л. Ребецкий // Вестник КРАУНЦ- Науки о Земле –2012. – Вып.20–С. 139 – 148.

- 58.Онищик Л.И. Каменные конструкции: Учебник для вузов и факультетов – Москва, Ленинград: Государственное издательство строительной литературы., 1939. –208 с.
- 59.Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций, ч.1 работа элементов каменных конструкций. –Москва, Ленинград: Государственное издательство строительной литературы. 1937. –208 с.
- 60.Орлович Р., Мантегацца Д., Найчук А., Деркач В. /Современные способы ремонта и усиление каменных конструкций // Архитектура, дизайн, строительство, СПб: 2010. №1. С. 86–87.
- 61.Официальный интернет сайт. ASOR Cultural Heritag Initiatives. Режим доступа: <https://www.asor-syrianheritage.org/> (дата обращения: 22.12.2016).
- 62.Официальный интернет сайт. DGAM. Режим доступа: URL:<http://www.dgam.gov.sy> (дата обращения: 15.11.2018).
- 63.Официальный интернет сайт. Холдинговая Компания «Композит». Режим доступа: <http://www.hccomposite.com/> (дата обращения: 30.12.2016).
- 64.Павлова М. О. Ремонт и усиление каменных конструкций: инновационные методы // Строительный профиль. 2009. №8–09. С. 29–31.
- 65.Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1989. – 320 с.
- 66.Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (основы теории сейсмостойкости). М.: Высшая школа, 1983. - 304 с.
- 67.Розенблюмас А.М. Каменные конструкции. – М.: Высш. шк., 1964. –302 с.
- 68.Рутман, Ю.Л. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции /Ю.Л. Рутман, Н.В. Ковалева, Г.В. Давыдова // Инженерно-строительный журнал, №5 (40), 2013, изд. СПбГПУ, С.107-115.
- 69.Савинов, О.А. Об учете грунтовых условий в расчетах на сейсмостойкость крупных инженерных сооружений / О.А. Савинов, А.М. Уздин // Москва: Стройиздат, 1984. - 255 с.
- 70.Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципа устройства, особенности расчета) / О.А. Савинов // Избранные статьи и

доклады "Динамические проблемы строительной техники". – СПб.: 1993. – С.155 – 178.

71. Сангинов А.М. Обследование состояния сейсмостойкости строительных конструкций зданий культурно-исторического наследия в Таджикистане // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 59–63.
72. Саркисов, Д. Ю. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Курс лекций: учебное пособие для студентов специальности 271101 "Строительство уникальных зданий и сооружений" / Д. Ю. Саркисов; ФГБОУ ВО «Том. гос. архитектур.-строит. ун-т». – Томск: ТГАСУ, 2015. – 156 с.
73. Сафаргалиев С.М. Сейсмостойкие каменные конструкции: Учебное пособие для вузов. – Алма-Ата: Ана Тілі, 1992. –236 с. ISBN 5-625-00988-0.
74. Сахаров О. А. К вопросу о назначении коэффициентов сочетаний сейсмической и других нагрузок / О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – № 2. – С. 9–11.
75. Сахаров О.А. Назначение расчетного ускорения с учетом новых карт сейсмического районирования. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, №2, 2003 г. С.48-49.
76. Семенцов С.А., Камейко В.А. Справочник проектировщика, Каменные и армокаменные конструкции. – Москва: Издательство по строительству (стройиздат), 1968. –173 с.
77. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. –Актуализир. Ред. СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» – М.: Стандартинформ, 2018 – 116 с.
78. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. – Актуализир. ред. СНиП II-22-81*(с Изменениями № 1,2 – М.: ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2012. – 99 с.
79. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81. – Москва: Стандартинформ, 2017 –140 с.

- 80.СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. Исполнители– АО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А.А.Гвоздева, ЗАО «Триада-Холдинг» ЗАО "ХК "Композит". Москва, дата введения 01.09.2014 г. –50 с.
81. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия – Актуализир. Ред. СП. 20.13330.2011. – М.: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
- 82.СП 442.1325800.2019 Здания и сооружения. Оценка класса сейсмостойкости – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
- 83.СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003– Москва: Минстрой России, 2015. – 168 с.
- 84.Справочник по специальным функциям с формами графиками и математическими таблицами. Ред. Абрамович М., Стиган И., М.: Наука, 1979, 830с.
- 85.СТО 2256-002-2011. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibArm для ремонта и усиления строительных конструкций. – Москва, 2011. – 12 с.
- 86.СТО НОСТРОЙ/НОП 2.9.142-2014 Восстановление и повышение несущей способности кирпичных стен. Проектирование и строительство. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. М.: Национальное объединение строителей, 2018. – 130 с.
- 87.Трифонов В.Г. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии/В.Г. Трифонов, А.Е.Додонов, Д.М. Бачманов, Т.П. Иванова, А.С. Караханян - М.: ГЕОС, 2012. – 216 с.
- 88.Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амии. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1993. –176 с.
- 89.Уздин А.М. и др. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664350, 14.11.2018г.

90. Уздин А.М., Воробьев В.А., Богданова М.А., Сигидов В.В., Ваничева С.С. Экономика сейсмостойкого строительства. М.: ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017, 176 с.
91. Уздин, А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений / учеб. пособие / А. М. Уздин, Т. А. Белаш, С. В. Елизаров. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 501 с.
92. Уздин, А.М. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений / А.М. Уздин и др. // Российско – китайский научный журнал «Содружество». Ежемесячный научный журнал научно – практической конференции. – 2017. – № 20. – С. 59–66.
93. Уломов В.И., К оценке сейсмической опасности территории Приморского края// Инженерные изыскания. 2009. № 1. С. 40-46.
94. Халед Хадж Али. Обеспечение сейсмостойкости архитектурных памятников арабского зодчества на территории Сирии: Дисс. дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.23.01 – СПб, 2003. –159 с.
95. Шагин А. Л. и Др. Реконструкция зданий и сооружений: Учеб. Пособие для строит, спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1991.–352 с.: ил. ISBN 5-06-000771-5
96. Шагинян С. Г. Инженерный анализ последствий Спитакского землетрясения: Вопросы восстановления и усиления поврежденных зданий / С. Г. Шагинян, В. Г. Корнилов. // Строительство и архитектура: Серия «Сейсмостойкое строительство». – Москва: ВНИИТПИ, 1992. – Вып. 7/8. – С. 3–6.
97. Шаумонова З.С. Оценка технического состояния и расчет архитектурных памятников на сейсмические воздействия (на примере дворца Аль-Сарай в г.Шахрисабде) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. –№ 2. –С. 17 – 18.

