

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кузнецова Владимира Вячеславовича на тему «Напряжённо-деформированное состояние неоднородных железобетонных цилиндров с учётом физической нелинейности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика

Актуальность темы диссертации

Железобетонные конструкции цилиндрической формы широко применяются в современном строительстве — от трубопроводов и элементов систем водоотведения до ответственных оболочек защитных сооружений атомных станций. Особенностью таких объектов является сложное объёмное напряжённо-деформированное состояние, возникающее под действием внутреннего давления, внешнего обжатия грунтом и температурных градиентов. Традиционные линейно-упругие расчёты, основанные на «размазывании» арматуры по сечению и использовании постоянных модулей упругости, не позволяют достоверно оценить локализацию повреждений, зоны концентрации напряжений и фактическую несущую способность. Всё это определяет высокую актуальность разработки численных методов, учитывающих физическую нелинейность бетона (нелинейную диаграмму деформирования), неоднородность свойств материала, зависящую от температуры и напряжённого состояния, и дискретное армирование. Внедрение таких расчётов позволяет не только повысить надёжность проектируемых конструкций, но и получить значительный экономический эффект за счёт оптимизации расхода материалов. Диссертация В. В. Кузнецова направлена на решение именно этой научно-практической задачи, что делает её тему, безусловно, *актуальной* для строительной механики и смежных областей.

Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 80 наименований и двух приложений. Общий объём — 152 страницы машинописного текста, включая 65 рисунков и 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях.

Глава 1 содержит обзор состояния вопроса. Автор детально анализирует работы по механике неоднородных тел (В.И. Андреев, В.А. Ломакин, С.Г. Михлин, Я.С. Подстригач и др.), а также по расчётным моделям железобетона (Н.И. Карпенко, В.М. Бондаренко, В.Н. Байков, В.И. Колчунов). Приводятся основные уравнения теории упругости, пластичности и ползучести, а также вывод соотношений метода конечных элементов (МКЭ) для осесимметричной задачи в перемещениях. Особое внимание уделено учёту изменения модуля упругости как функции различных факторов.

Глава 2 посвящена сопоставлению различных зависимостей деформирования бетона при одноосном сжатии. Автор сравнивает уравнения Сарджина (Еврокод), нормативную диаграмму СП 63.13330.2018 и теорию Г. А. Гениева, проводя верификацию на экспериментальных данных трёх независимых исследователей (А.М. Мкртчян, М.Д. Медянкин, Б. Таинг). На основе анализа выбираются наиболее подходящие соотношения для дальнейшего использования. Также в главе предложен итерационный алгоритм корректировки модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии.

Глава 3 посвящена моделированию напряжённо-деформированного состояния бетонного и железобетонного цилиндра с учётом температурного поля. Рассмотрены как однородная, так и неоднородная постановки (зависимость модуля упругости от температуры). Реализовано прямое дискретное моделирование арматурных стержней. Последовательно решены задачи №1 (бетонный цилиндр без арматуры) и №2 (железобетонный цилиндр) при различных сочетаниях нагрузок и температурных перепадов. Показано существенное влияние учёта физической нелинейности на распределение напряжений.

Глава 4 исследует железобетонные цилиндры с преднапряжённой арматурой (внутренней и внешней) и с внешней стальной обоймой. Рассмотрены задачи №3 (внутренняя преднапряжённая арматура), №4 (внешняя арматура, сравнение с известным решением А.В. Муханова) и №5 (внешняя стальная оболочка). Продемонстрированы эффекты повышения несущей способности, а также показана нецелесообразность использования внутренней преднапряжённой арматуры для рассмотренных условий.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы, а также перспективы дальнейших исследований.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность обеспечена использованием строгого математического аппарата теории упругости, корректной реализацией МКЭ, проверкой выполнения граничных условий и интегральных соотношений. Важным элементом является верификация разработанного программного модуля путём сравнения с аналитическими решениями и с экспериментальными данными других авторов. Во всех случаях достигнуто приемлемое соответствие. Кроме того, результаты расчётов согласуются с физическими представлениями о работе бетона в условиях температурного расширения и взаимодействия с арматурой. Применение численных методов с контролем сходимости итерационных процессов добавляет надёжности полученным данным.

