

УТВЕРЖДАЮ:

и.о. ректора ВолгГТУ

д.х.н., профессор

член-корреспондент РАН

Навроцкий Александр Валентинович

«01» декабря 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» на диссертацию Поздеева Максима Леонидовича «Расчет стен из неармированных каменных кладок при плоском напряженном состоянии с учетом физической нелинейности и анизотропии», представленную в диссертационный совет 24.2.310.04, созданный на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

1. Актуальность темы исследования

Актуальность работы связана с появлением в строительстве новых кладочных материалов, связующих и систем армирования, что увеличивает вариативность прочностных и деформационных свойств каменных кладок и проявляется в выраженной физической нелинейности и анизотропии. Это приводит к необходимости совершенствования расчётов конструкций, особенно для неармированных стен, которые воспринимают совместно вертикальные и горизонтальные нагрузки, а также для комбинированных заполнений в жёстких каркасах. Новые материалы обладают повышенными прочностными характеристиками, что позволяет уменьшать толщину стен, но приводит к сложным напряженным состояниям, несопоставимым с одноосными моделями. Поэтому расчёты нужно вести на базе теорий, учитывающих такие состояния. В настоящей работе используется деформационная теория пластичности, однако применительно к каменной кладке существующие модели недостаточно описывают дилатацию и пост-пиковое поведение, а также анизотропию прочности, что требует разработки новых критериев прочности, подтвержденных современными экспериментальными исследованиями.

прочности, что требует разработки новых критериев прочности, подтвержденных современными экспериментальными исследованиями.

Таким образом, разработка моделей деформирования неармированной каменной кладки для расчета стен с учетом физической нелинейности и анизотропии прочности на основе деформационной теории пластичности является несомненно актуальной задачей.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и 3-х приложений, содержит 117 страниц машинописного текста, 41 рисунок и 13 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, изложены цели и задачи, описана научная новизна и практическая значимость, степень достоверности, приведены сведения об апробации работы и публикации ее результатов, изложены рекомендации по их использованию, приведены структура и объем работы.

В первой главе выполнен анализ нормативных документов, теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых особенностям работы каменных стен под статической нагрузкой: физической нелинейности, анизотропии прочности и постпикового разупрочнения, дилатации, а также зависимости механизмов разрушения от соотношения сторон и уровня предварительного обжатия. Проведён подробный аналитический обзор известных деформационных теорий пластичности каменной кладки и бетона (Г.А. Тюпин, Г.А. Гениев, В.М. Круглов, А.А. Ильюшин, С.Ю. Фиалко), выявивший недостаточную проработанность моделей каменной кладки по сравнению с моделями бетона. На основании этого сформулированы основная цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлена разработанная автором деформационная модель пластичности каменной кладки при плоском напряженном состоянии с учетом анизотропии.

Рассмотрены механизмы разрушения каменных стен при плоском напряженном состоянии. Сделан вывод о необходимости перехода от описания предельного состояния на уровне всей конструкции к описанию локальной прочности репрезентативного фрагмента кладки. Такой переход обеспечивает адекватный учёт механизмов повреждения, что необходимо для корректного построения физически нелинейных моделей.

Сформулирован объединенный критерий прочности неармированных каменных кладок, учитывающий анизотропию и включающий четыре основных механизма

наступления предельного состояния. Выбор конкретного механизма определяется видом напряжённого состояния и углом α между главными напряжениями и осями ортотропии кладки:

С-критерий (двухосное сжатие, без учёта сдвига). Для аппроксимации использована квадратичная модель типа Цая–Хилла.

Т-критерий (двухосное растяжение, без учёта сдвига). Для этого критерия принята квадратичная аппроксимация по типу Норриса–Маккиннона.

St-критерий связан с действием главных напряжений разных знаков и не зависит от угла α . Данный критерий соответствует критерию Кулона–Мора

Sc-критерий, связан с действием касательных напряжений на площадке, параллельной горизонтальным швам кладки, является модификацией критерия Манна–Мюллера и параметризуется через одноосный предел прочности на растяжение и предел прочности при сжатии под углом 45° к горизонтальным швам кладки или предел прочности на диагональное раскалывание, связанный с действием главных растягивающих напряжений.

Достоверность предложенного критерия прочности подтверждена с 95% доверительной вероятностью на основе экспериментальных данных других авторов.

Предложена кривая деформирования каменной кладки при одноосном сжатии, зависящая от начального модуля деформации E_0 , предела прочности σ_c , предельной относительной деформации ε_c , энергии разрушения кладки G_c . Наличие ниспадающего участка кривой «напряжение–деформация» позволяет моделировать перераспределение напряжений внутри несущей конструкции при появлении и развитии трещин.