- 98.Шебалин.Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М. Наука. 1975. С.87–109.
- 99.Шуази Огюст История архитектуры: В 2 т. / Огюст Шуази; пер. с фр.;под ред. Н.И.Брунова; общ. Ред. Ю.К. Милова, А.А. Сидорова. – М.: Изд-во Всесоюз. академии архитектуры, 1937. -Т.2. – 692 с.
100. Abdul-Wahed M.K., Al-Tahhan I. Preliminary outline of the seismically active zones in Syria. *Ann Geophys*, 2010. 53 p.p.1–9.
101. Ahmad R.A. Seismic Hazard Assessment of Syria. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2013. 15 (01) p.p.1–13.
102. Ahmad R.A., Singh R. P. , Adris A. Seismic hazard assessment of Syria using seismicity, DEM, slope, active faults and GIS, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017– V.6–p.p.59–70.
103. Alafandi R., Rahim, A. A. Umayyad Mosque in Aleppo yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Arts & Sciences*, 2014. 07(05) p.p.319–347. ISSN: 1944-6934.
104. Aldrebi Z. A. Most suitable types of seismic isolation for use in old mosques in Syria/ Z. A. Aldrebi//*Earthquake engineering. Constructions Safety*, 2021, no. 1, pp.57-77, DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-57-77.
105. Aldrebi Z.A. Strengthening of building structures of historical masonry buildings in Syria with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods and stainless steel helical rods. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 120–133. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-120-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-120-133).
106. Angelo Di Tommaso. (2012). Structural conservation of historical constructions using composite materials technique. *Structural Analysis of Historical Constructions*. Poland, 2012. Pp. 3–14.
107. Belash T. A. , Aldrebi Z. A. Assessment of Seismic Resistance of Islamic Architecture Monuments on the example of the Great Mosque of Aleppo taking into account the Seismic Zoning of the Territory of Syria , *IOP Conf. Series*:

- Materials Science and Engineering V.1079 (Number 5, chapter 4) (2021) 052036, 6 p., doi:10.1088/1757-899X/1079/5/052036.
108. Bogdanova M.A., Sakharov O.A., Sigidov V.V., Uzdin A.M. The Influence of Seismic Isolation on the Value of Seismic Risk and Investment Efficiency. 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Book of Abstracts, Guangzhou, China, Nov. 17–20, 2009, p.4.
 109. De Vent Ilse, Rots Jan, Van Hees Rob et. al. Confusing cracks and difficult deformations: Interpreting structural damage in masonry. Structural Analysis of Historical Constructions. Poland, 2012. Pp. 243–252.
 110. Ehsani M.R. Seismic Retrofit of URM Walls with Fiber Composites/ M.R Ehsani, H. Saadatmanesh//The Masonry Society Journal, Vol.14 (2), 1996, pp. 63–72.
 111. Ernest Bernat-Maso, Christian Escrig, Chrysl A. Aranda et. al. Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallets. Construction and Building materials. Spain, 2013. pp. 3–13.
 112. Grünthal G. European Macroseismic Scale 1998./ editor G. Grünthal //Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Seismologie, Luxembourg– 1998– vol.15 – 99 p.
 113. Melkumyan, M.. Seismic Isolation Strategies for Earthquake-Resistant Construction: Emerging Opportunities, 2019. 268p. ISBN: (10): 1-5275-1802-7, (13): 978-1-5275-1802-5.
 114. Noel J. Raufaste, Editor. Earthquake Resistant Construction Using Base Isolation. NIST Special Publication 832, Vol.1, 1992, 161p.
 115. Noel J. Raufaste, Editor. Earthquake Resistant Construction Using Base Isolation. NIST Special Publication 832, Vol.2, 1992, 584p.
 116. Ramallo J.C., Johnson E.A., et al. “Smart” Base Isolation Systems, Journal of Engineering Mechanics–2002 Vol. 128, No.10 – p.p.1088-1099.

117. Robert G. Drysdale, Ahmad A. Hamid Masonry structures behavior and design. Poland: The masonry society, 2013. 480 p.
118. Sajal, Kanti Deb Seismic base isolation – An overview, *Current Science*, 2004, vol.87, No 10– p.p. 1426 –1430.
119. Sbeinati M.R., Darawcheh R., Mouty M. The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. // *Annals of Geophysics*– 2005 –Vol. 48, № 3– p.p.347–435.
120. Smirnov, V.I., Eisenberg, J.M., Zhou, F.L., Chung, Y., Nikitin, A.N. Seismoisolation for upgrading of an existing historical building in Irkutsk-City, Siberia-Russia. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand – 2000, Paper No. 0962.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

192171, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, дом 36, к. 1, лит. В, ИНН/КПП 7811300512/781101001, ОКВЭД 28.11; 28.51; 25.23; 51.70 ОКПО 73336203.
 Р/счет 40702810748000001895 в ПАО «Банк «Санкт-Петербург»; корр. сч. №30101810900000000790; БИК 044030790; тел. (812)-560-71-69,
 E-mail: info@sc-5.ru <http://www.stroycomplex-5.ru>
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
СК СТРОЙКОМПЛЕКС – 5

№078/21-98-М/03с «13» декабря 2021 г.

Акт

О внедрении результатов диссертационной работы Альдреби З.А. на тему «Повышение сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии с учетом повреждений, полученных в результате военных действий»

Автор: Альдреби Зиад Ахмад

Научный руководитель: д.т.н., профессор Белаш Татьяна Александровна

Настоящим Актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Повышение сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии с учетом повреждений, полученных в результате военных действий» Альдреби З.А. использованы в ООО «СК Стройкомплекс-5» при разработке технических решений сейсмозащиты на объекте «Мечеть имени Пророка Мухаммада на территории Духовно-просветительского центра имени Пророка Иса» в юго-восточной зоне г. Махачкала в 2017-18 гг., а также при проработке конструкции сейсмозащиты высотных зданий в Шейх-Мансуровском р-не (ул. Идрисова, б/н) и в Ахматовском р-не (кольцевая Минутка) в г. Грозном в Чеченской республике.

