

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Литвинова Степана Викторовича

на диссертационную работу Поздеева Максима Леонидовича по теме: «Расчет стен из неармированных каменных кладок при плоском напряженном состоянии с учетом физической нелинейности и анизотропии», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационное исследование М. Л. Поздеева посвящено решению *актуальной* задачи строительной отрасли, развитие которой фактически прервалось не на одно десятилетие, — созданию усовершенствованной методики расчёта неармированных каменных стен с учётом двух ключевых факторов: физической нелинейности материала и его анизотропии прочности. Конструкции в проведённых исследованиях работают в условиях плоского напряжённого состояния (далее — ПНС).

Появление новых строительных материалов (высокопрочных кирпичей, керамических блоков, современных связующих растворов) приводит как к положительным моментам, так и к созданию новых проблем. С одной стороны, создание материалов с прочностными и деформационными свойствами, существенно превосходящими традиционные материалы, позволяет снижать габариты стен, что приводит к снижению нагрузок на несущие элементы конструкций. С другой, возникающее в них напряжённое состояние приобретает характер наиболее отличающийся от одноосного сжатия, что требует ужесточение требований к точности расчётов и используемых для этого методик. При этом существующие методики в подавляющем своём большинстве основаны на упрощённых стержневых моделях и эмпирических методиках, базирующиеся на гипотезе плоских сечений, и были разработаны в середине прошлого столетия. Следовательно, требуется развитие и создание нового подхода к моделированию вышеописанных элементов строительных конструкций, адекватно описывающего реальную работу тонкостенных каменных конструкций в условиях двухосного нагружения и возникающего ПНС.

Автором диссертации справедливо указан значительный разрыв между устоявшейся практикой проектирования и требованиями действующих нормативных документов. В России, как и во многих других странах, нормативные методики (например, СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции») в значительной степени опираются на простые случаи нагружения стен, но не способны адекватно описать перераспределение напряжений в стенах сложной геометрии (имеющие проемы), в нерегулярных конструкциях, а также в комбинированных системах, где каменное заполнение работает в составе железобетонного или стального каркаса. Инженеры-практики активно используют мощные программные комплексы (такие как SCAD++, ЛИРА-САПР), позволяющие строить пространственные конечно-элементные модели. Однако для кор-

ректного использования этих инструментов при расчёте каменных конструкций необходимы адекватные физически нелинейные модели материала, которых остро не хватает. Существующие в программных комплексах модели для бетона не в полной мере применимы к каменной кладке из-за игнорирования её специфической анизотропии. Таким образом, *актуальность* работы лежит в плоскости устранения этого методологического разрыва путем создания модели, пригодной для реализации в современных расчётных системах, основанных на методе конечных элементов, и соответствующей уровню развития вычислительной техники.

С научной точки зрения, каменная кладка является композитным материалом, обладающим выраженной физической нелинейностью, разносопротивляемостью в условиях растяжения и сжатия, и анизотропией, обусловленной наличием регулярных растворных швов. Актуальные модели деформационной теории пластичности для бетона (модели С. Ю. Фиалко, С. А. Гениева и др.) не способны учесть анизотропную природу кладки. Модель Г. А. Тюпина, хоть и создана специально для расчёта кладки, обладает рядом ограничений, в частности, не учитывает дилатационные эффекты (изменение объёма при пластическом деформировании) и пост-пиковое поведение (разупрочнение). Проведённый диссертантом анализ существующих подходов выявил, что они либо используют сложные модели анизотропии, но не учитывают физическую нелинейность, либо развивают физически нелинейные модели, но на базе упрощённых критериев прочности.

Разработанные алгоритмы и критерии могут быть применены не только для расчёта стен, но и для анализа других элементов, работающих в условиях НДС: перегородок на упругом основании, несущего каменного заполнения каркасов, подверженных перекоосу, а в перспективе — для расчёта каменных сводов и арок. Учёт физической нелинейности и возможности трещинообразования напрямую связан с задачами сейсмостойкости, где способность конструкции к рассеянию энергии (демпфированию) является критически важной. Таким образом, работа вносит вклад в развитие более общих разделов механики деформируемого твердого тела и сейсмологии строительных конструкций.