В третьей главе рассмотрены основные разрешающие уравнения метода конечных элементов и методы решения нелинейных задач теории пластичности. Для численного расчета каменных кладок при плоском напряженном состоянии принят шагово-итерационный метод с процедурой переменных параметров упругости. Определяющие соотношения построены в деформациях, что позволяет проводить расчеты, используя полную кривую деформирования с ниспадающей ветвью.

Составлены алгоритмы расчета и написана компьютерная программа на языке Python, реализующая модель на базе метода конечных элементов для расчета стен. Программа написана согласно современным подходам объектно-ориентированного программирования. Приведена блок-схема шагово-итерационного алгоритма метода переменных параметров упругости при простом нагружении, а также его модификация на приращениях для решения задач при сложном нагружении.

Для анализа чувствительности разработанной модели выбран метод Морриса для ранжирования влияния параметров и оценки их нелинейного взаимодействия. В качестве выходных скалярных величин использованы максимальная горизонтальная сила и ее работа на горизонтальном смещении верха стены.

В четвертой главе выполнена валидация разработанной модели путем сравнения численных данных с результатами известных экспериментальных исследований А. Т. Vermeltfoort, С. F. P. Naninck, Т. М. J. Raijmakers неармированных кирпичных стен при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил. Результаты сопоставлены также и с известными моделями других авторов. Показано хорошее соответствие модели как численным, так и экспериментальным данным.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается корректной постановкой задачи, использованием базовых положений теории упругости и пластичности, основанных на принципах механики деформируемого твердого тела с элементами механики разрушения, применением современных сертифицированных программ. Численные расчёты валидировались на основе известных экспериментальных и теоретических данных других авторов.

4. Научная новизна работы

- Разработан инвариантный критерий прочности кладки с учётом анизотропии при плоском напряжённом состоянии, применимый для физически-нелинейных деформационных моделей. Для определения параметров критерия достаточно минимального набора из пяти стандартных одноосных испытаний (сжатие и растяжение вдоль/поперёк швов и сжатие под 45°), что облегчает практическую калибровку.
- Создана деформационная модель пластичности для неармированной кладки с учётом дилатации и разупрочнения при трещинообразовании.
- Разработаны алгоритмы на базе МКЭ и метода переменных параметров упругости и реализованы в виде программы на Python; численно воспроизведены схемы трещинообразования, механизмы разрушения и полные диаграммы деформирования, согласующиеся с экспериментами и моделями других авторов. Проведён дисперсионный анализ чувствительности модели.

5. Практическая ценность диссертации

Практическая значимость подтверждается реализацией модели в виде алгоритмов и программы на языке Python, а также ее внедрением в виде плагинов для существующих программных комплексов. Работа вносит вклад в преодоление разрыва между сложными, но трудоемкими микромоделями каменной кладки, и упрощенными стержневыми моделями, доминирующими в нормативных документах по проектированию каменных конструкций.

Таким образом, результаты диссертации расширяют инструментарий исследователей и проектировщиков для анализа и проектирования современных каменных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния.

6. Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки

Представленная диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы, связанной с совершенствованием методов расчета неармированных каменных конструкций. Полученные результаты характеризуются значимостью для строительной механики и практики проектирования.

Предложен инвариантный ортотропный критерий прочности каменной кладки при плоском напряженном состоянии. Минимальный набор требуемых экспериментальных параметров (пять стандартных испытаний) делает модель практичной и применимой для широкого класса каменных материалов. Формулировка критерия в виде кусочно-заданной функции, основанной на четырех физически обоснованных механизмах разрушения, позволяет адекватно учитывать анизотропию прочности и ее зависимость от ориентации главных напряжений.

Разработана физически нелинейная модель деформирования каменной кладки на основе деформационной теории пластичности, которая комплексно учитывает анизотропию прочности, дилатационные эффекты и пост-пиковое разупрочнение. Предложено развитие подходов, известных для моделей бетона, применительно к каменной кладке с введением зависимости параметров пластичности и энергии разрушения от вида напряженного состояния и ориентации главных напряжений.