Использование предлагаемых З.А. Альдреби решений позволяет обеспечить безопасность посетителей мечети при землетрясениях силой 9 баллов и приемлемые затраты на антисейсмическое усиление мечети и высотных зданий.

Дата внедрения «04 » августа 2021 г.

Генеральный директор



С.А.Шульман

Рисунок А.1– Отсканированная копия справки о внедрении результатов диссертационной работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет Ф.п.р. (функция плотности распределения) ущерба для 7, 8, 9, и 10-балльных воздействий при классе сейсмостойкости $K_s=7$ баллов

Ф.п.р. – означает функция плотности распределения, индекс 77 в обозначении риска R_{77} означает: Первая цифра 7 – класс сейсмостойкости K_s в баллах, а вторая 7 – сила землетрясения в баллах.

P_{77} : П- проценты(доли) для вычисления σ (рекомендованный диапазон 0.2-0.4). Вычисляем дисперсию и коэффициент вариации. При вычислениях выражаем бета-функцию через гамма-функцию.

Риск: $R_{77} = 0.04$ (где: $R_{calc}=R:100$; $R_{calc77}=R_{77}:100=4:100=0.04$) процент: $P_{77}=0.4$

при $K_s = 7$

Риск: $R_{77}=0.04$ Процент: $P_{77}=0.4$

Дисперсия:

$$Disp_{77} := (P_{77} \cdot R_{77})^2 = 2.56 \times 10^{-4} \quad \sigma_{77} := R_{77} \cdot P_{77} = 0.016 \quad \underline{\underline{\sigma_{77}}} := \sqrt{Disp_{77}} = 0.016$$

Коэффициент вариации:

$$v_{77} := \frac{Disp_{77}}{R_{77}^2} = 0.16$$

Параметры:

$$\alpha_{77} := \frac{1 - R_{77} - R_{77} \cdot v_{77}}{v_{77}} = 5.96 \quad \beta_{77} := \alpha_{77} \cdot \frac{1 - R_{77}}{R_{77}} = 143.04$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{77} := \frac{\Gamma(\sigma_{77}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{77}, 0)}{\Gamma(\alpha_{77} + \beta_{77}, 0)} = 7.964 \times 10^{-12}$$

$$p_{77}(x) := \frac{x^{\alpha_{77}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{77}-1}}{B_{77}}$$

Риск: $R_{78}=0.17$

Процент: $P_{78}=0.24$

Дисперсия:

$$\text{Disp78} := (\Pi78 \cdot R78)^2 = 1.665 \times 10^{-3} \quad \sigma78 := R78 \cdot \Pi78 = 0.041 \quad \underline{\underline{\sigma78}} := \sqrt{\text{Disp78}} = 0.041$$

Вычислим коэффициент вариации:

$$v78 := \frac{\text{Disp78}}{R78^2} = 0.058$$

Вычислим параметры:

$$\alpha78 := \frac{1 - R78 - R78 \cdot v78}{v78} = 14.24 \quad \beta78 := \alpha78 \cdot \frac{1 - R78}{R78} = 69.523$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B78 := \frac{\Gamma(\alpha78, 0) \cdot \Gamma(\beta78, 0)}{\Gamma(\alpha78 + \beta78, 0)} = 0$$

$$p78(x) := \frac{x^{\alpha78-1} \cdot (1-x)^{\beta78-1}}{B78}$$

Риск: $R79=0.471$

Процент: $\Pi79=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp79} := (\Pi79 \cdot R79)^2 = 0.014 \quad \sigma79 := R79 \cdot \Pi79 = 0.118$$

Коэффициент вариации:

$$v79 := \frac{\text{Disp79}}{R79^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha79 := \frac{1 - R79 - R79 \cdot v79}{v79} = 7.993 \quad \beta79 := \alpha79 \cdot \frac{1 - R79}{R79} = 8.977$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B79 := \frac{\Gamma(\alpha79, 0) \cdot \Gamma(\beta79, 0)}{\Gamma(\alpha79 + \beta79, 0)} = 9.915 \times 10^{-6}$$

$$p79(x) := \frac{x^{\alpha79-1} \cdot (1-x)^{\beta79-1}}{B79}$$

Риск: $R_{710}=0.94$ Процент: $\Pi_{710}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp}_{710} := (\Pi_{710} \cdot R_{710})^2 = 0.055$$

$$\sigma_{710} := R_{710} \cdot \Pi_{710} = 0.235$$

Вычислим коэффициент вариации:

$$v_{710} := \frac{\text{Disp}_{710}}{R_{710}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{710} := \frac{1 - R_{710} - R_{710} \cdot v_{710}}{v_{710}} = 0.02$$

$$\beta_{710} := \alpha_{710} \cdot \frac{1 - R_{710}}{R_{710}} = 1.277 \times 10^{-3}$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{710} := \frac{\Gamma(\alpha_{710}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{710}, 0)}{\Gamma(\alpha_{710} + \beta_{710}, 0)} = 833.299$$

$$p_{710}(x) := \frac{x^{\alpha_{710}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{710}-1}}{B_{710}}$$

$$x := 0, 0.001.. 1$$

x =

0
$1 \cdot 10^{-3}$
$2 \cdot 10^{-3}$
$3 \cdot 10^{-3}$
$4 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{-3}$
$6 \cdot 10^{-3}$
$7 \cdot 10^{-3}$
$8 \cdot 10^{-3}$
$9 \cdot 10^{-3}$
0.01
0.011
0.012
0.013
0.014
...

-Графики:

Как видно из рисунка Б.1 при классе сейсмостойкости здания $K_s = 7$ наиболее вероятный ущерб при 7 балльных воздействиях составляет около 6%. Для 8 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба 18% а для 9 балльных воздействий наиболее вероятный ущерб составляет около 47%. Для 10 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба составляет около 100%.

