

На правах рукописи



БУБИС АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КАМЕННО – МОНОЛИТНЫХ СТЕН
ЗДАНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ,
В ТОМ ЧИСЛЕ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Специальность 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций имени В.А. Кучеренко акционерного общества «Научно-исследовательский центр «Строительство» (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»).

Научный руководитель

Гусев Борис Владимирович

Член-корр. РАН

Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Савин Сергей Николаевич

доктор технических наук,

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»), профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

Мажиев Хасан Нажоевич

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Грозненский Государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВО ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова), заведующий кафедрой «Строительные конструкции»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»)

Защита состоится «16» февраля 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО "НИЦ "Строительство" по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6 (корпус 5, конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Освоение территорий, богатых природными ресурсами, находящихся, как правило, в регионах, отличающихся суровыми климатическими и сложными грунтовыми условиями, ставят перед инженерами-строителями ряд новых исследовательских задач. Решение этих задач должно привести к созданию новых или усовершенствованию уже существующих конструкций зданий, отвечающих предъявляемым к ним требованиям, среди которых на первом месте стоит повышение сейсмостойкости и теплостойкости.

Анализ, проведенный для различных конструктивных решений стен, показал, что многослойные каменно-монолитные стены могут быть решением, предпочтительным для строительства в климатических условиях сейсмических районов Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. Подобная конструктивная система сочетает в себе высокие теплотехнические характеристики и высокую сейсмостойкость.

Для успешного внедрения указанных конструктивных решений стен требуется определить для них характерные константы и разработать пригодную для инженерного анализа и широкого применения модель многослойного каменно-монолитного композита с проведением численных исследований.

Такой моделью может стать плосконапряженный однослойный изотропный элемент, для которого получены характеристики материала и зависимости «напряжение-относительная деформация» с учетом особенностей взаимодействия и взаимовлияния всех слоев.

Степень разработанности темы диссертации. В диссертации выполнен анализ трудов ученых в области механики каменной кладки (Т. И. Барановой, О. В. Кабанцева, В. И. Коноводченко, Д. Г. Копаницы, Р. Мели, Л. И. Онищика, В. В. Пангаева, М. Я. Пильдиша, С. В. Полякова, С. М. Сафаргалиева, С. А. Семенцова, Б. С. Соколова, Г. П. Тонких, Б. Н. Фалевича), математического моделирования каменной кладки (Г. А. Гениева, О. В. Кабанцева, Г. Г. Кашеваровой, В. В. Пангаева, Б. С. Соколова, Г. А. Тюпина, R. Carozussa, S. Fattal, A. W. Hendry, A. W. Page), сейсмостойкого строительства (Я. М. Айзенберга, Г. А. Ашкинадзе, В. С. Беляева, Д. Ф. Борджеса, И. И. Ведякова, И. И. Гольденблата, Б.В. Гусева, Т. Ж. Жунусова, В. И. Жарницкого,

А. В. Забегаева, К. С. Завриева, И. Л. Корчинского, Х. Н. Мажиева, Ю. П. Назарова, Н. Ньюмарка, А. В. Перельмутера, Е. Поллнера, С. В. Полякова, Н. Н. Попова, А. Равара, Э. Розенблюета, Б. С. Расторгуева, В. И. Смирнова, А. Г. Тамразяна, А. Г. Тяпина, А. М. Уздина, Э. Е. Хачияна, А. И. Ципенюка, Г. И. Шапиро, М. А. Biot, L. R. Esteva, G. W. Housner, H. Shibata, A. S. Veletsos).

Несмотря на большой объем выполненных исследований в области сейсмостойкости комплексных конструкций с применением каменной кладки, включая многослойные, следует отметить, что вопросы взаимовлияния и взаимодействия материалов многослойных конструкций на пластическую стадию деформирования и разрушение элементов стен в условиях двухосного напряженного состояния не отражены в научных публикациях и в действующих нормах.

Внедрение предлагаемой технологии домостроения сдерживается спецификой расчетных методов, применяемых для проектирования несущих многослойных стен. В расчет прочности принимается только железобетонный слой. Кладочные слои учитываются только как нагрузка на здание. Между тем результаты научно-исследовательской работы (project № Coll – St-2003-500291) по изучению допустимых горизонтальных нагрузок при сдвиге каменной кладки из керамических изделий (исследования ESECMaSE) показали, что существуют значительные пластические резервы у конструкций, выполненных из керамического пустотелого кирпича и камня при восприятии сейсмических нагрузок.

Таким образом, обозначенные вопросы по механике упругопластического деформирования и разрушения каменно-монолитных конструкций, оценка параметров, определяющих процесс деформирования, и определение их величины в условиях двухосного напряженного состояния, в том числе при сейсмических воздействиях, определяют целесообразность проведения соответствующего научного исследования.

Цель работы – выявление резерва несущей способности зданий с несущими конструкциями из многослойных каменно-монолитных стен, определение и обоснование значений характеристик предельных состояний таких конструкций на основе результатов экспериментально-теоретических исследований.

Для достижения цели, поставленной в работе, решены следующие основные **задачи**:

– проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований каменных, железобетонных, а также выполненных ранее исследований комплексных конструкций;

– выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований многослойных конструкций, проведенных ранее, для оценки особенностей взаимодействия слоев многослойной стены;

– выполнены экспериментальные исследования фрагментов однослойных каменных, кирпичных и железобетонных конструкций, а также многослойных конструкций на «перекос» в своей плоскости. Получены экспериментальные зависимости и изучен характер деформирования слоев испытываемых образцов при различных параметрах отдельных слоев многослойного композита;

– разработан метод учета влияния кладочных слоев конструкции на общую работу слоистого элемента;

– разработана и верифицирована модель многослойных каменно-монолитных конструкций для условий двухосного напряженного состояния, учитывающая механические характеристики материалов отдельных слоев и позволяющая моделировать условия взаимодействия материалов композита, упругую и пластическую фазы деформирования, а также разрушение при возрастающих нагрузках;

– разработана компьютерная программа, позволяющая создавать конечные элементы с различными прочностными и деформационными параметрами, для использования в пространственных расчетных моделях;

– выполнены численные исследования процессов упругопластического деформирования и характера разрушения многослойных каменно-монолитных конструкций с различным сочетанием железобетонных и каменных слоев с определением взаимовлияния отдельных слоев;

- обоснованы параметры предельных состояний многослойных каменно-монолитных конструкций стен сейсмостойких зданий.

Объект исследования – каменно-монолитные здания, в том числе предназначенные для строительства в сейсмоопасных районах, каменные и кирпичные стены зданий, которые могут быть реконструированы и сейсмоусилены с использованием торкретбетона или бетонных аппликаций.

Предмет исследования – предельные состояния каменно-монолитных конструкций зданий при воздействиях, создающих плосконапряженное состояние, в частности при ветровых и сейсмических нагрузках.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- установлены характеристики предельных состояний каменно-монолитных конструкций сейсмостойких зданий;
- обоснованы величины коэффициента допускаемых повреждений каменно-монолитных конструкций сейсмостойких зданий;
- экспериментально обоснованы значения предельных относительных деформаций сжатых диагоналей слоев трехслойных элементов каменно-монолитных конструкций при «перекосе» в своей плоскости для упругой и пластической стадий деформирования;
- обоснован эффект влияния соотношения параметров и структуры компонентов на несущую способность и схему деформирования многослойной конструкции в целом;
- установлен и обоснован особый режим работы каменных слоев в составе каменно-монолитных конструкций, при котором отсутствует зависимость параметров напряженно-деформированного каменного слоя, включая трещинообразование, от ключевой характеристики каменной кладки сейсмостойких конструкций – величины адгезионной прочности взаимодействия кирпича и раствора, что определяется совместной работой каменных слоев и слоя из монолитного бетона (железобетона);
- разработана и верифицирована модель элемента многослойных каменно-монолитных конструкций для двухосного напряженного состояния, позволяющая выполнить расчеты в рамках стадий упругого и пластического деформирования (до стадии разрушения) при непрерывно возрастающих нагрузках. Разработанная модель отличается от известных реализаций тем, что на основе деформационных критериев учитывает взаимодействие и взаимовлияние отдельных слоев конструкции;
- проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния каменно-монолитных конструкций при различных характеристиках материалов отдельных слоев с учетом их взаимовлияния при возрастающих нагрузках.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

- установлены закономерности упругопластического деформирования, последовательность разрушения каменно-монолитных конструкций и пластические характеристики многослойных каменно-монолитных конструкций с учетом взаимодействия и взаимовлияния отдельных слоев конструкции;

– установлена степень влияния параметров отдельных слоев каменно-монолитных конструкций на величину пластической стадии деформирования и несущую способность при двухосном напряженном состоянии;

– установлены параметры, описывающие пластичность каменно-монолитных конструкций для условий плосконапряженного состояния и их значения, определяющие предельные состояния многослойных конструкций сейсмостойких каменно-монолитных стен зданий;

- обоснованы значения коэффициента допускаемых повреждений многослойных каменно-монолитных конструкций как обобщенной характеристики предельных состояний при совместном деформировании слоев в условиях сейсмических воздействий.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- повышены надежность и безопасность зданий с многослойными стенами, за счет установления и обоснования характеристик предельных состояний таких конструкций при сейсмических воздействиях с учетом совместной работы отдельных слоев;

- разработаны и внедрены в практику проектирования рекомендации и альбомы технических решений, применяемые при проектировании реальных зданий и сооружений;

- внесены уточнения в содержание нормативного документа СП 14.13330.2014 «Свод правил. Строительство в сейсмических районах» в части снятия ограничений на этажность зданий с многослойными стенами;

- создан алгоритм распределения нагрузок и учета взаимного влияния слоев;

- разработан метод расчета, позволяющий учитывать совместную работу многослойных конструкций стен при возрастающих нагрузках и выполнить прогноз сейсмостойкости зданий на основе назначения уровня предельно допускаемых повреждений.

