

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет», кандидат
технических наук Гладких В. А.



[Handwritten signature]

10

2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) на диссертационную работу Кузнецова Владимира Вячеславовича на тему «Напряжённо-деформированное состояние неоднородных железобетонных цилиндров с учётом физической нелинейности», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.1.9. Строительная механика

Для подготовки отзыва в диссертационный совет 24.2.295.01 ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» соискателем были представлены следующие материалы:

– диссертационная работа в объеме 152 страниц, состоящая из 4 глав и приложений (2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 1 технический акт внедрения);

– автореферат диссертации объемом 24 страницы.

Изучение и анализ диссертации и автореферата позволили сформулировать следующие оценки:

Диссертационная работа Кузнецова Владимира Вячеславовича посвящена разработке численных методов расчёта железобетонных конструкций цилиндрической формы, работающих в условиях сложного объёмного напряжённо-деформированного состояния при одновременном воздействии механических нагрузок и температурных полей. Работа содержит результаты разработки и программной реализации расчётных алгоритмов, представляющие научный и практический интерес. Значимость полученных результатов определяется возможностью исследования совместной работы бетона и окружной арматуры с учётом физической нелинейности и температурной неоднородности. Представленное исследование полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ведущая организация считает, что работа заслуживает положительной оценки и рекомендует её к защите.

1. Актуальность темы исследования

Железобетонные конструкции цилиндрической формы являются одним из наиболее распространённых типов строительных элементов, используемых в самых разных областях — от систем водоотведения и трубопроводов до ответственных сооружений атомной энергетики, таких как оболочки сухой защиты реакторов. Особенностью этих конструкций является то, что они работают в условиях объёмного напряжённого состояния, вызванного внутренним давлением, внешним обжатием

грунтом, собственным весом и, зачастую, значительными температурными градиентами. Расчёты с постоянными деформационными характеристиками материалов и осреднённым учётом армирования не всегда позволяют выявить особенности локального напряжённо-деформированного состояния вблизи арматуры. Учёт нелинейного деформирования бетона и температурной неоднородности может существенно изменять распределение напряжений и деформаций, что необходимо учитывать при оценке работы конструкции. В связи с этим разработка численных моделей, позволяющих учитывать реальную диаграмму деформирования бетона, изменение его модуля упругости в зависимости от напряжённого состояния и температуры, а также дискретное расположение арматуры, является крайне актуальной задачей строительной механики. Диссертация Кузнецова В.В. направлена на создание таких расчётных модулей, что подтверждает её высокую *актуальность* и практическую востребованность.

2. Структура и содержание работы

Диссертация изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 6 таблиц, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 80 наименований и приложений, содержащих два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и технический акт внедрения. Структура работы логична и отражает все этапы исследования.

Введение содержит обоснование актуальности, анализ степени разработанности проблемы, формулировку цели и задач, описание объекта и предмета исследования, научной новизны, теоретической и практической значимости, методологии, положений, выносимых на защиту, сведений об апробации и публикациях.

Первая глава представляет собой развёрнутый обзор литературы по механике неоднородных тел и расчётным моделям железобетона.

Выделены основные гипотезы и допущения, приведены основные уравнения теории упругости, пластичности и ползучести, а также выполнен вывод матрицы жёсткости и вектора нагрузок для осесимметричного треугольного конечного элемента с учётом начальных деформаций (температурных, усадочных и преднапряжения). Сформулирован подход к учёту изменения модуля упругости как функции различных факторов.

Вторая глава посвящена исследованию различных диаграмм деформирования бетона при одноосном сжатии. Проведено сравнение трёх подходов (Сарджин/Еврокод, СП 63.13330, теория Гениева) с экспериментами из работ Мкртчяна, Медянкина и Таинга. Разработана методика пересчёта модуля деформации для объёмного напряжённого состояния на основе интенсивностей напряжений и деформаций. Представлен итерационный алгоритм.

Третья глава содержит численное моделирование бетонного и железобетонного цилиндра при силовом и температурном нагружении. Решена задача №1 (чисто бетонный цилиндр) с проверкой на аналитическое решение, показано отличие однородного и неоднородного вариантов. В задаче №2 вводятся дискретные арматурные стержни и исследуются пять подзадач с различными сочетаниями температуры, давления и учётом физической нелинейности. Выявлены зоны разрушения бетона от растяжения.