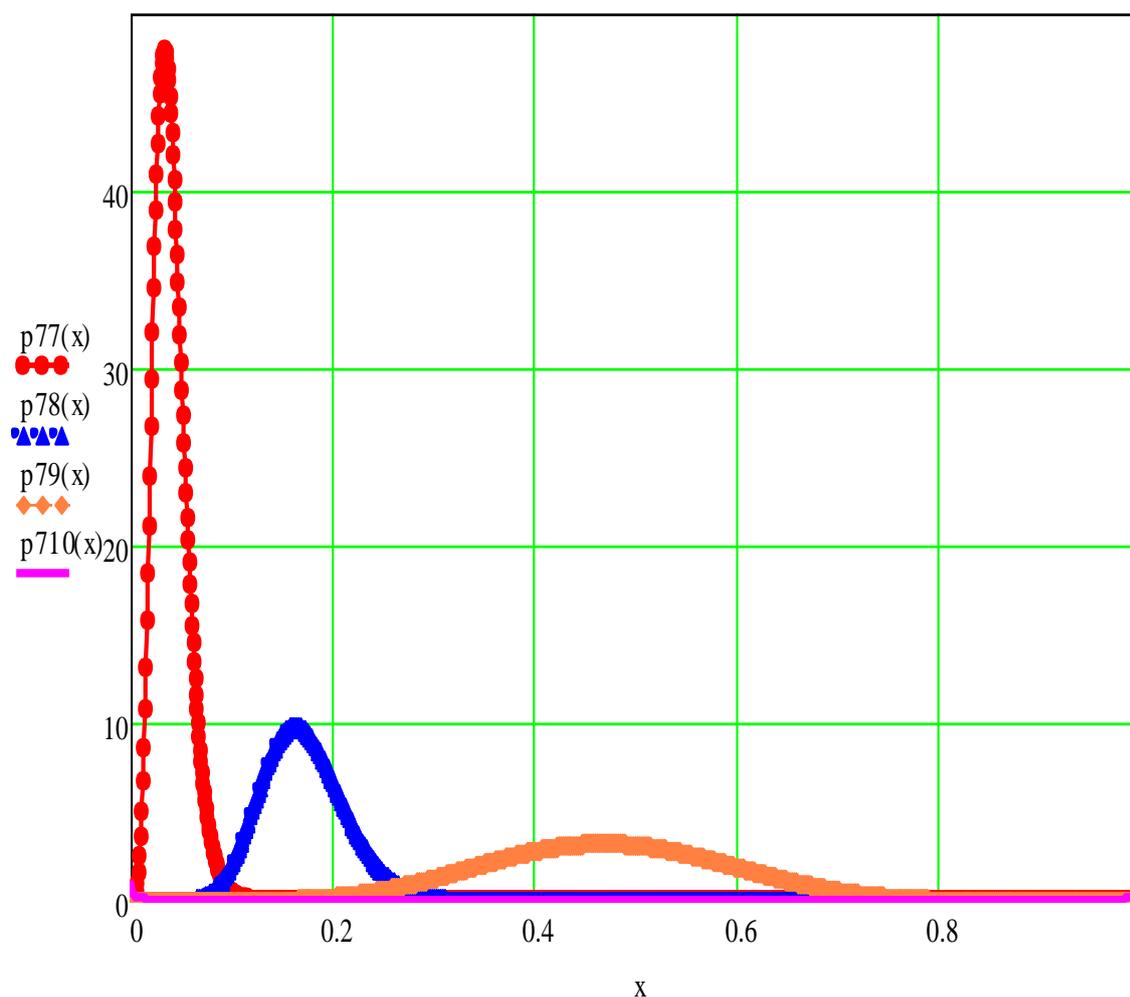


Рисунок Б.1 – Ф. п.р. ущерба без учета социальных потерь для 7 (красная кривая), для 8 (синяя кривая), 9 (оранжевая кривая) и 10-балльных (розовая кривая) воздействий.

Суммарный график Ф.п.р. ущерба (рисунок Б.2):

$$\phi_7(x) := p_{77}(x) \cdot L_3 + p_{78}(x) \cdot L_6 + p_{79}(x) \cdot L_7 + p_{710}(x) \cdot L_8$$

$$L_3 = 0.01$$

$$L_6 = 2 \times 10^{-3}$$

$$L_7 = 1 \times 10^{-3}$$

$$L_8 = 2 \times 10^{-4}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.011 \\ 0.01 \\ 5.855 \times 10^{-3} \\ 3.201 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-3} \\ 1 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