Методология и методы исследования. Основой исследования стали работы отечественных и зарубежных ученых, исследователей в области сейсмостойкости каменных и комплексных конструкций, механики каменной кладки, методов математического и физического моделирования слоистых конструкций, методов расчета, реализующих пошаговый конечно-элементный анализ, гипотезы теории упругости, теории сейсмостойкости, строительной механики, общепринятые численные методы расчетного анализа.

Экспериментальные исследования выполнены соискателем с использованием следующих приборов и оборудования:

- испытательных прессов и домкратов, позволяющих производить нагружение образцов с контролем воздействия, передаваемого на образец;
- средств измерения деформаций, перемещений (мессуры, прогибомеры).

Эксперименты и обработка их результатов выполнены в соответствии с требованиями и рекомендациями отечественных и зарубежных документов.

Теоретические исследования задач упругопластического деформирования каменно-монолитных конструкций в условиях двухосного напряженного состояния выполнены с использованием классических методов теории пластин с учетом назначаемых критериев прочности и предельных значений деформаций (метод конечных элементов, иные методы моделирования работы пластин).

Личный вклад автора состоит в:

- проведении экспериментальных исследований многослойных каменно-монолитных конструкций при возрастающих нагрузках и анализе механизмов разрушения слоев кладки;
- проведении численных исследований упругопластического деформирования и разрушения многослойных каменно-монолитных конструкций в условиях двухосного напряженного состояния с учетом взаимодействия и взаимовлияния отдельных слоев;
- определении пластических характеристик многослойных каменно-монолитных конструкций для условий двухосного напряженного состояния;
- разработке модели многослойных каменно-монолитных конструкций для условий двухосного напряженного состояния, позволяющей выполнять расчеты с учетом упругой и пластической фаз деформирования, а также разрушений при возрастающих нагрузках, характеристик и условий взаимодействия отдельных слоев композита;
- разработке метода расчета, позволяющего на основе деформационных критериев учитывать совместную работу слоев многослойных конструкций при возрастающих нагрузках;
- обосновании характеристик предельных состояний многослойных каменно-монолитных конструкций стен сейсмостойких зданий и определении величин коэффициента допускаемых повреждений.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований фрагментов многослойных каменно-монолитных конструкций при возрастающих нагрузках с учетом процессов упругопластического деформирования и разрушения;
- результаты численных исследований фрагментов многослойных каменно-монолитных конструкций с учетом упругопластического деформирования, разрушения, взаимодействия и взаимовлияния отдельных слоев;
- результаты исследований по определению пластических характеристик исследованных многослойных каменно-монолитных конструкций;
- модель многослойных каменно-монолитных конструкций для условий двухосного напряженного состояния, позволяющая задавать упругую и пластическую стадии деформирования, а также разрушение при возрастающих нагрузках. Разработанная модель отличается от известных реализаций тем, что учитывает взаимодействие и взаимовлияние отдельных слоев конструкции;
- метод расчета, позволяющий учитывать совместную работу слоев многослойных конструкций при возрастающих нагрузках;
- характеристики предельных состояний при упругопластическом деформировании каменно-монолитных конструкций стен сейсмостойких зданий;
- величины коэффициента допускаемых повреждений для расчетов сейсмических нагрузок для конструкций каменно-монолитных сейсмостойких зданий.

Обоснованность и достоверность результатов исследования.

Представленные в диссертации результаты исследования, выводы и заключение подтверждаются использованием общепризнанных моделей, методов расчета и расчетных подходов, удовлетворительным совпадением результатов численных верификационных расчетов и результатов физических экспериментов, в том числе:

- проведенными экспериментами по изучению процессов упругопластического деформирования, совместной работы слоев и разрушения образцов каменно-монолитных конструкций, в том числе в условиях двухосного напряженного состояния;
- применением при выполнении экспериментальных исследований поверенных контрольно-измерительных приборов и регистрирующего оборудования;

- соответствующим применением подходов теории твердого деформируемого тела и строительной механики;
- корректным применением верифицированных и сертифицированных расчетных программных комплексов;
- сравнительным анализом и верификацией результатов физических экспериментов и численных исследований, выполненных на основе предложенного метода моделирования деформирования каменно-монолитных конструкций.

Апробация результатов исследования:

Основные результаты исследования докладывались и получили одобрение на следующих конференциях и семинарах:

- IV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (г. Сочи, 14–17 октября 2001 г.);
- V Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (г. Сочи, 14–17 сентября 2003 г.);
- VIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (г. Сочи, 24–29 августа 2009 г.);
- Межрегиональный пагуошский симпозиум «Наука и высшая школа в Чеченской республике» (Чеченская Республика, г. Грозный, 22–24 апреля 2010 г.);
- IX Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (г. Сочи, 6–9 сентября 2011 г.);
- 15 World Conference on Earthquake Engineering (Lisboa, 24 to 28 September 2012);
- Международная научно-практическая конференция, посвященная 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова» (Чеченская Республика, г. Грозный 24–26 марта 2015 г.);
- Научный семинар кафедр железобетонных и каменных конструкций, металлических и деревянных конструкций, строительной механики, основания фундаментов и испытания сооружений ФГБОУ ВО Томского государственного архитектурно-строительного университета (г. Томск, 19 сентября 2019 г.);
- Заседание отдела материаловедения Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской Академии наук (КНИИ РАН) (Чеченская республика, г. Грозный, 11 сентября 2019 г.).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Результаты экспериментальных исследований по изучению процессов упругопластического деформирования, разрушения и определению пластических характеристик многослойных каменно-монолитных конструкциях при возрастающих нагрузках

Трехслойные конструкции из 2 наружных слоев кладки с бетонным слоем между ними впервые были предложены в 30-40 годы прошлого века в СССР. Особенности работы однослойных стен из кладки и бетона изучены достаточно хорошо. Результаты экспериментальных исследований плоско-напряженных железобетонных и каменных конструктивных элементов приведены в работах Я.М. Айзенберга, А.Е. Актана, Г.Н. Ашкинадзе, В. Бертеро, А.В. Грановского, В.Г. Ивенко, Ю.В. Измаилова, О.В. Кабанцева, В.А. Камейко, Н. Ньюмарка, П.Л. Пастернака, С.В. Полякова, О.И. Пономарева, С.Н. Савина, С.М. Сафаргалиева, В.И. Смирнова, М.Е. Соколова, Г.П. Тонких, С.С. Шукюрова, А.В. Черкашина, и др.

В 1993 г. проведены экспериментальные статические исследования фрагментов трехслойных стен, в которых принимали участие проф., д-р техн. наук Я.М. Айзенберг, канд. техн. наук В.И. Смирнов и проф. Ярар. В результате были получены основные общие динамические характеристики трехслойных конструкций.

В развитие полученных результатов, в 2002 г. в г. Иркутске автором были проведены испытания натуральных фрагментов трехслойных и четырехслойных каменно-монолитных конструкций стен с целью определения основных деформационных характеристик, пределов совместной работы кирпичных и монолитных слоев и механизма распределения нагрузки между слоями. Программой предусматривалось испытание фрагментов несущих стен размером 150x160 см на псевдо-динамическое действие нагрузки.

Получены зависимости «горизонтальная сила-перемещение» (рисунок 1), для оценки вклада слоев в работу многослойной конструкции и их деформационные характеристики.

Было изготовлено по три образца железобетонной, трехслойной и четырехслойной стены (Рисунок 2). В качестве опалубочных слоев использовался кирпич стандартный глиняный М150. Толщина опалубочных кирпичных слоев – 0,12 м, толщина монолитного железобетонного слоя и однослойного фрагмента – 0,2м.

Моделирование плоского напряженного состояния осуществлено по методике, примененной С.В. Поляковым, с установкой квадратного образца в стенд с ориентацией одной из диагоналей вертикально и передачей воздействия по направлению одной из его диагоналей («перекос» в своей плоскости). Общая схема загрузки образцов и расстановки измерительных приборов приведена на рисунках 3 и 4.