Резюмируя вышесказанное, работа М. Л. Поздеева направлена на заполнение существующего вакуума между современными возможностями численного моделирования и адекватными математическими моделями материала, что делает её несомненно *актуальной* как с теоретической, так и с сугубо практической точки зрения. Разработка модели, позволяющей корректно прогнозировать НДС и предельное состояние каменных стен с учетом их реальной работы, является своевременной и востребованной научно-технической задачей.

Общая характеристика, структура и завершённость диссертационной работы

Диссертационная работа М. Л. Поздеева состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и четырёх приложений. Работа изложена на 139 страницах (на 117 страницах изложен основной текст и

приложения на 22 страницах), содержит 41 рисунок и 13 таблиц. Список использованной литературы включает 115 источника. Содержание работы полностью соответствует заявленной научной специальности 2.1.9. Строительная механика.

Во введении автором формулируется каркас всего исследования. В нем детально обосновывается актуальность темы, проводится анализ степени разработанности темы, показывающий, что существующие модели либо учитывают анизотропию без нелинейности, либо нелинейность без сложной анизотропии. Четко формулируются цель работы — разработка модели деформирования неармированной кладки для ПНС с учётом физической нелинейности и анизотропии на основе деформационной теории пластичности. Приводятся пять конкретных задач для её достижения. Определяются объект и предмет исследования, формулируется научная гипотеза. Также в разделе представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, апробация, внедрение и соответствие паспорту специальности.

В первой главе автор представляет комплексный аналитический обзор, формирующий теоретический и практический фундамент исследования. Начинается глава с обоснования актуальности каменных конструкций в современном строительстве, несмотря на общее снижение их доли, выделяя такие ниши, как реконструкция исторических зданий, перегородки и заполнение каркасов. Проводится детальный анализ особенностей работы каменных стен под статической нагрузкой. Особое внимание уделяется критическому разрыву между традиционными нормативными методами расчета (основанными на стержневых аналогах) и современной инженерной практикой, использующей пространственные МКЭ-модели.

Вторая глава является теоретическим ядром работы, где представлены оригинальные разработки автора. Глава начинается с анализа механизмов разрушения стен при ПНС, показывая, как тип разрушения (сдвиг, растяжение, сжатие) зависит от соотношения вертикальных и горизонтальных нагрузок и геометрии стены. Это обосновывает необходимость перехода от упрощённых стержневых моделей к локальным критериям прочности. Основным научным вкладом главы становится *разработанный автором критерий прочности*. Это не просто ещё одна аппроксимация, а комплексная кусочно-заданная функция, объединяющая четыре физических механизма разрушения: сжатие (С-критерий), растяжение (Т-критерий) и два механизма сдвига: (St) связан с действием главных напряжений разных знаков и не зависит от угла α , аналогичен критерию Кулона-Мора; второй критерий прочности (Sc) связан с действием касательных напряжений на площадке, параллельной горизонтальным швам кладки и является модификацией критерия Манна-Мюллера. Автор анализирует различные типы функций (логарифмические, алгебраические, кривые Безье) и предлагает собственную кусочно-гладкую функцию, которая независимо задаёт четыре ключевых параметра: начальный модуль упругости, предел прочности, предельную деформацию и энергию разрушения. На этой основе строится полная деформационная модель, которая синтезирует лучшие черты моделей

Г. А. Гениева, В. М. Круглова и С. Ф. Клованича, учитывая дилатацию. Важной новацией является введение гипотез о зависимости предельного параметра пластичности и энергии разрушения от вида напряжённого состояния через аффинное преобразование функции разработанного критерия прочности.

Третья глава посвящена практической реализации теоретической модели в виде численных методов и программного обеспечения. В начале главы выводятся разрешающие уравнения МКЭ для ПНС в форме метода перемещений. Подробно описываются изопараметрические конечные элементы (четырёхугольные и треугольные), функции формы, матрица градиентов и процедура численного интегрирования по Гауссу. Для деформационной теории обоснованно выбран шагово-итерационный метод переменных параметров упругости. Основной вклад главы — разработанная автором процедура нелинейного расчёта для сложного нагружения. В её основе лежит контроль достижения мгновенных поверхностей нагружения, введенный отдельно для сдвиговой и объёмной деформаций. Это позволяет на каждом шаге определять режим деформирования (активное нагружение, нейтральное, разгрузка) и вычислять обобщённые тангенциальные модули для матрицы жёсткости, что значительно расширяет применимость деформационной теории за рамки гипотезы простого нагружения. Приводится подробное описание реализованной на языке Python программы.