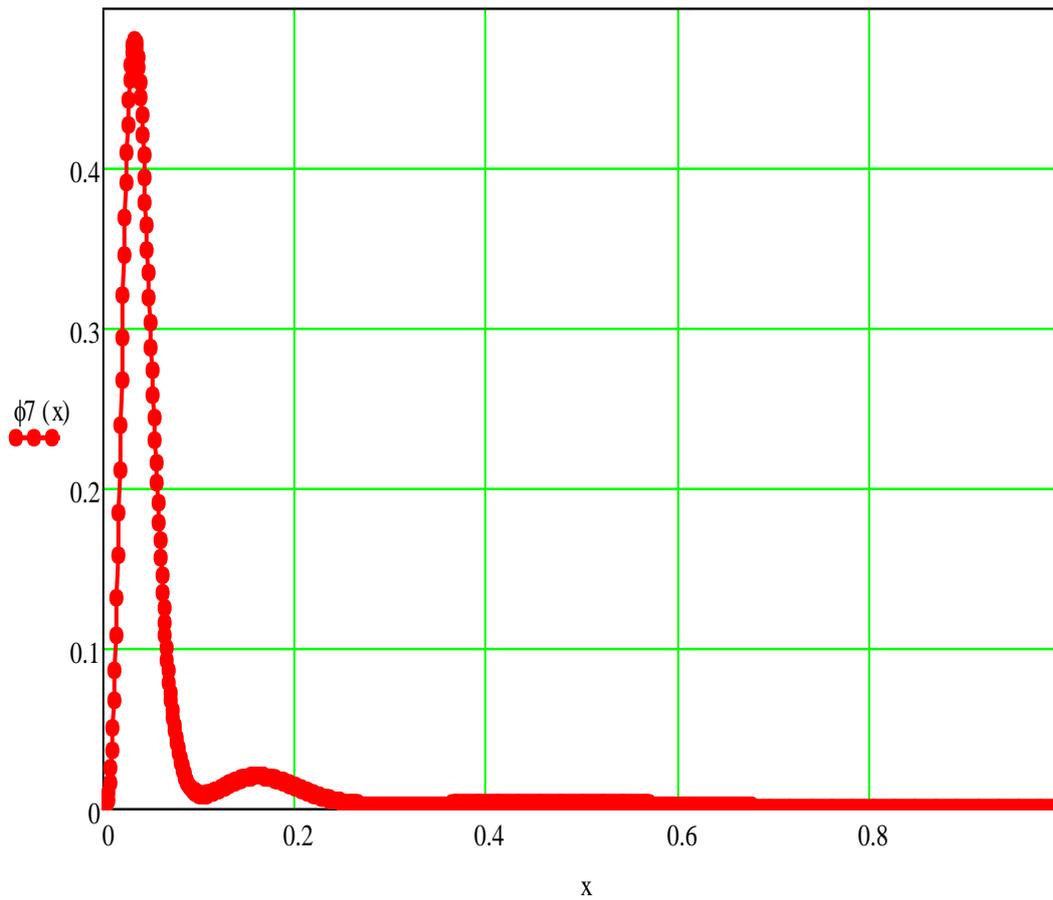


Рисунок Б.2 – Суммарный график Ф.п.р. ущерба для рассматриваемой мечети.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчет Ф.п.р. (функция плотности распределения) ущерба для 7,8,9, и 10-балльных воздействий при классе сейсмостойкости $K_s=8$ баллов

Ф.п.р. – означает функция плотности распределения, индекс 87 в обозначении риска R_{87} означает: Первая цифра 8 – класс сейсмостойкости K_s в баллах, а вторая 7 – сила землетрясения в баллах.

Π_{87} : Π - проценты(доли) для вычисления σ (рекомендованный диапазон 0.2-0.4).
Вычисляем дисперсию и коэффициент вариации. При вычислениях выражаем бета-функцию через гамма-функцию.

при $K_s = 8$

Риск: $R_{87}=0.029$

Процент: $\Pi_{87}=0.45$

Дисперсия:

$$\text{Disp}_{87} := (\Pi_{87} \cdot R_{87})^2 = 1.703 \times 10^{-4} \quad \sigma_{87} := R_{87} \cdot \Pi_{87} = 0.013$$

Коэффициент вариации:

$$v_{87} := \frac{\text{Disp}_{87}}{R_{87}^2} = 0.203$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{87} := \frac{1 - R_{87} - R_{87} \cdot v_{87}}{v_{87}} = 4.766 \quad \beta_{87} := \alpha_{87} \cdot \frac{1 - R_{87}}{R_{87}} = 159.581$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{87} := \frac{\Gamma(\sigma_{87}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{87}, 0)}{\Gamma(\alpha_{87} + \beta_{87}, 0)} = 2.277 \times 10^{-9}$$

$$p_{87}(x) := \frac{x^{\alpha_{87}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{87}-1}}{B_{87}}$$

Риск: $R_{88}=0.103$

Процент: $\Pi_{88}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp88} := (\text{П88} \cdot \text{R88})^2 = 6.631 \times 10^{-4} \quad \sigma_{88} := \text{R88} \cdot \text{П88} = 0.026$$

Коэффициент вариации:

$$v_{88} := \frac{\text{Disp88}}{\text{R88}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{88} := \frac{1 - \text{R88} - \text{R88} \cdot v_{88}}{v_{88}} = 14.249 \quad \beta_{88} := \alpha_{88} \cdot \frac{1 - \text{R88}}{\text{R88}} = 124.091$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{88} := \frac{\Gamma(\alpha_{88}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{88}, 0)}{\Gamma(\alpha_{88} + \beta_{88}, 0)} = 0$$

$$p_{88}(x) := \frac{x^{\alpha_{88}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{88}-1}}{B_{88}}$$

Риск: $\text{R89}=0.336$

Процент: $\text{П89}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp89} := (\text{П89} \cdot \text{R89})^2 = 7.056 \times 10^{-3} \quad \sigma_{89} := \text{R89} \cdot \text{П89} = 0.084$$

Коэффициент вариации:

$$v_{89} := \frac{\text{Disp89}}{\text{R89}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{89} := \frac{1 - \text{R89} - \text{R89} \cdot v_{89}}{v_{89}} = 10.288 \quad \beta_{89} := \alpha_{89} \cdot \frac{1 - \text{R89}}{\text{R89}} = 20.331$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{89} := \frac{\Gamma(\alpha_{89}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{89}, 0)}{\Gamma(\alpha_{89} + \beta_{89}, 0)} = 3.144 \times 10^{-9}$$

$$p_{89}(x) := \frac{x^{\alpha_{89}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{89}-1}}{B_{89}}$$

Риск: $R_{810}=0.69$ Процент: $\Pi_{810}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp}_{810} := (\Pi_{810} \cdot R_{810})^2 = 0.03 \quad \sigma_{810} := R_{810} \cdot \Pi_{810} = 0.172 \quad \underline{\underline{\sigma_{810}}} := \sqrt{\text{Disp}_{810}} = 0.172$$

Коэффициент вариации:

$$v_{810} := \frac{\text{Disp}_{810}}{R_{810}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{810} := \frac{1 - R_{810} - R_{810} \cdot v_{810}}{v_{810}} = 4.27 \quad \beta_{810} := \alpha_{810} \cdot \frac{1 - R_{810}}{R_{810}} = 1.918$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{810} := \frac{\Gamma(\alpha_{810}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{810}, 0)}{\Gamma(\alpha_{810} + \beta_{810}, 0)} = 0.05$$

$$p_{810}(x) := \frac{x^{\alpha_{810}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{810}-1}}{B_{810}}$$

$$x := 0, 0.001.. 1$$

x =

0
$1 \cdot 10^{-3}$
$2 \cdot 10^{-3}$
$3 \cdot 10^{-3}$
$4 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{-3}$
$6 \cdot 10^{-3}$
$7 \cdot 10^{-3}$
$8 \cdot 10^{-3}$
$9 \cdot 10^{-3}$
0.01
0.011
0.012
0.013
0.014
...

Графики:

Как видно из рисунка В.1 при классе сейсмостойкости здания $K_s = 8$ наиболее вероятный ущерб при 7 балльных воздействиях составляет около 2%. Для 8 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба 10% а для 9 балльных воздействий наиболее вероятный ущерб составляет около 32%. Для 10 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба составляет около 80%. Очевидно, что с увеличением значения класса сейсмостойкости K_s пики в графиках функции плотности распределения ущерба (ф.п.р.) сдвигаются ближе к нулю (0).