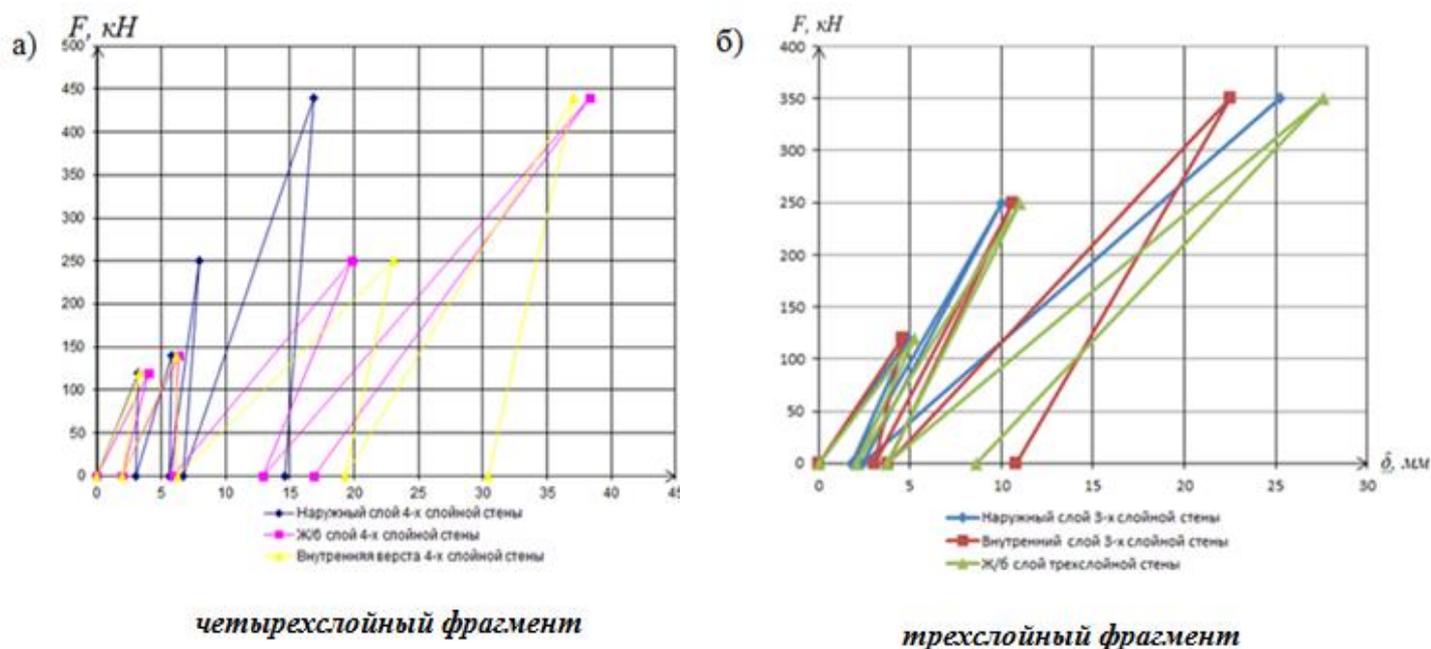


Рисунок 1 – Диаграмма «горизонтальная сила-перемещение» при одностороннем статическом нагружении фрагмента

а) образцы четырехслойной стены



б) образец на испытательном стенде



Рисунок 2 Фрагменты трех- и четырехслойных стен перед испытаниями

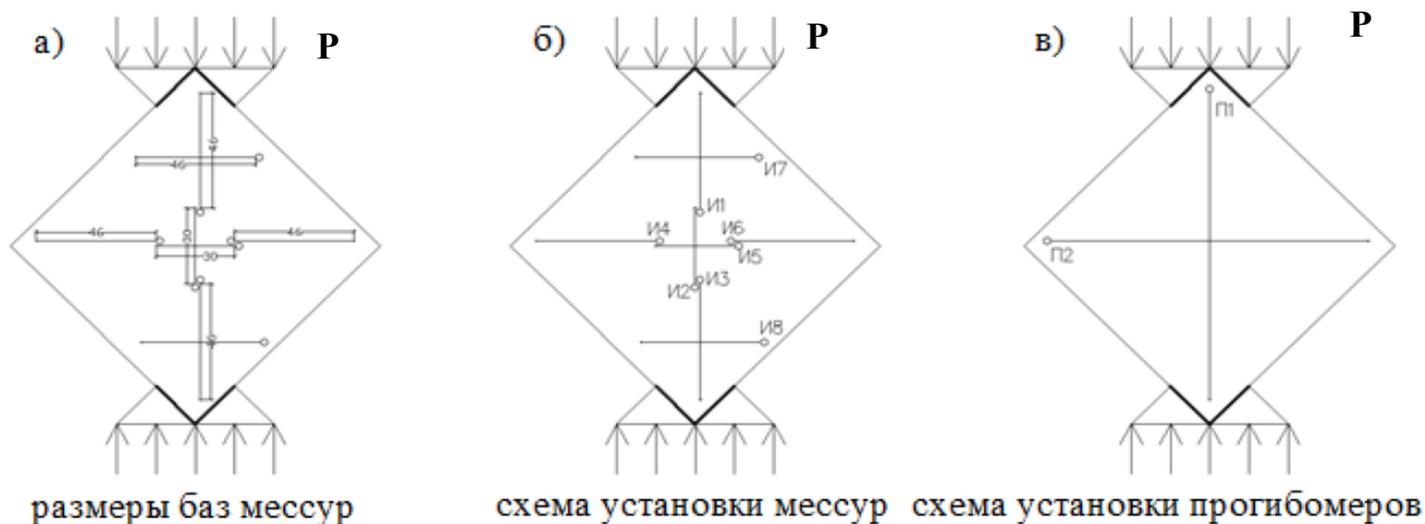


Рисунок 3 – Общая схема испытаний однослойных контрольных и комплексных образцов на перекося
(И – мессура, П – прогибомер Максимова)

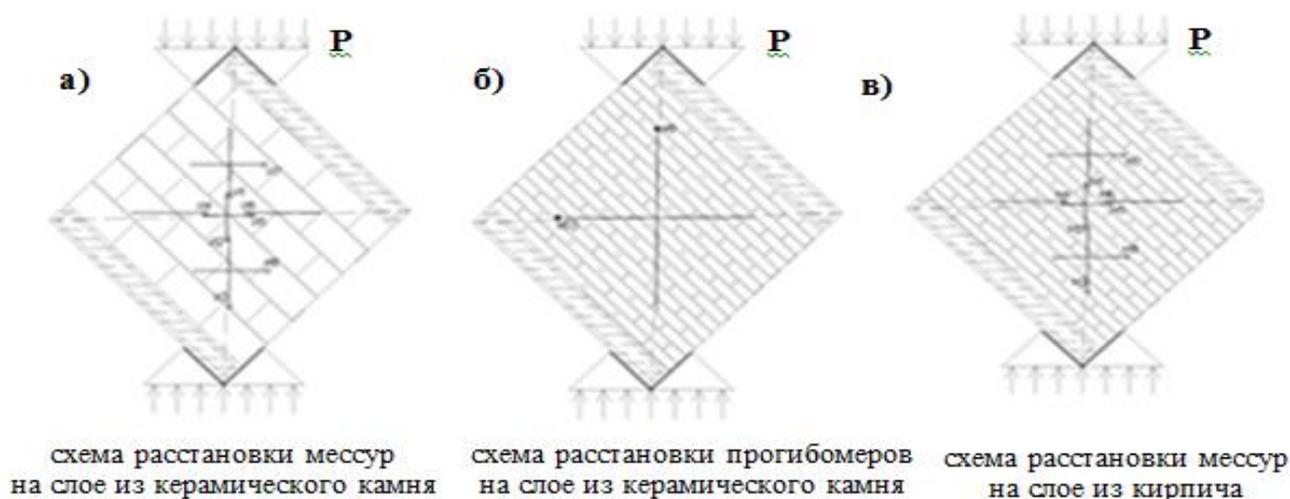


Рисунок 4 – Схема нагружения и расстановки измерительных приборов на трехслойных образцах
(И, М1-М7 – мессура, М9, М10 – прогибомер Максимова)

По результатам испытаний построены диаграммы деформирования образцов по растянутой и сжатой диагоналям (рисунок 5). Разрушение всех образцов фрагментов многослойных стен (МС-1, МС-2, МС-3) происходило по единому сценарию. При достижении образцом нагрузки $N_{1тр}$ в кладке с обеих сторон образца образовывались трещины. При дальнейшем увеличении нагрузки наблюдался рост трещин. Трещины образовывались вдоль сжатой диагонали образца и параллельно ей.