Четвёртая глава посвящена исследованию цилиндров с внутренним окружным преднапряжением, внешним армированием и внешним преднапряжённым стальным хомутом. Рассмотрено влияние различных сочетаний давления, температуры и преднапряжения на распределение напряжений и деформаций. Полученные результаты характеризуют конкретные расчётные схемы; сопоставление с известными решениями и обобщение выводов требуют учёта различий исходных данных и принятых допущений. В задаче №3 показано, что внутреннее преднапряжение не даёт

существенного повышения несущей способности; в задаче №4 выполнено сравнение с результатами Муханова, показавшее значительные расхождения; в задаче №5 показано, что внешняя обойма с преднапряжением в сочетании с температурным градиентом может увеличить допустимое давление.

Заключение содержит основные выводы и результаты, а также перспективы дальнейших исследований. Приложения содержат два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и акт внедрения.

В работах в целом оформлена аккуратно, материал изложен последовательно и доступно.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексом мероприятий. Во-первых, все расчёты базируются на строгой математической постановке краевых задач теории упругости и пластичности, выведенных в первой главе с использованием общепринятых гипотез и допущений. Во-вторых, реализация метода конечных элементов выполнена корректно: использованы треугольные элементы с линейной аппроксимацией перемещений, матрицы жёсткости и векторы нагрузок выведены аналитически, проверено выполнение граничных условий и интегральных соотношений. В-третьих, проведена верификация на тестовых задачах: сравнение с аналитическим решением для однородного термоупругого цилиндра (задача №1) показало практически полное совпадение (расхождения не превышают долей процента), что подтверждает правильность реализации МКЭ. В-четвёртых, сопоставление теоретических диаграмм деформирования бетона, полученных по трём методикам (Еврокод, СП 63.13330, теория Гениева), с экспериментальными данными из трёх независимых источников (работы

Мкртчяна, Медянкина, Таинга) показало приемлемое согласие, особенно для кривой по Еврокоду, что даёт основание использовать эти диаграммы в дальнейших расчётах. В-пятых, использован итерационный метод последовательных приближений с контролем точности ($\delta = 0.0001$) и ограничением числа итераций, что обеспечивает устойчивость и сходимость вычислительного процесса. Наконец, полученные результаты не противоречат физическим представлениям о поведении бетона и арматуры под нагрузкой и при температурных воздействиях. Всё это позволяет считать выводы диссертации достоверными и обоснованными.

4. Научная новизна

Во-первых, автором разработан и реализован в виде итерационного алгоритма метод корректировки модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии. В отличие от традиционных подходов, где изменение модуля определяется исключительно по одноосной кривой деформирования, предложенный метод использует инвариантные характеристики тензора напряжений и деформаций — интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i , что позволяет учитывать пространственный характер нагружения. Алгоритм основан на последовательных приближениях: на каждом шаге по текущим значениям главных напряжений и деформаций вычисляется секущий модуль, который затем сравнивается с предыдущим значением, и итерация продолжается до достижения заданной точности. Это даёт возможность моделировать работу бетона в условиях сложного напряжённого состояния без привлечения сложных теорий прочности, что является важным практическим упрощением.

Во-вторых, реализовано конечно-элементное моделирование железобетонных цилиндров с отдельным заданием областей бетона и стали в меридиональном сечении. В принятой осесимметричной

постановке стальные включения представляют окружное армирование. Такой подход позволяет исследовать локальную неоднородность напряжённо-деформированного состояния вблизи арматуры, которая сглаживается при осреднённом описании железобетона.

В-третьих, проведено систематическое исследование влияния типа преднапряжения (внутренняя преднапряжённая арматура, внешняя стальная обойма) на несущую способность цилиндрической оболочки при совместном действии внутреннего давления и температурного градиента. Получены новые данные, показывающие, что при определённых условиях внешняя обойма может увеличить допустимое внутреннее давление вдвое, тогда как внутреннее преднапряжение оказывается малоэффективным из-за развития растягивающих напряжений во внешних слоях бетона. Этот результат является неочевидным и имеет важное значение для выбора рациональных конструктивных решений.

В-четвёртых, работоспособность отдельных составляющих модели исследована путём сопоставления с известными решениями термоупругости и сравнения выбранных диаграмм одноосного сжатия бетона с опубликованными экспериментальными данными трёх независимых исследователей. Показана высокая точность предложенных алгоритмов. При этом автор выявил существенные расхождения с некоторыми ранее опубликованными численно-аналитическими решениями, что подчёркивает необходимость применения более детальных численных методов.