Четвертая глава представляет собой всестороннюю экспериментальную проверку разработанной модели. Валидация проводится на данных натуральных испытаний кирпичных стен, проведенных в Техническом университете Эйндровена, которые являются международным эталоном. Подробно описаны характеристики материалов (два типа кирпича, раствор) и геометрия образцов: сплошные стены и стены с проемом. Особое внимание уделено корректному построению расчётной модели, адекватно отражающей условия эксперимента. Завершающим этапом является дисперсионный анализ чувствительности методом Морриса. Результаты показали, что наибольшее влияние на отклик модели оказывают прочность на сдвиг и нормальное сцепление, а наименьшее — параметр дилатации. Этот вывод имеет важное практическое значение, указывая на приоритетность точного экспериментального определения прочностных характеристик на растяжение и сдвиг.

В заключении суммируются основные результаты и выводы, полученные в работе, в виде семи пронумерованных пунктов, которые полностью соответствуют поставленным задачам и положениям, выносимым на защиту, а также отражены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, отличаются высокой степенью обоснованности, которая достигается за счёт комплексного использования фундаментального теоретического аппа-

рата, строгих математических методов, современных численных алгоритмов и всесторонней экспериментальной валидации.

Теоретическая и методологическая обоснованность. Исследование опирается на прочный фундамент механики деформируемого твёрдого тела. В качестве базовой парадигмы выбрана деформационная теория пластичности (теория малых упругопластических деформаций) А. А. Ильюшина. Этот выбор не случаен и глубоко обоснован в работе. В отличие от теории течения, требующей интегрирования инкрементальных соотношений и чувствительной к виду критерия прочности, деформационная теория для случая простого или сходящегося к простому нагружения позволяет использовать более сложные, кусочно-заданные критерии прочности с недифференцируемыми точками. Это является ключевым преимуществом при моделировании анизотропных хрупких материалов, каким является каменная кладка.

Модель деформирования также строится на синтезе лучших достижений предшественников. Автор комбинирует подходы моделей Г. А. Гениева (учёт нелинейности девиаторной и шаровой составляющих), В. М. Круглова (введение двух параметров пластичности) и С. Ф. Клованича (учёт дилатации). При этом модель расширена для учёта анизотропии прочности, а вид кривых деформирования и предельный параметр пластичности поставлены в зависимость от инвариантов напряжённого состояния и угла ориентации, что является логичным и обоснованным развитием существующих теорий.

Экспериментальная и сравнительная валидация. Наиболее сильной стороной обоснованности выводов работы является её всесторонняя валидация. Автор использует в качестве эталона классические и широко признанные в мировом научном сообществе экспериментальные данные Пейджа (A.W. Page) для валидации критерия прочности и данные А. Т. Vermeltoort, С. F. P. Naninck, Т. М. J. Raijmakers для валидации полной модели стен.

Обоснованность рекомендаций. Практические рекомендации, сформулированные в работе, напрямую вытекают из результатов исследования. Вывод о необходимости завышения пределов прочности сцепления, полученных на малых образцах, при расчёте полномасштабных конструкций, основан на результатах калибровки и согласуется с выводами других авторов (Г. А. Гениева). Рекомендация по стандартизации испытаний на диагональное раскалывание обусловлена результатами дисперсионного анализа, показавшего высокую чувствительность модели к прочности на сдвиг и большому коэффициенту вариации этой характеристики.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна. Новизна работы носит комплексный характер и зафиксирована в положениях, выносимых на защиту:

1. *Новый критерий прочности* — разработан новый ортотропный критерий прочности для каменной кладки при ПНС. Его новизна заключается не только в учёте анизотропии, но и в его инвариантной форме, адаптированной

для использования в деформационных моделях пластичности. Критерий является кусочно-заданным и объединяет четыре физических механизма разрушения, что позволяет более гибко и точно аппроксимировать экспериментальные данные по сравнению с единым полиномиальным критерием. Важной новацией является параметризация критерия на основе минимального набора из пяти стандартных испытаний, что делает его практичным для инженерного применения. Достоверность критерия подтверждена валидацией на всеобъемлющих данных Пейджа.