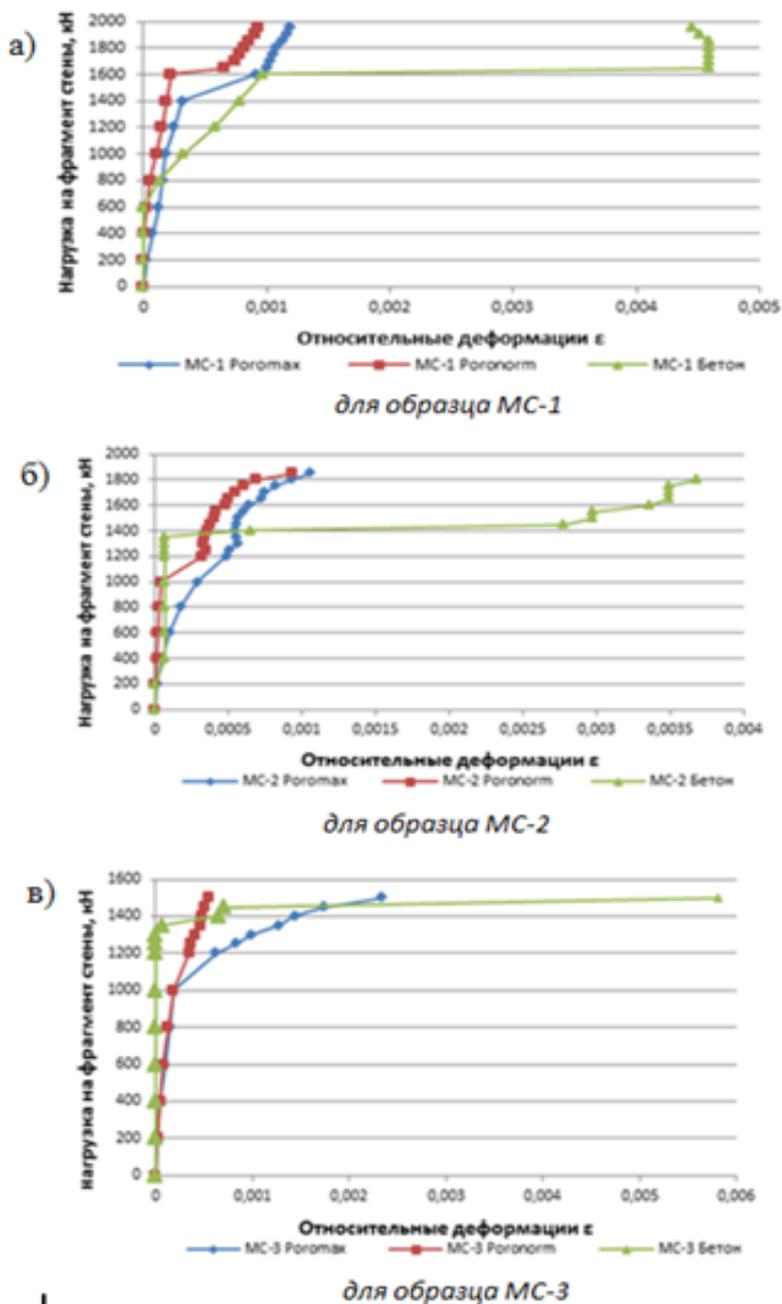


Рисунок 5 – Зависимость относительных деформаций сжатых диагоналей образцов трехслойных стен от разрушающей нагрузки диагоналей слоев

легли в основу верификации предлагаемого метода расчета многослойных каменно-монолитных конструкций стен с учетом работы всех слоев, в том числе на сейсмическую нагрузку.

2. Модель и метод расчета, позволяющие учитывать совместную работу слоев многослойных конструкций, и результаты численных исследований упругопластического деформирования и разрушения для условий двухосного напряженного состояния при возрастающих нагрузках

Дальнейшее повышение нагрузки приводило к значительным повреждениям слоев кладки, после чего всю нагрузку воспринимал на себя внутренний слой железобетона. Разрушение образцов происходило в результате разрушения слоев кладки и образования вертикальных диагональных трещин в железобетонном слое вдоль сжатой диагонали образца. На графиках (рисунок 5), отчетливо видно зону неоднородного деформирования кирпичных слоев относительно железобетонного слоя в диапазоне 0,4–0,8 от разрушающей нагрузки. По результатам выполненного анализа теоретических и экспериментальных исследований было сделано предположение о значительном влиянии кирпичной кладки на общий характер деформирования каменно-монолитных конструкций стен в указанном диапазоне. Полученные зависимости «горизонтальная сила - относительная деформация» слоев

В работе предложен метод расчета на основе деформационных критериев для учета совместной работы слоев – наружных и внутренних, их деформационные и прочностные характеристики путем создания элемента с приведенными свойствами, отражающими особенности работы каменно-монолитных конструкций стен при плоском напряженном состоянии. В результате получена диаграмма зависимости «напряжение-относительная деформация» слоистого конструктивного элемента, который может быть использован в качестве конечного элемента пространственной расчетной модели здания в стандартном расчетном комплексе. Исходными данными для описания элемента являются диаграммы зависимости «напряжения-деформации» для железобетона и кирпичной (каменной) кладки, геометрические параметры и соотношения толщин фрагмента стены и информация о нагрузке (напряжении) на фрагмент стены.

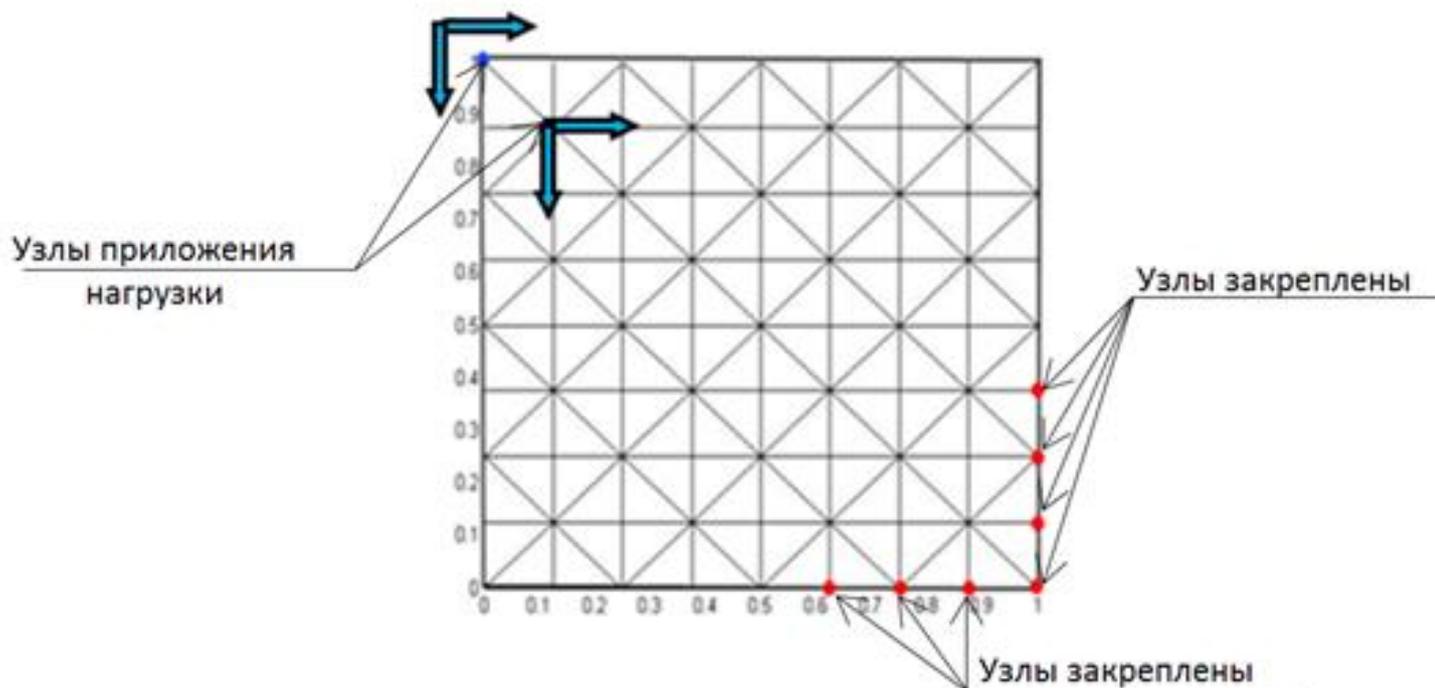


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель элемента

Криволинейная диаграмма работы каждого материала заменяется на кусочно-линейную с необходимым количеством участков.

Каждому типу материала соответствует линейный участок диаграммы. Первоначально всем элементам конструкции задан первый тип материала. При решении цикла последовательных задач, если при нагрузке $F_j = j * \Delta F$ (где $0 < j \leq N$) деформация в элементе слоя превысила m -е предельное значение, то материал этого элемента для следующей задачи становится $(m+1)$ -м (диапазон m соответствует

количеству линейных участков). В результате преобразований коэффициенты k_i , отвечающие за долю нагрузки приходящейся на каждый слой, изменяются.