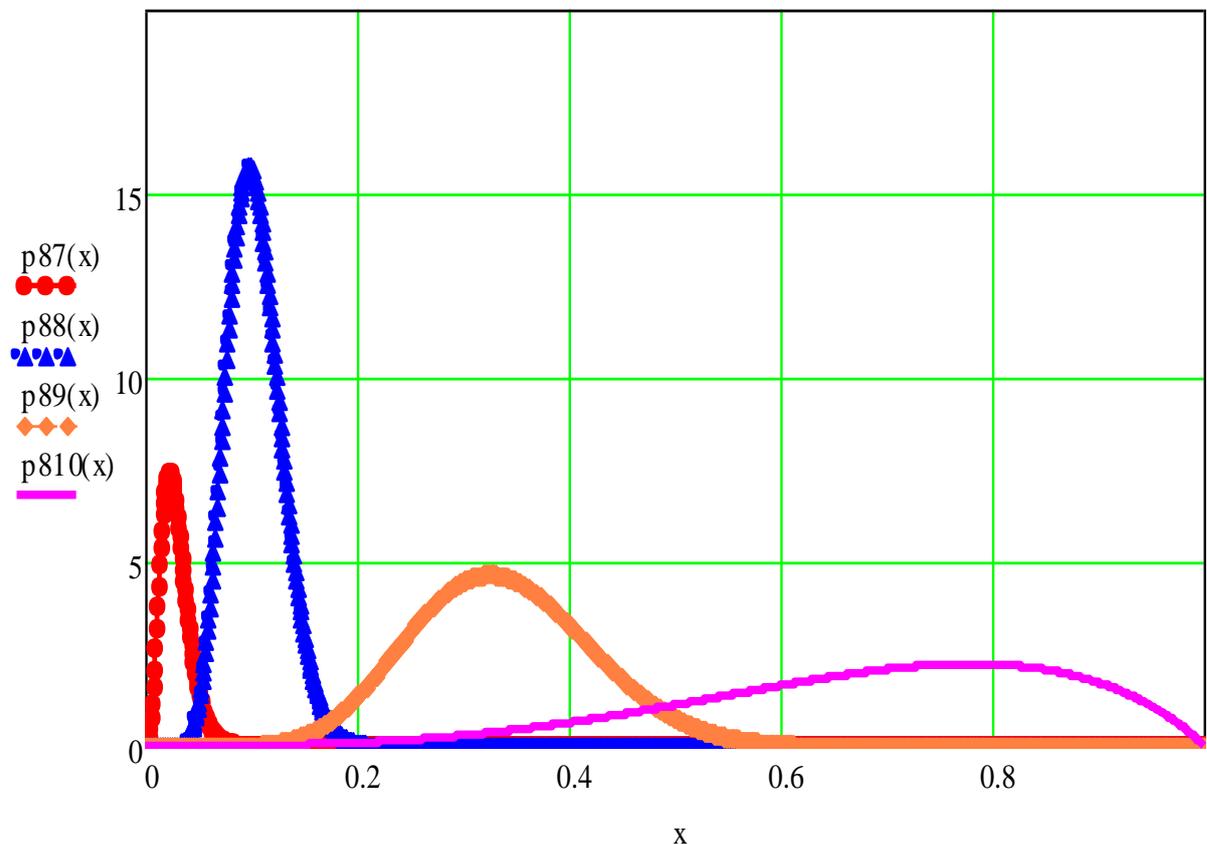


Рисунок В.1 – Ф.п.р. ущерба без учета социальных потерь для 7 (красная кривая), для 8 (синяя кривая), 9 (оранжевая кривая) и 10-балльных (розовая кривая) воздействий.

Суммарный график Ф.п.р. ущерба (рисунок В.2):

$$\phi_8(x) := p_{87}(x) \cdot L_3 + p_{88}(x) \cdot L_6 + p_{89}(x) \cdot L_7 + p_{810}(x) \cdot L_8$$

$$L_3 = 0.01$$

$$L_6 = 2 \times 10^{-3}$$

$$L_7 = 1 \times 10^{-3}$$

$$L_8 = 2 \times 10^{-4}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.011 \\ 0.01 \\ 5.855 \times 10^{-3} \\ 3.201 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-3} \\ 1 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