2. *Новая модель деформирования* — разработана новая деформационная модель пластичности для неармированной каменной кладки. Ее новизна заключается в комбинации известных соотношений для бетона с авторским критерием прочности и введенными гипотезами. В отличие от модели Г. А. Тюпина, здесь учтены дилатационные эффекты. В отличие от моделей для бетона, модель учитывает анизотропию прочности. Ключевой новизной является введение функциональных зависимостей предельного параметра пластичности и удельной энергии разрушения от инвариантов напряженного состояния и угла анизотропии через аффинное преобразование функции критерия прочности.

3. *Новые алгоритмы и программная реализация* — разработаны и реализованы в виде программы на языке Python оригинальные шагово-итерационные алгоритмы физически нелинейного расчёта, основанные на методе переменных параметров упругости с учётом сложного нагружения. Новизна алгоритма заключается в определении режима нагружения (активное, нейтральное, разгрузка) отдельно для сдвиговой и объёмной деформаций на основе положения мгновенных поверхностей нагружения, заданных в пространстве деформаций. Достоверность алгоритмов подтверждена их устойчивой сходимостью и успешной валидацией на сложных тестовых примерах.

Достоверность результатов. подтверждается получением теоретических результатов строгими математическими методами. Результаты работы основаны на фундаментальных законах теории упругости и пластичности, базирующихся на принципах механики деформируемого твёрдого тела с элементами механики разрушения в рамках гипотезы размазанных трещин. Численные расчёты валидированы на известных экспериментальных данных, напряжённо-деформированное состояние сравнивалось с аналогичным, полученным в других программных комплексах и на основе моделей других авторов.

Верификация программного обеспечения: регистрация программ в РОСПАТЕНТе (свидетельства № 2021618016, № 2024613626) и их внедрение в коммерческий пакет «СКАД СОФТ» косвенно подтверждает работоспособность и достоверность реализованных алгоритмов.

Заключение по новизне и достоверности. В диссертации предложен целый ряд новых научных решений: критерий прочности, модель деформирования, алгоритмы расчёта и результаты анализа чувствительности. Все они обладают признаками новизны и прошли комплексную проверку на достоверность, основанную на теоретической корректности, численной устойчивости и экспе-

риментальном подтверждении. Полученные результаты можно считать надёжным вкладом в науку.

Достоинства работы

1. *Комплексность и системный подход.* Исследование охватывает полный цикл: от анализа проблемы и критического обзора существующих методов через разработку собственной теоретической модели и критерия, создание алгоритмов и программной реализации до всесторонней валидации и анализа чувствительности. Работа представляет собой законченную научную разработку.

2. *Высокая практическая значимость.* Результаты работы не остаются сугубо теоретическими. Разработан критерий, основанный на стандартных испытаниях; создана программа на доступном языке Python; результаты внедрены в коммерческий программный комплекс SCAD++; даны конкретные рекомендации для нормирования и экспериментальной практики.

3. *Фундаментальность и обоснованность.* Глубина теоретической проработки, опора на классические теории и тщательная валидация на авторитетных экспериментальных данных придают работе солидность и высокую степень надежности. Использование гипотезы размазанных трещин для устранения сеточной чувствительности является признаком владения современным аппаратом механики разрушения.

Замечания по диссертационной работе

1. *Ограничение областью ПНС.* Модель не распространяется на объёмное напряженное состояние, что ограничивает её применение для анализа, например, массивных фундаментов или угловых зон, где может возникать трёхосное сжатие. В работе это ограничение чётко оговорено, но оно остаётся областью для будущего развития.

2. *Упрощённый учёт разгрузки.* В работе принята упругая разгрузка по секущей жёсткости, что соответствует упруго-хрупкому механизму. Для моделирования циклических нагрузок (например, сейсмических) этого может быть недостаточно. Более сложные модели, подобные модели С. Ю. Фиалко, учитывают остаточные деформации при разгрузке.