При численном расчете были приняты допущения:

- условием разрушения каждого слоя считается достижение значением относительной деформации диагонали предельных значений;
- предполагается, что на начальном этапе все слои работают совместно;
- если на одном из шагов нагружения разница между относительными деформациями диагоналей соседних слоев достигает установленного предельного значения, предполагается, что произошло расслоение слоев. В этом случае, дальнейшая работа элемента обуславливается восприятием последующих шагов нагрузки исключительно основным несущим слоем;
- в диаграмме «напряжения-деформации» не учитывается ниспадающая ветвь.

Для построения графика $\delta(F)$ последовательно задается серия загрузений. Расчеты ведутся методом конечных элементов в плосконапряженной постановке (функции формы элементов – линейные) с помощью программного кода, написанного на языке Fortran.

Реализация кода выглядит следующим образом:

- задается шаг нагрузки ΔF ;
- на каждый слой приходится часть нагрузки от ΔF в зависимости от жесткостных свойств слоя на данном этапе нагружения. В многослойной стене на каждый слой приходится нагрузка $\Delta F_j = K_j \cdot \Delta F$, где

$$K_j = \frac{E_j \cdot t_j}{\sum_{j=1}^n E_j \cdot t_j}, \quad (1)$$

где E_j – модуль Юнга i -го слоя, t_j – толщина i -го слоя.

Распределение коэффициента нагрузок на слой по стадиям нагружения приведено на рисунках 7 и 8. Как видно (рисунок 7) в области от 0,4 до 0,8 от разрушающей нагрузки, доля внешнего воздействия, воспринимаемого кирпичными слоями составляет от 30% до 60%.

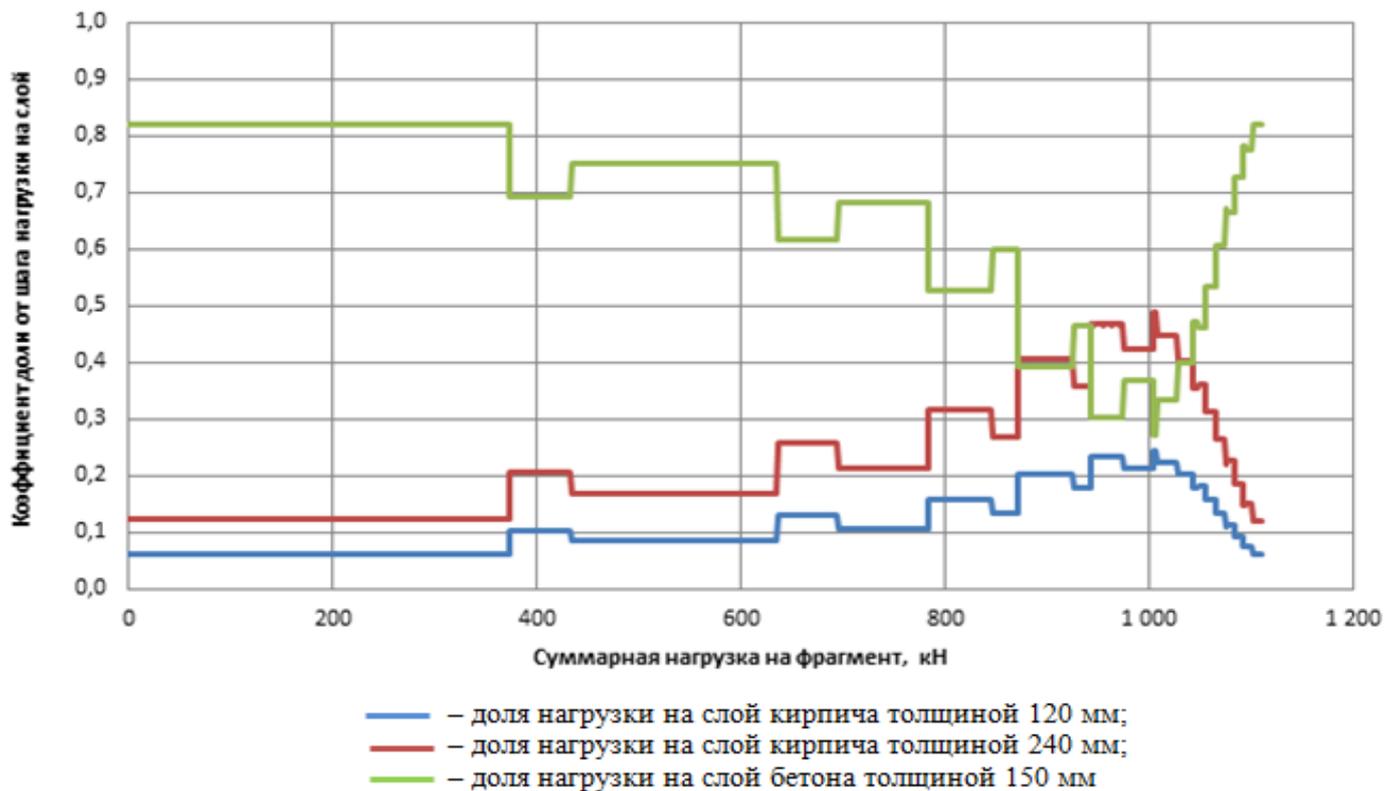


Рисунок 7 – Распределение нагрузки от ступеней приращения нагрузки на фрагмент

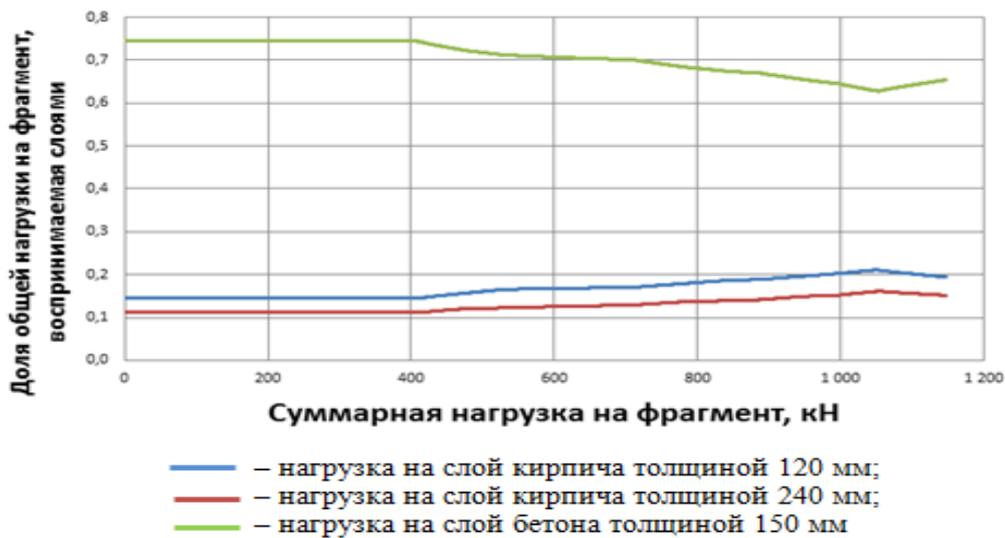


Рисунок 8 – Распределение доли нагрузки по каждому слою от суммарной нагрузки на фрагмент

В работе проведен параметрический анализ (рисунки 9-10).

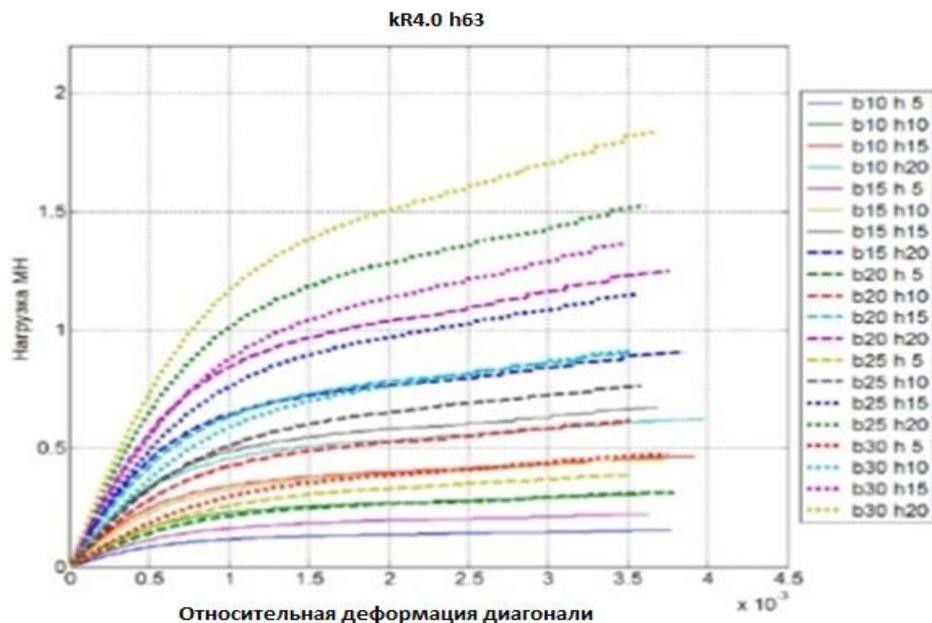


Рисунок 9 – Графики $\varepsilon_{\text{диаг.}}(F)$ различных бетонных слоев с одинаковым кирпичным слоем