Разработаны и реализованы в виде программы на Python шагово-итерационные алгоритмы расчета на основе МКЭ и метода переменных параметров упругости. Проведенная всесторонняя валидация модели на известных экспериментальных данных и сравнение с результатами других авторов подтверждают ее адекватность и точность. Модель корректно воспроизводит картину трещинообразования и полные диаграммы «нагрузка-перемещение» для стен различной геометрии и при разных уровнях обжатия.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Разработанные алгоритмы и программа могут быть использованы для уточненного нелинейного анализа каменных стен, воспринимающих совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок, особенно при нестандартных схемах нагружения или при необходимости оценки реальной работы конструкций.

Предложенный критерий прочности, основанный на стандартизированных испытаниях, может быть рассмотрен для возможного использования при совершенствовании нормативных документов по проектированию каменных конструкций для более точного учета анизотропии прочности кладки при плоском напряженном состоянии.

Материалы диссертации и разработанное программное обеспечение могут быть использованы в учебных курсах для студентов строительных специальностей для углубленного изучения механики каменных конструкций и методов их численного моделирования.

Для успешной реализации этого потенциала рекомендуется подготовить методические рекомендации для инженеров-проектировщиков по применению разработанной модели, включая руководство по калибровке параметров модели на основе натурных данных, а также продолжить валидацию модели на более широком круге экспериментальных данных, включая конструкции с различными типами кладки и различными конфигурациями стен.

8. Публикации

По материалам диссертации всего опубликовано 19 работ, из них 2 – в изданиях ВАК РФ по специальности 2.1.9, 1 – в изданиях Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 3 – в изданиях ВАК РФ по смежной специальности 2.1.1 и 10 – в других изданиях.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

9. Вопросы и замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокий уровень проведенного исследования, у ведущей организации возникли следующие вопросы и замечания:

1. Модель в представленном виде не учитывает продольный изгиб из плоскости стены. Какие теоретические и практические сложности расширения модели для учета этих факторов?

2. Для согласования с экспериментом потребовалось завышение пределов прочности сцепления, полученных на малых образцах. Существует ли количественная

зависимость или методика для определения таких поправочных коэффициентов для различных типов кладки, или эта процедура остается эмпирической?

3. Анализ чувствительности выявил наибольшее влияние на отклик модели прочностных характеристик на растяжение и сдвиг, которые, как известно, имеют наибольший разброс. При этом в работе для анализа принята гипотеза о независимости параметров и равном коэффициенте вариации. В чем заключается сложность в установлении реальных коэффициентов вариации для различных прочностных характеристик кладки?

4. В тексте используется термин «аппроксимационная поверхность», корректнее применять термин «аппроксимирующая поверхность». Также в диссертации встречаются наименования «секущая матрица жесткости» и «секущая материальная матрица жесткости», которые не являются общепринятыми в научной литературе. Более корректно использовать формулировку «матрица жёсткости с секущими модулями», как это сделано в тексте автореферата.

5. Качество подготовки текстового материала находится на высоком уровне, однако были замечены незначительные опечатки и стилистические недочёты: на стр. 58-60 ссылка на рисунок 14 содержит лишний текст подрисуночной подписи; в формулах 2, 3, 9, 10, 13, 22, 25, 29, 42, 81, 82 после выражений следует применять точку, а не запятую.

Вышеизложенные вопросы и замечания не снижают научную и практическую значимость представленной диссертационной работы и ее общую положительную оценку.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Поздеева Максима Леонидовича является самостоятельным, законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная научная задача, имеющая важное теоретическое и практическое значение для строительной науки и индустрии.

Научные и практические результаты диссертационного исследования представлены в публикациях в журналах перечня ВАК Минобрнауки России, доложены на российских и международных научных конференциях и форумах.

Полученные результаты характеризуются научной новизной и достоверностью. Выводы и положения, выносимые на защиту, обоснованы и логически вытекают из содержания работы.

Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 4 Паспорта научной специальности 2.1.9. Строительная механика: п. 2. Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их

расчета; п. 4. Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях.

Диссертация соответствует критериям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении научных степеней (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. в редакции от 16.10.2024 г.) к кандидатским диссертациям, а ее автор, Поздеев Максим Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на заседании кафедры "Строительные конструкции, основания и надёжность сооружений" (СКОиНС) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» «_28_» _ноября_ 2025_ года. Протокол заседания № _3_ от 28.11 2025г. Присутствовало на заседании 16 человек. В голосовании приняло участие 16 человек, за - 16, против - нет, воздержались - нет.

Составитель отзыва:

Профессор кафедры
строительных конструкций, оснований и
надежности сооружений, доктор технических
наук, профессор, советник РААСН

Пшеничкина Валерия
Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, +7 (8442) 24-81-15, rector@vstu.ru, <https://www.vstu.ru>