3. *Потенциальная сложность калибровки.* Модель требует 11 входных параметров. Хотя автор показывает, что минимального набора из 5 испытаний достаточно для критерия прочности, полная калибровка модели (включая энергии разрушения и параметр дилатации) может оказаться нетривиальной задачей на практике и требует дополнительных экспериментальных данных, которые не всегда доступны в проектных организациях.

4. *Недостаточное исследование влияния анизотропии деформационных характеристик.* В работе справедливо принято допущение об изотропии упругих характеристик (модуль упругости и коэффициент Пуассона), которое для многих видов кладки является допустимым, что отмечено ссылкой на соответствующее исследование. Однако новизна работы заявлена именно в учёте анизотропии, и при этом учёт осуществляется только для прочностных свойств

(критерий прочности) и параметров пластичности. Для материалов с выраженной анизотропией деформационных свойств (например, кладка из слабых камней на жестком растворе или кладка с несплошными вертикальными швами) начальный модуль деформации и коэффициент Пуассона также могут существенно зависеть от направления нагружения. В диссертации не проводится анализа того, насколько чувствительны результаты расчёта стен к возможной анизотропии упругих постоянных. Не представлено сравнения результатов модели в изотропной и ортотропной постановке для упругой стадии, чтобы количественно оценить значимость данного фактора. Таким образом, модель не является полностью ортотропной, а учитывает анизотропию лишь на этапе нелинейного деформирования и разрушения, что может быть ограничением для широкого класса анизотропных кладок.

5. *Ограниченная валидация моделей стен с проёмами и отсутствие валидации для других типов анизотропии.* Валидация для стен с проёмами проведена лишь для одного уровня предварительного обжатия (30 кН) и после дополнительной калибровки удельной энергии разрушения. При этом не показано, позволяют ли параметры, откалиброванные по сплошным стенам, адекватно предсказать поведение стен с проёмами без дополнительной подстройки. Это может указывать на то, что модель требует разных наборов параметров для разных конструктивных схем, что снижает её прогностическую способность. Кроме того, вся валидация проведена на материале с одним типом анизотропии, характерным для кладки с горизонтальными растворными швами. Отсутствует проверка адекватности модели для кладок с иной структурой анизотропии, например, с усиленными вертикальными швами или для бутовой кладки со слабой, но иной анизотропией, хотя в области применения такие конструкции упомянуты. Это оставляет открытым вопрос об универсальности предложенного критерия прочности и модели деформирования для всего заявленного класса материалов.

Необходимо отметить, что указанные замечания несколько не снижают высокого уровня диссертации, а носят рекомендательный характер, поскольку учёт всех этих замечаний соответствует уровню диссертации на соискание учёной степени доктора наук.

Заключение по диссертационной работе

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.1.9. Строительная механика: п. 2. «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчёта»; 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 по теме: «Расчет стен из неармированных каменных кладок при плоском напряженном состоянии с учетом физической нелинейности и анизотропии» соответствует критериям, предъявляемым ВАК Минобрнауки Рос-

сии, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. в редакции от 16.10.2024 г.) к кандидатским диссертациям, а её автор, Поздеев Максим Леонидович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Даю согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационное дело соискателя, а также на размещение отзыва в информационно телекоммуникационной сети «Интернет» на сайте Казанского государственного энергетического университета.

Доктор технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика, доцент, профессор кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты», профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений» ДГТУ

Степан
Викторович
ЛИТВИНОВ

24 ноября 2025 года

Подпись руки д-ра техн. наук,
доц. С. В. Литвинова удостоверяю,
учёный секретарь учёного совета ДГТУ



Владимир
Николаевич
АНИСИМОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), 344003, ЮФО, Ростовская область, г.Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел.: +7 (863) 273-85-25; e-mail: reception@donstu.ru

Кафедра «Инженерная геология, основания и фундаменты». Адрес: 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162/32. Кампус 25, этаж 1, ауд. 25-126; тел.: +7 (863) 201-90-26; e-mail: spu-52.7@donstu.ru

Кафедра «Строительная механика и теория сооружений». Адрес: 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162/32. Кампус 26, этаж 2, ауд. 26-202; тел.: +7 (863) 201-90-60; e-mail: spu-52.5@donstu.ru