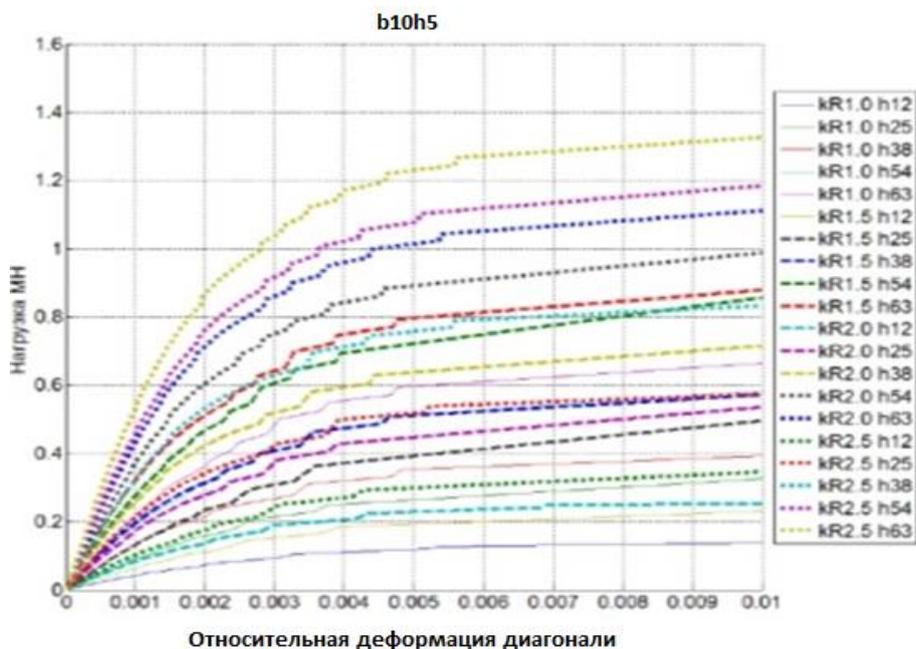


Рисунок 10 – Графики $\varepsilon_{\text{диаг.}}(F)$ бетонного слоя при различных кирпичных слоях

На рисунке 11 приведена результирующая диаграмма работы слоистого материала, состоящего из кирпичных слоев толщиной 120 и 240 мм и бетонного слоя (бетон класса В25) толщиной 150 мм.

Следует отметить, что суммирование целесообразно и возможно только для диаграмм, полученных путем совместного послойного расчетного анализа. При этом необходимо выполнить оценку возможности расслоения конструкции до достижения предельного состояния материалом слоев. Для этого следует использовать диаграммы, приведенные на рисунке 12.

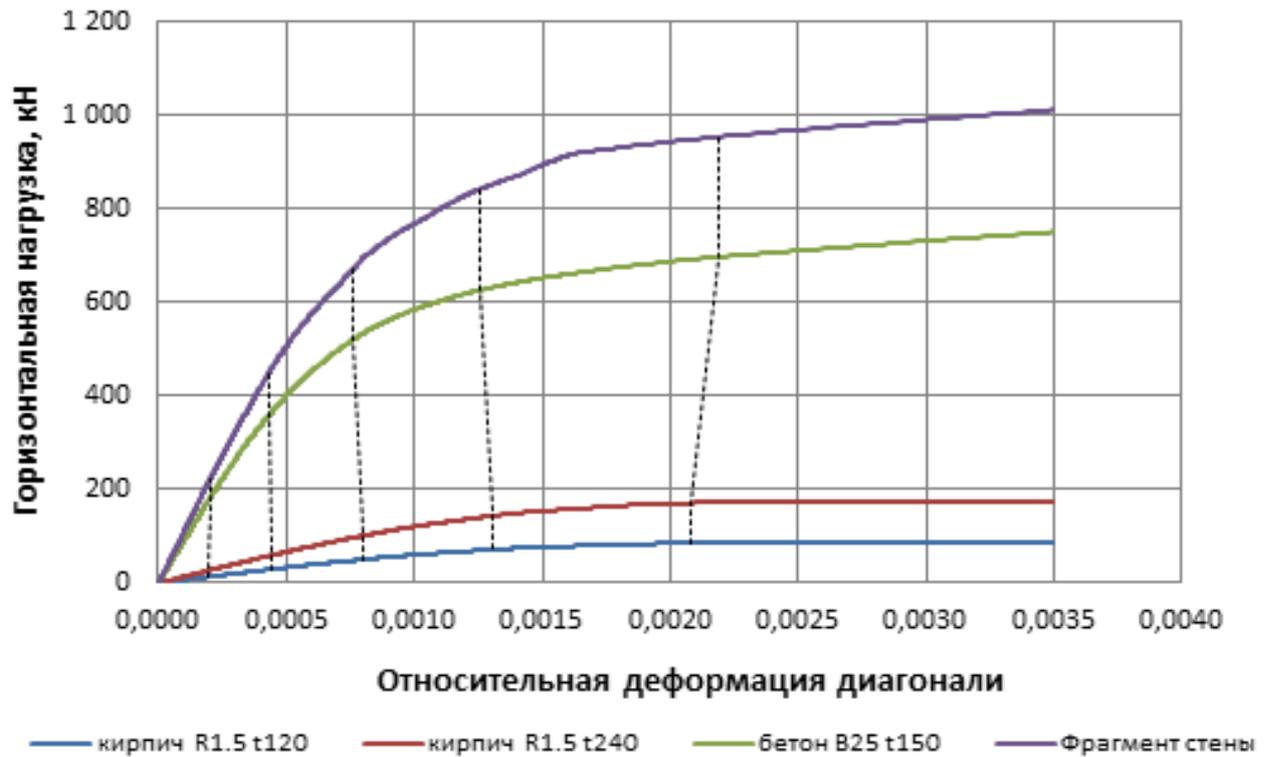


Рисунок 11 – Результирующая диаграмма деформирования слоистого элемента

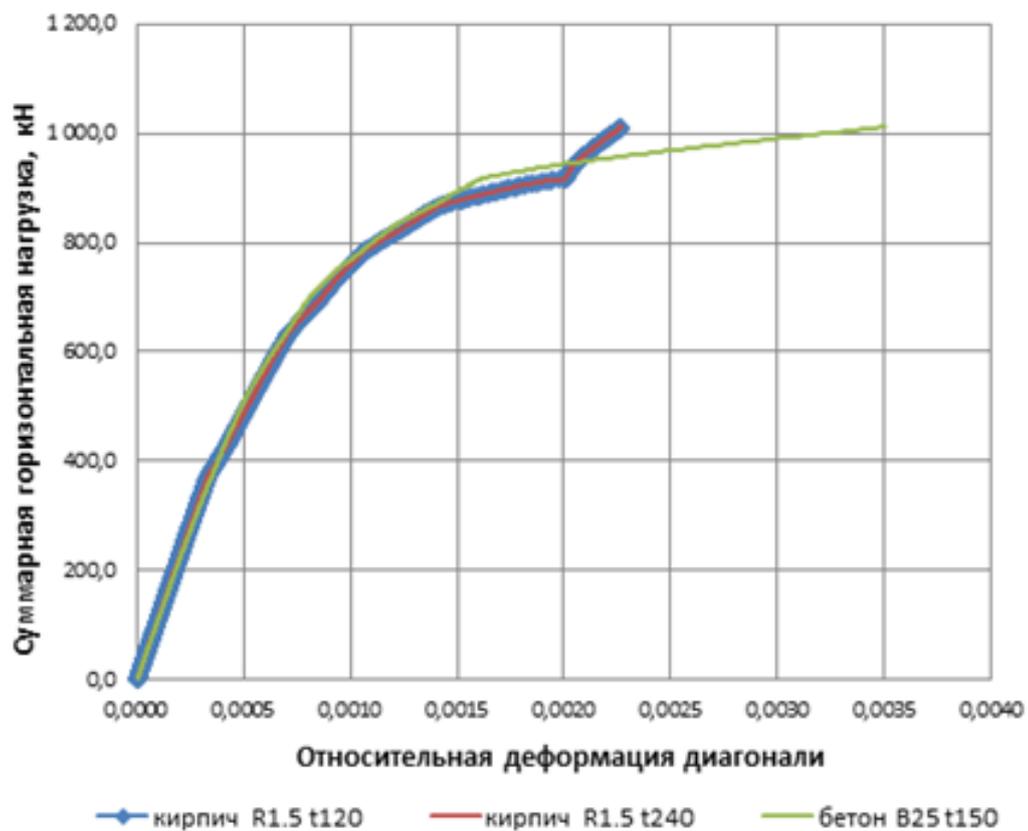


Рисунок 12 – Деформация диагонали слоев фрагмента стены от горизонтальной нагрузки на весь фрагмент, расчетные диаграммы (бетонный слой, кирпич)

При разнице относительных деформаций бетонного и кирпичного слоев, соответствующей предельной относительной деформации бетона, можно предположить расслоение конструкции.