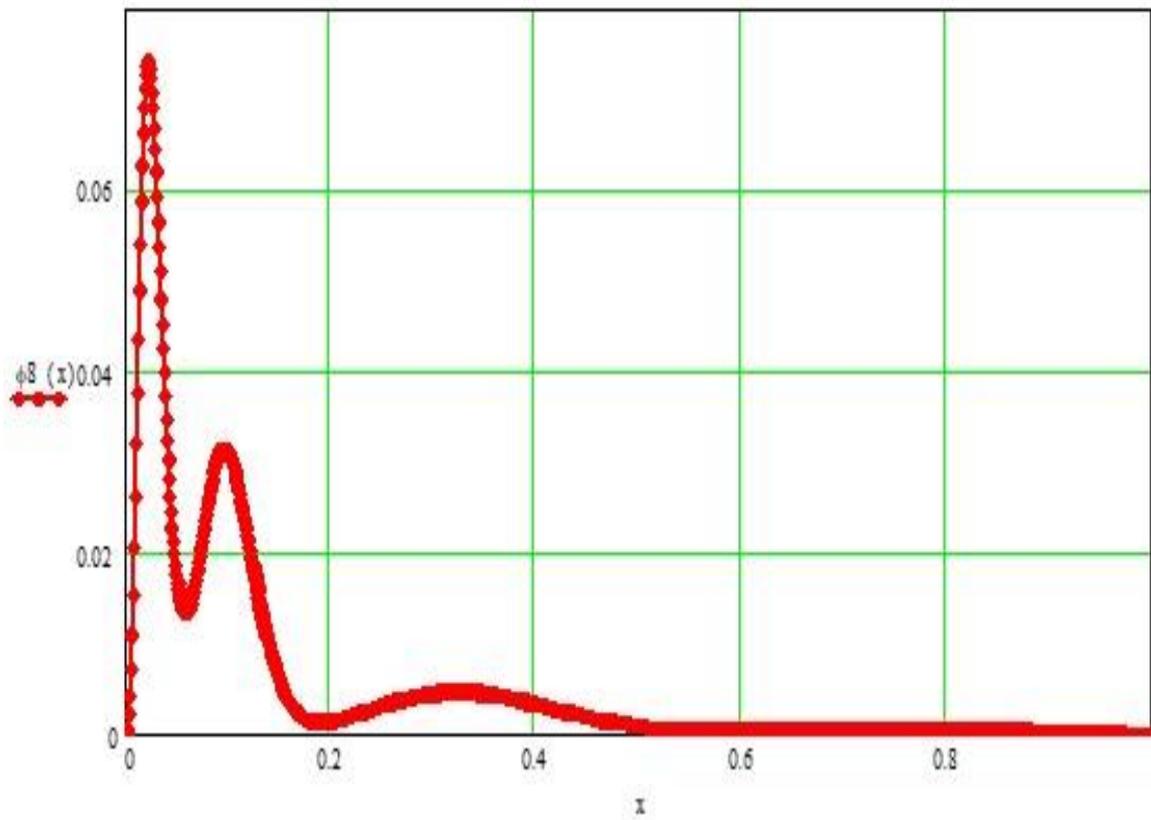


Рисунок В.2 – Суммарный график Ф.п.р. ущерба для рассматриваемой мечети.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчет Ф.п.р. (функция плотности распределения) ущерба для 7,8,9, и 10-балльных воздействий при классе сейсмостойкости $K_s=9$ баллов

Ф.п.р. – означает функция плотности распределения, индекс 87 в обозначении риска R_{97} означает: Первая цифра 9 – класс сейсмостойкости K_s в баллах, а вторая 7 – сила землетрясения в баллах.

Π_{97} : П- проценты(доли) для вычисления σ (рекомендованный диапазон 0.2-0.4).

Вычисляем дисперсию и коэффициент вариации. При вычислениях выражаем бета-функцию через гамма-функцию

при $K_s = 9$

Риск: $R_{97}=0.014$

Процент: $\Pi_{97}=0.64$

Дисперсия:

$$\text{Disp}_{97} := (\Pi_{97} \cdot R_{97})^2 = 8.028 \times 10^{-5} \quad \sigma_{97} := R_{97} \cdot \Pi_{97} = 8.96 \times 10^{-3}$$

Коэффициент вариации:

$$v_{97} := \frac{\text{Disp}_{97}}{R_{97}^2} = 0.41$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{97} := \frac{1 - R_{97} - R_{97} \cdot v_{97}}{v_{97}} = 2.393 \quad \beta_{97} := \alpha_{97} \cdot \frac{1 - R_{97}}{R_{97}} = 168.552$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{97} := \frac{\Gamma(\sigma_{97}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{97}, 0)}{\Gamma(\alpha_{97} + \beta_{97}, 0)} = 5.154 \times 10^{-4}$$

$$p_{97}(x) := \frac{x^{\alpha_{97}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{97}-1}}{B_{97}}$$

Риск: $R_{98}=0.058$

Процент: $\Pi_{98}=0.31$

Дисперсия:

$$\text{Disp98} := (\text{П98} \cdot \text{R98})^2 = 3.233 \times 10^{-4} \quad \sigma_{98} := \text{R98} \cdot \text{П98} = 0.018 \quad \underline{\underline{\sigma_{98}}} := \sqrt{\text{Disp98}} = 0.018$$

Вычислим коэффициент вариации:

$$v_{98} := \frac{\text{Disp98}}{\text{R98}^2} = 0.096$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{98} := \frac{1 - \text{R98} - \text{R98} \cdot v_{98}}{v_{98}} = 9.744 \quad \beta_{98} := \alpha_{98} \cdot \frac{1 - \text{R98}}{\text{R98}} = 158.261$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{98} := \frac{\Gamma(\alpha_{98}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{98}, 0)}{\Gamma(\alpha_{98} + \beta_{98}, 0)} = 0$$

$$p_{98}(x) := \frac{x^{\alpha_{98}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{98}-1}}{B_{98}}$$

Риск: $\text{R99}=0.17$

Процент: $\text{П99}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp99} := (\text{П99} \cdot \text{R99})^2 = 1.806 \times 10^{-3} \quad \sigma_{99} := \text{R99} \cdot \text{П99} = 0.043$$

Коэффициент вариации:

$$v_{99} := \frac{\text{Disp99}}{\text{R99}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{99} := \frac{1 - \text{R99} - \text{R99} \cdot v_{99}}{v_{99}} = 13.11 \quad \beta_{99} := \alpha_{99} \cdot \frac{1 - \text{R99}}{\text{R99}} = 64.008$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$\underline{\underline{G(x)}} := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{99} := \frac{\Gamma(\alpha_{99}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{99}, 0)}{\Gamma(\alpha_{99} + \beta_{99}, 0)} = 0$$

$$p^{99}(x) := \frac{x^{\alpha^{99}-1} \cdot (1-x)^{\beta^{99}-1}}{B^{99}}$$

Риск: $R_{910}=0.4708$

Процент: $P_{910}=0.25$

Дисперсия:

$$\text{Disp}^{910} := (P_{910} \cdot R_{910})^2 = 0.014 \quad \sigma_{910} := R_{910} \cdot P_{910} = 0.118 \quad \text{ИЛИ} \quad \sigma_{910} := \sqrt{\text{Disp}^{910}} = 0.118$$

Коэффициент вариации:

$$v_{910} := \frac{\text{Disp}^{910}}{R_{910}^2} = 0.063$$

Вычислим параметры:

$$\alpha_{910} := \frac{1 - R_{910} - R_{910} \cdot v_{910}}{v_{910}} = 7.996 \quad \beta_{910} := \alpha_{910} \cdot \frac{1 - R_{910}}{R_{910}} = 8.988$$