Основные результаты разработки расчётных алгоритмов обоснованы представленными численными исследованиями. Обобщение выводов о предельных нагрузках и эффективности преднапряжения требует учёта рассмотренных расчётных схем и ограничений модели.

5. Научная и практическая ценность диссертации

Научная ценность работы заключается в развитии алгоритмов расчёта осесимметричных железобетонных цилиндров с учётом физической нелинейности бетона, температурной неоднородности и отдельного моделирования окружной арматуры. Полученные результаты раскрывают особенности перераспределения напряжений и возникновения зон растяжения бетона. Разработанные процедуры могут служить основой для дальнейшего развития моделей с учётом длительных процессов и пространственного армирования. Кроме того, развитые в работе подходы к дискретному моделированию арматуры могут быть применены к расчёту других типов армированных конструкций (плит, балок, оболочек произвольной формы).

Практическая ценность подтверждена внедрением разработанного пакета прикладных программ на языке Python в деятельность ГК АКСстрой (г. Аксай, Ростовская область) при расчёте железобетонных цилиндрических изделий, в том числе ливневых и канализационных колодцев, испытывающих давление грунта и температурные воздействия. Согласно представленному акту внедрения, более рациональное использование армирования обеспечивает экономический эффект до 1,5 млн рублей. Созданные программные модули представляют интерес для исследовательских расчётов и сравнительной оценки проектных решений (например, в проектных институтах атомной отрасли, гидротехнического строительства) для расчёта оболочек сухой защиты АЭС, водопропускных труб, силосов, резервуаров и других цилиндрических сооружений, особенно при наличии существенных температурных воздействий. Рекомендуется также использовать результаты работы в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов по направлениям «Строительство».

6. Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки

Полученные в диссертации результаты имеют значение для развития строительной механики в части численного моделирования физически нелинейного деформирования неоднородных железобетонных конструкций. Предложенная и программно реализованная методика корректировки секущего модуля деформации бетона позволяет исследовать изменение напряжённо-деформированного состояния цилиндрических элементов при совместном действии силовых и температурных воздействий.

Раздельное моделирование бетона и окружной арматуры в осесимметричной постановке позволяет выявлять локальные особенности распределения напряжений и деформаций, а также зоны растяжения и снижения жёсткости бетона, которые сглаживаются при осреднённом описании армирования. Выполненные расчётные исследования расширяют представления о влиянии температурной неоднородности, расположения арматуры и предварительного напряжения на совместное деформирование бетона и стали.

Разработанные алгоритмы и полученные результаты могут служить основой для дальнейшего совершенствования расчётных моделей железобетонных цилиндрических конструкций, включая уточнение описания трещинообразования, учёт длительных процессов и переход к моделированию пространственного армирования.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

На основе выполненного исследования можно рекомендовать следующее:

- Разработанный пакет программ на языке Python рекомендуется к использованию в проектных организациях, занимающихся расчётом и проектированием железобетонных труб, оболочек, резервуаров и других цилиндрических конструкций, особенно в случаях, когда имеются

значительные температурные перепады (например, в районах с суровым климатом, для тепловых сетей, для объектов атомной энергетики). Программный код на языке Python является легко адаптируемым, что позволяет его модифицировать под конкретные задачи.

- Предложенную методику корректировки модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии можно использовать в качестве базового алгоритма при разработке пользовательских моделей материалов в коммерческих конечно-элементных пакетах.

- Полученные выводы о нецелесообразности внутреннего преднапряжения в толстостенных цилиндрах и о преимуществах внешней обоймы при наличии температурного градиента следует учитывать при выборе конструктивной схемы для новых проектов.

- В учебном процессе результаты работы могут быть использованы при чтении курсов «Строительная механика», «Железобетонные конструкции» и «Численные методы в строительстве» для магистрантов и аспирантов строительных специальностей.

Рекомендуется продолжить исследования в направлении учёта ползучести и усадки бетона, а также разработки трёхмерных моделей с учётом пространственного армирования.

8. Соответствие работы паспорту научной специальности

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 2.1.9. Строительная механика. В ней разработаны физико-математические модели нелинейного деформирования железобетонных конструкций цилиндрической формы с учётом неоднородности и температурных воздействий (пункт 2 паспорта). Также в работе применены численные методы (МКЭ, итерационные алгоритмы) для расчёта строительных конструкций и их элементов на прочность и жёсткость при статических и температурных нагрузках (пункт 4 паспорта). Содержание диссертации соответствует формулировке специальности, так как

предметом исследования является напряжённно-деформированное состояние как фундаментальная характеристика надёжности конструкций.

9. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати и личный вклад соискателя в получение результатов исследования

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 6 печатных работах, из которых 4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 2 — в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science. Кроме того, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на трёх международных научно-практических конференциях (Казань, Белгород, Нальчик). Это свидетельствует об апробации результатов исследования на научных конференциях и их представлении в научной печати. Количество и качество публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личный вклад автора является определяющим. Соискатель самостоятельно сформулировал цель и задачи исследования, провёл анализ литературных источников, вывел основные соотношения метода конечных элементов для осесимметричной задачи, разработал итерационный алгоритм корректировки модуля деформации, написал программный код на языках Python и MATLAB. Все расчётные примеры, включая построение конечно-элементных сеток, выполнение расчётов, обработку данных и построение графиков, проведены лично автором. Интерпретация полученных результатов, формулировка выводов и рекомендаций также принадлежит соискателю. В совместных публикациях вклад автора состоит в разработке математических моделей, проведении численных экспериментов и подготовке текста статей.

10. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. В нём приведены все основные разделы работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту. В автореферате представлены основные расчётные формулы, приведены рисунки с распределением напряжений и деформаций для ключевых задач, а также таблицы с численными результатами. Структура автореферата соответствует структуре диссертации. Каких-либо расхождений между текстом автореферата и диссертации не обнаружено. Автореферат написан ясным научным языком и даёт полное представление о проделанной работе и полученных результатах.

11. Замечания

По результатам рассмотрения диссертации сформулированы следующие замечания:

1. В работе не рассматриваются вопросы ползучести и усадки бетона. Для длительно эксплуатируемых конструкций эти факторы могут быть существенны. Автор упоминает об этом в перспективах, но в текущей версии они не учтены, что несколько сужает область применения модели.

2. При моделировании разрушения бетона на растяжение применено достаточно жёсткое условие — обнуление модуля упругости при превышении предела прочности на растяжение. Более физически обоснованным было бы использование диаграммы разупрочнения (softening) с постепенным снижением жёсткости. Автор оговаривает это как упрощение и планирует дальнейшие исследования данного вопроса.

3. В задаче №4 (сравнение с работой Муханова) автор показывает значительное расхождение результатов, но не приводит детального анализа причин (различия в допущениях, геометрии, диаграммах деформирования).

4. Отсутствует оценка влияния вариаций коэффициента Пуассона на результаты расчётов, принятое постоянное значение $\nu=0,2$ не может полностью соответствовать реальному поведению бетона при высоких температурах. Следовало провести параметрическое исследование чувствительности.

5. Методика корректировки модуля деформации бетона с использованием интенсивностей напряжений и деформаций основана на диаграмме одноосного сжатия. Недостаточно раскрыта область применимости такого подхода к многоосному напряжённому состоянию, в том числе при значительном всестороннем обжатии. Желательно дополнительно обосновать учёт влияния среднего напряжения и сопоставить результаты с независимыми данными многоосных испытаний.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы.

12. Заключение

Диссертационная работа Кузнецова Владимира Вячеславовича является завершённым научно-квалификационным исследованием, выполненным на актуальную тему, содержащим новые научные результаты и имеющим практическое значение. Предложенные автором методики и алгоритмы развивают численное моделирование железобетонных цилиндров с учётом физической нелинейности бетона, температурной неоднородности и отдельного описания окружающей арматуры. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования расчётов и оптимизации проектных решений. Работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ в актуальной редакции, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Кузнецов Владимир Вячеславович, заслуживает присуждения учёной

степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Отзыв подготовлен и утверждён на заседании кафедры «Сопротивление материалов» НИУ МГСУ, протокол № 2 от 8 октября 2026 г.

Заведующий кафедрой «Сопротивление материалов» НИУ МГСУ,
д-р техн. наук, профессор

Олег Вартанович Мкртычев

Доцент кафедры «Сопротивление материалов» НИУ МГСУ, канд. техн. наук

Никита Юрьевич Цыбин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)
129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26
Телефон: +7 (495) 781-80-07, (495) 781-99-88, (495) 287-49-14
E-mail: kanz@mgsu.ru
<https://www.mgsu.ru>

Подпись Мкртычева О.В. и Цыбина Н.Ю. удостоверяю:

Начальник Управления
по работе с персоналом
Т. И. ЧЕРЕПОВА