Результаты, полученные с использованием предлагаемого метода хорошо коррелируют с результатами выполненных экспериментальных исследований (рисунок 13).

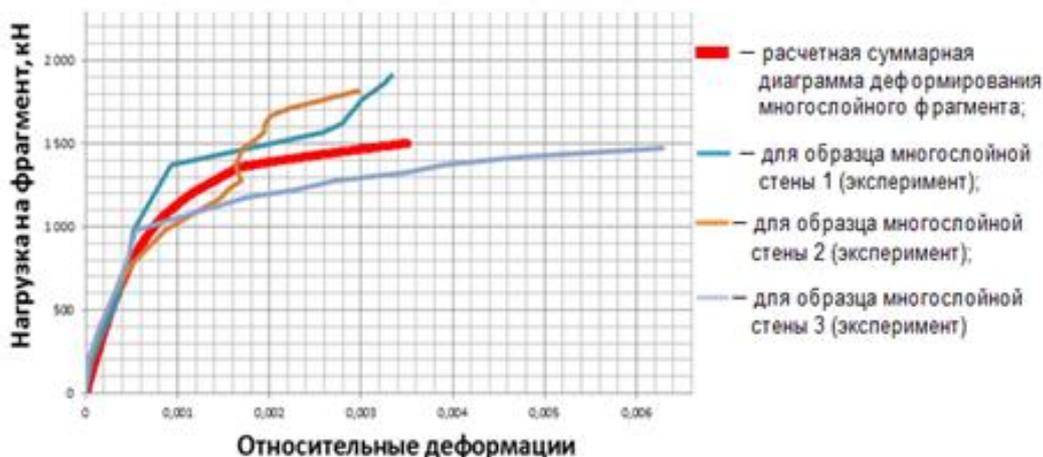


Рисунок 13 – Относительная деформация диагонали фрагмента стены от горизонтальной нагрузки

3. Характеристики предельных состояний каменно-монолитных конструкций сейсмостойких зданий; величины коэффициента допускаемых повреждений каменно-монолитных конструкций сейсмостойких зданий

Полученные расчетные диаграммы деформирования элемента позволяют перейти к расчету зданий с каменно-монолитными стенами с использованием пространственных моделей сооружений.

Расчет конструкций зданий на особое сочетание нагрузок с учетом сейсмических нагрузок ведется в соответствии с СП 14.13330. Расчеты проводятся на основе спектрального метода в статической упругой постановке, с использованием заданных нормативных сейсмических нагрузок. При проектировании значения коэффициента допускаемых повреждений K_1 принимаются по таблице 4 СП 14.13330, но для каменно-монолитных конструкций зданий значение этого коэффициента в нормах отсутствует.

В работах д-ра техн. наук Кабанцева О.В. предложено выражение вида:

$$K_1 = 1/(2\mu - 1), \quad (2)$$

позволяющее получить величину $K_1 = 0,125$, которая установлена нормами для существенно поврежденной, не подлежащей ремонту и восстановлению конструкции. Таким образом, предложенная Кабанцевым О.В. зависимость соответствует физически реализуемой упругопластической работе кирпичной кладки стены.

Анализ выполненных физических экспериментов показывает, что предельная величина относительных полных перемещений, после которых наступает необратимое разрушение, равна: $\varepsilon_{lim} = 0.75 - 0.85\varepsilon_{max}$. Необходимо подчеркнуть, что объем экспериментальных исследований на образцах из каменной кладки незначителен, и для определения статистически обоснованного среднего значения предельных деформаций дальнейшие физические эксперименты необходимо продолжить. С учетом указанных обстоятельств целесообразно для дальнейших работ принять консервативное предельное значение перемещений $\varepsilon_{lim} = 0.75\varepsilon_{max}$.

На основании предложений Н.Н. Попова и Б.С. Расторгуева, для анизотропных материалов коэффициент пластичности μ может быть выражен через отношение величин относительных деформаций, соответствующих полным упругопластическим деформациям (ε_{tot}), к упругим деформациям ε_{el} .

$$\mu = \varepsilon_{tot}/\varepsilon_{el}. \quad (3)$$

С учетом принятия ограничений на предельную величину относительных деформаций, обеспечивающих сохранность поврежденного материала (конструкции) предельная величина коэффициента пластичности для каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния будет равна:

$$\mu_{lim} = \frac{0.75\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{el}} = 0.75\mu_{max}. \quad (4)$$

Тогда

$$K_1 = 1/(2\mu_{lim} - 1). \quad (5)$$

Для определения значений K_1 предлагается три расчетных варианта. Расчетный вариант 1 предполагает начало работы конструкций в пластической стадии на уровне 0,6 от разрушающей нагрузки, расчетный вариант 2 предполагает начало работы конструкций в пластической стадии на уровне 0,8 от разрушающей нагрузки (рисунок 14). Расчетный вариант 3 не предполагает пластической работы конструкции, и упругие деформации соответствуют предельным. Такой подход соответствует трем уровням допустимой повреждаемости конструкций.

Как результат, применение такого подхода позволяет запроектировать конструкцию исходя из условий: обеспечения отсутствия повреждений (вариант 3), умеренных повреждений (вариант 2), значительных повреждений (вариант 1).

Относительная деформация ε_{el} соответствует деформациям при величине нагрузок 0,6-0,8 от максимальной, воспринимаемой фрагментом, ε_{tot} – полная предельная деформация слоистой конструкции, соответствующая предельному значению относительной деформации для бетона.

Выполненный анализ показывает, что достоверным деформационным критерием совместности работы слоев может являться разность относительных деформаций ε_d , равная предельной относительной деформации для слоя с наименьшим значением ε_{tot} . В соответствии с работами С.В. Полякова, О.В. Кабанцева, А.Г. Тяпина, показатель ε_d , с учетом предельной работы кирпичной кладки, следует принять равным 0,0015-0,0022, ε_d для кладочных слоев с учетом не повреждаемости составляет 0,0009-0,0011.

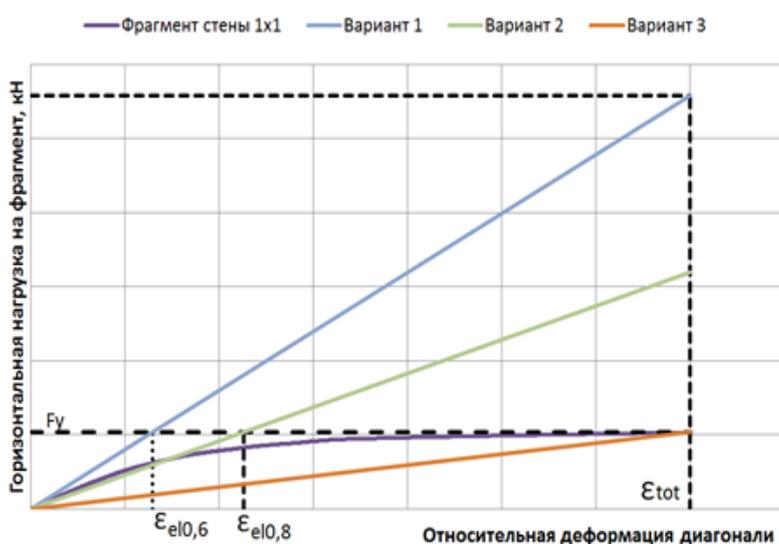


Рисунок 14 – Диаграмма деформирования элемента стены, моделирующего трехслойный фрагмент КМК стен и предлагаемый метод оценки K_1 в зависимости от условного материала приведенного слоя

Для расчетного варианта 3 результатом расчета будет являться состояние конструкций, не допускающее развития пластических деформаций.

Таким образом, жесткость для однородного моделирующего материала, соответственно, для случаев 1, 2, 3 составит: $E_1 I = \frac{Fy}{\varepsilon_{el1}}$; $E_2 I = \frac{Fy}{\varepsilon_{el2}}$; $E_3 I = \frac{Fy}{\varepsilon_{el3}}$, где I – момент инерции основания стены в плане.

В работе были получены значения K_1 для фрагмента многослойной стены со следующими характеристиками: наружный слой кладка $\delta=120$ мм, железобетон $\delta=150$

мм, кирпичная кладка $\delta=240$ мм, размер фрагмента 1x1 м, кладка наружных слоев принята из кирпича марки М75, раствор марки М100. Класс бетона внутреннего слоя В25.