Выражаем бета-функцию через гамма-функцию:

$$G(x) := \Gamma(x, 0)$$

$$B_{910} := \frac{\Gamma(\alpha_{910}, 0) \cdot \Gamma(\beta_{910}, 0)}{\Gamma(\alpha_{910} + \beta_{910}, 0)} = 9.816 \times 10^{-6}$$

$$p^{910}(x) := \frac{x^{\alpha_{910}-1} \cdot (1-x)^{\beta_{910}-1}}{B_{910}}$$

$x := 0, 0.001.. 1$

$x =$

0
$1 \cdot 10^{-3}$
$2 \cdot 10^{-3}$
$3 \cdot 10^{-3}$
$4 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{-3}$
$6 \cdot 10^{-3}$
$7 \cdot 10^{-3}$
$8 \cdot 10^{-3}$
$9 \cdot 10^{-3}$
0.01
0.011
0.012
0.013
0.014
...

$$\varphi(x) := p_{97}(x) \cdot L_3 + p_{98}(x) \cdot L_6 + p_{99}(x) \cdot L_7 + p_{910}(x) \cdot L_8$$

$$L_3 = 0.01$$

$$L_6 = 2 \times 10^{-3}$$

$$L_7 = 1 \times 10^{-3}$$

$$L_8 = 2 \times 10^{-4}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.02 \\ 0.011 \\ 0.01 \\ 5.855 \times 10^{-3} \\ 3.201 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-3} \\ 1 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Графики:

Как видно из рисунка Г.1 при классе сейсмостойкости здания $K_s = 9$ наиболее вероятный ущерб при 7 балльных воздействиях составляет около 0%. Для 8 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба 5% а для 9 балльных воздействий наиболее вероятный ущерб составляет около 18%. Для 10 балльных воздействий величина наиболее вероятного ущерба составляет около 48%. Очевидно что с увеличением значения класса сейсмостойкости K_s пики в графиках функции плотности распределения ущерба (ф.п.р.) сдвигаются ближе к нулю (0).

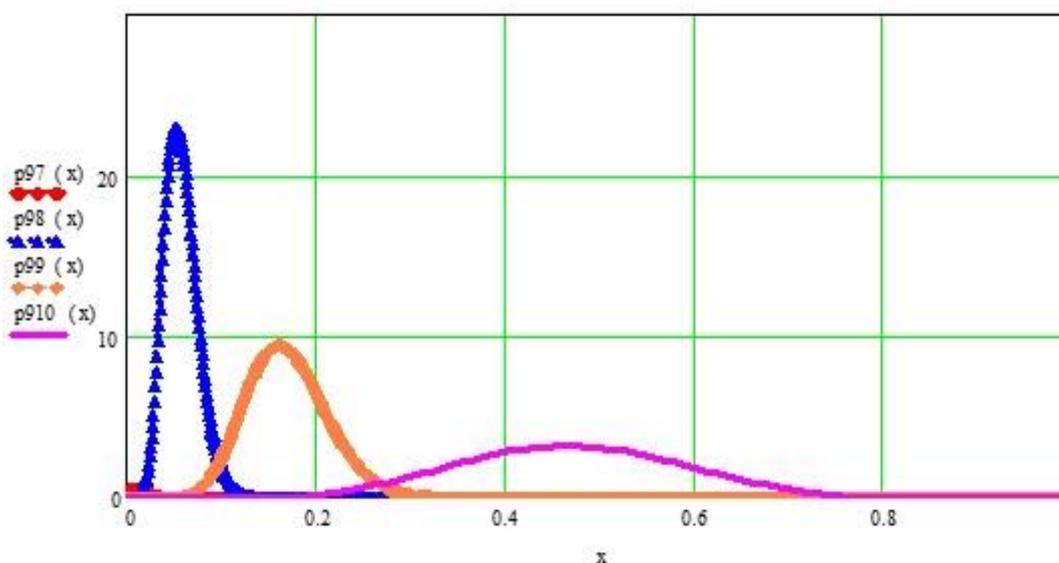


Рисунок Г.1 – Ф.п.р. ущерба без учета социальных потерь для 7 (красная кривая), для 8 (синяя кривая), 9 (оранжевая кривая) и 10-балльных (розовая кривая) воздействий.

Суммарный график ф.п.р. ущерба показан на рисунке Г.2.

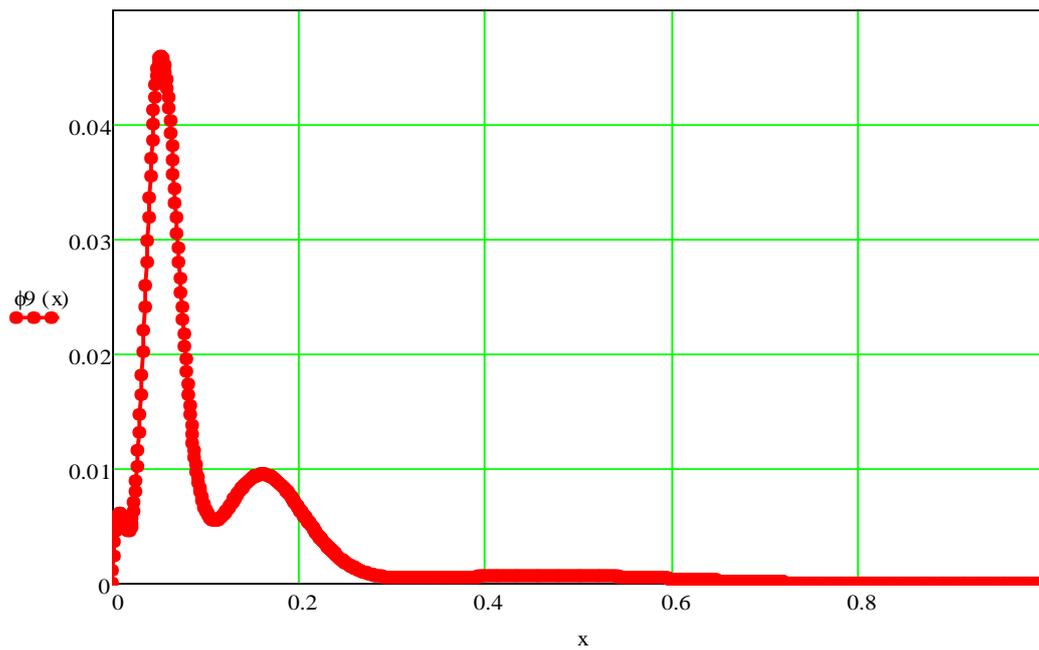


Рисунок Г.2 – Суммарный график Ф.п.р. потерь для рассматриваемой мечети.