Для расчетного варианта 1, значение K_1 составит:

$$\varepsilon_{el} = 0,000646; \varepsilon_{tot} = 0,0035; \mu_{lim} = \frac{0,75\varepsilon_{tot}}{\varepsilon_{el}} = 0,75\mu_{max} = 4,06; K_1 = 0,14.$$

Для расчетного случая 2 значение K_1 составит:

$$\varepsilon_{el} = 0,00113; \varepsilon_{tot} = 0,0035; \mu_{lim} = 2,323; K_1 = \frac{1}{2*2,323-1} = 0,27.$$

Оценивая полученные значения, можно сделать выводы о достаточно высоком уровне сходимости значений коэффициентов со значениями, определенными нормативным документом СП 14.13330.

Для использования в дальнейших расчетах необходимо назначить приведенную толщину слоя. При расчете коэффициента допускаемых повреждений и назначении модуля деформации приведенного материала по расчетным вариантам 1-3, приведенная толщина назначается в диапазоне 0,15 – 0,64 м.

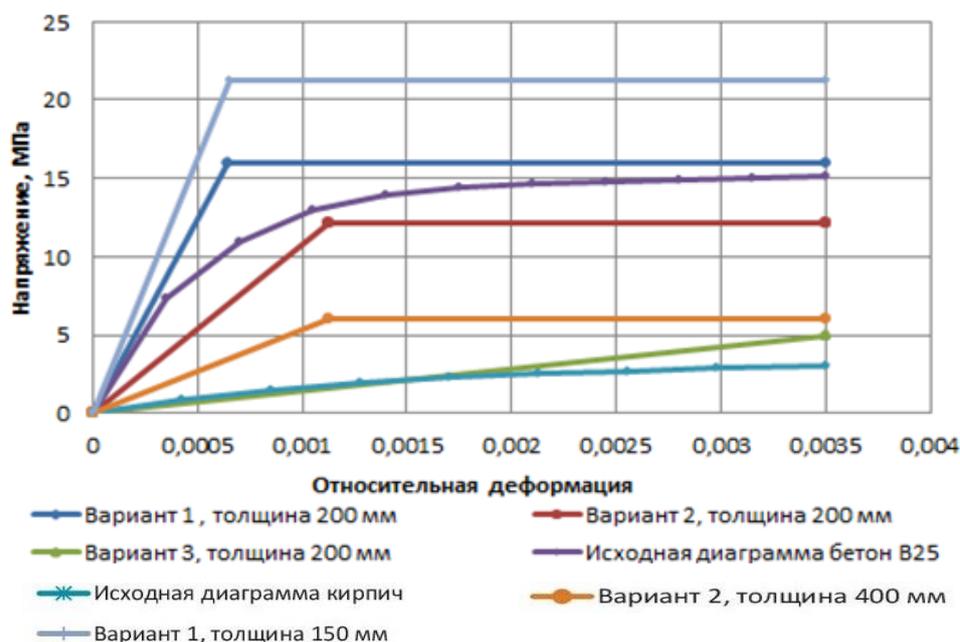


Рисунок 15 – Диаграмма деформирования элемента стены, моделирующего трехслойный фрагмент каменно-монолитной конструкции стен, для исходных материалов и расчетных вариантов 1 – 3

Вариант 1 предполагает наименьшее значение расчетных сейсмических нагрузок. Как следствие, для этого варианта характерны минимальные расчетные упругие деформации (в пределах $\varepsilon_{el} = 0,0007$). При этом параметры фонового

сейсмического воздействия для всех трех случаев будут идентичны. Рассчитанный по варианту 1 фрагмент стен получит при сейсмическом воздействии максимальные повреждения. Вариант 2 является промежуточным, а вариант 3 – максимально надежным. Нужно иметь в виду, что за счет комбинирования жесткости и коэффициента K_1 данный эффект нивелируется, и повреждения стен не будут кратны значениям предельных относительных деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Актуальность работы обусловлена целесообразностью повышения надежности сейсмостойких зданий с несущими многослойными каменно-монолитными конструкциями за счет научного обоснования критериев предельных состояний таких конструкций при различных механических характеристиках отдельных слоев с учетом их взаимовлияния и взаимодействия, основой для чего являются выполненные экспериментально-теоретические исследования.

2. По результатам экспериментальных исследований, параметрического и численного анализа многослойных каменно-монолитных конструкций установлено и обосновано:

- наличие эффекта взаимодействия и взаимовлияния слоев из каменной кладки на схему деформирования и несущую способность многослойной конструкции в целом;

- деформационные характеристики многослойных каменно-монолитных конструкций, включая упругую и пластическую фазы, а также значения прочности с учетом различных характеристик отдельных слоев;

- особый режим работы каменных слоев в составе каменно-монолитных конструкций, при котором отсутствует зависимость параметров напряженно-деформированного каменного слоя, включая трещинообразование, от ключевой характеристики каменной кладки сейсмостойких конструкций – величины адгезионной прочности взаимодействия кирпича и раствора, что определяется совместной работой каменных слоев и слоя из монолитного бетона (железобетона).

3. На основании результатов проведенных исследований сделан вывод о том, что при совместной работе бетонного и кирпичного слоя бетонный слой работает наиболее эффективно в паре с менее жестким кирпичным слоем, но воспринимаемая при этом нагрузка на 10–30% меньше, чем для стен с прочными кирпичными слоями.

Разработана и верифицирована математическая модель многослойной каменно-монолитной конструкции, учитывающая экспериментально установленные особенности как отдельных слоев, так и многослойной конструкции, в целом в условиях двухосного напряженного состояния.

4. Предложенный метод расчета каменно-монолитных стен позволяет находить корректные параметры «эквивалентных» многослойных конструкций слоев бетона. Кроме того, метод позволяет учесть повышенные резервы несущей способности бетонного слоя конструкции при работе совместно с материалами кладочных слоев с различными параметрами. При представленном в работе подходе к расчету многослойных стен график зависимости «горизонтальная нагрузка – деформация диагонали» имеет ступенчатую структуру. Это иллюстрирует перераспределение доли нагрузки на каждый слой в процессе расчета с использованием предложенного метода.

5. Выполненное сопоставление показало, что предлагаемый метод моделирования конструкций слоистых стен в целом более универсален, чем существующие на сегодня, и позволяет определять расчетное значение армирования стен автоматизированно, в программном варианте. Предлагаемый метод дает возможность расчета несущей способности стен из кладки низких марок и усиленных торкретбетоном каменных конструкций.

6. В работе выполнены численные исследования упругопластического деформирования и разрушения моделей-фрагментов многослойных каменно-монолитных стен в условиях двухосного напряженного состояния. Результаты численных исследований имеют в целом хорошую корреляцию с результатами физических экспериментов, выполненных автором. Корреляция наблюдается как по величине несущей способности, так и по схеме деформирования в условиях двухосного напряженного состояния.

7. В работе получены новые результаты, в соответствии с которыми установлены:

- характер процессов деформирования, включая упругую и пластическую фазы, и разрушения образцов;
- механизм формирования пластических деформаций, который определяется процессами взаимовлияния и взаимодействия отдельных слоев многослойной

конструкции вплоть до момента их разрушения;

- степень влияния на процесс упругопластического деформирования, включая величину пластической фазы, характеристик отдельных слоев и параметров их взаимодействия;

- обоснованные характеристики (коэффициенты) пластичности многослойных каменно-монолитных конструкций для условий двухосного напряженного состояния и связь параметров пластичности с характеристиками отдельных слоев;

- обоснованные характеристики предельных состояний (коэффициенты допускаемых повреждений K_I) для многослойных каменно-монолитных конструкций сейсмостойких зданий при различных механических характеристиках отдельных слоев. Полученные значения $K_I = 0,14$ для случая допущения значительных повреждений и $K_I = 0,27$ для умеренных повреждений при сейсмическом воздействии позволяют реализовать потенциал каменной кладки в многослойной стеновой системе и выполнять расчеты с использованием нормативных подходов спектральным методом.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Представляет практический интерес параметрический анализ значений сейсмических нагрузок с учетом различного конструктивного решения каменно-монолитных стен здания, в частности, при изучении особенностей поведения кладок из различных блоков, усиленных кладок, легких и поризованных бетонов как материала внутреннего слоя.

Список работ автора по теме диссертации из Перечня ВАК:

1. Бубис А.А. Верификация методики расчета фрагментов стен на сейсмическую нагрузку/ Бубис А.А. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 6. С. 21-27.

2. Бубис А.А. Математическое моделирование многослойных стен /Бубис А.А. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 6.С 27-33.

3. Бубис А.А. Динамические испытания фрагмента с применением конструктивного решения стен из газобетонных блоков /Бубис А.А., Петросян А.Е., Петряшев Н.О., Петряшев С.О., Поляков В.С.//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 2. С. 15-28.

4. Бубис А.А. Метод расчета многослойных каменно-монолитных стен с учетом работы всех слоев конструкции, в том числе, на сейсмическую нагрузку // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 1. С. 47-54.