Новизна результатов заключается в следующем. Впервые предложена и реализована методика итерационного пересчёта модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии на основе инвариантных характеристик (интенсивностей напряжений и деформаций) с учётом экспериментальной диаграммы одноосного сжатия. В отличие от существующих работ автор выполняет дискретное моделирование арматуры, что позволяет выявить локальные концентрации напряжений у стержней, ранее не фиксировавшиеся при «размазывании». Также впервые проведено систематическое сравнение влияния внутреннего и внешнего преднапряжения на толстостенный цилиндр при температурном воздействии, что дало неочевидные результаты о преимуществе внешней обоймы в некоторых режимах.

Научная новизна диссертации состоит в следующих положениях:

1. Разработан алгоритм корректировки модуля упругости бетона в зависимости от интенсивности деформаций при объёмном напряжённом состоянии, позволяющий моделировать поведение материала по текущей диаграмме деформирования с учётом пространственного характера нагружения.
2. Впервые реализовано конечно-элементное моделирование железобетонного цилиндра с непосредственным включением арматурных стержней как отдельных конечных элементов, что дало возможность выявить зоны локального растяжения и разрушения бетона вблизи арматуры.
3. Установлены закономерности изменения напряжённо-деформированного состояния при совместном действии давления, температурного градиента и преднапряжения; показано, что при определённых условиях разрушение инициируется не исчерпанием прочности бетона, а появлением растягивающих напряжений, не контролируемых традиционными методами.

Ценность для науки и практики и рекомендации по использованию результатов

Теоретическая ценность работы заключается в создании математической модели и численного алгоритма, которые могут быть использованы для широкого круга осесимметричных задач строительной механики с учётом нелинейных свойств материалов. Предложенная методика корректировки модуля деформации может быть адаптирована для других композиционных материалов.

Практическая значимость подтверждена внедрением разработанного пакета программ на языке Python в деятельность ГК АКСтрой при расчёте железобетонных колодцев и труб. Экономический эффект от оптимизации армирования оценён в 1,5 млн руб. Кроме того, созданные программные модули могут быть использованы в проектных организациях при расчёте оболочек АЭС, водопропускных труб и других цилиндрических конструкций, работающих в условиях температурных перепадов. Рекомендуется дальнейшее развитие метода для учёта ползучести и трещинообразования, а также для трёхмерных расчётов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Все научные положения и выводы диссертации являются хорошо обоснованными. Они опираются на фундаментальные уравнения механики деформируемого твёрдого тела, корректно выведенные в главе 1. Численная реализация МКЭ выполнена в соответствии с общепринятыми подходами, а результаты расчётов проходят проверку на соответствие граничным условиям и экспериментальным данным. Выводы о появлении растянутых зон при температурном воздействии подтверждены несколькими расчётными примерами с разными параметрами. Рекомендации по практическому использованию имеют документальное подтверждение в виде акта внедрения. Таким образом, обоснованность можно признать высокой.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати и их апробация

Основные результаты работы опубликованы в 6 печатных работах, из которых 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 2 — в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science. Также получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты докладывались и получили одобрение на трёх международных научно-практических конференциях (Казань, Белгород, Нальчик) в 2024 году.

Такая апробация свидетельствует о достаточной степени обсуждения работы научной общественностью.

Соответствие работы паспорту научной специальности

Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 2.1.9. Строительная механика, а именно:

- пункту 2: «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчёта»;
- пункту 4: «Численные и численно-аналитические методы расчёта зданий, сооружений и их элементов на прочность, жёсткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях».

Личный вклад соискателя в получение результатов исследования

Автором самостоятельно проведён анализ литературы, сформулированы цели и задачи, выведены основные соотношения МКЭ, разработаны алгоритмы и написаны программы на Python и MATLAB. Все расчётные примеры выполнены лично соискателем, подготовлены рисунки и таблицы, выполнена интерпретация результатов. Вклад в совместные публикации не вызывает сомнений.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает структуру и содержание диссертации, содержит все основные выводы, формулы и результаты. В нём правильно представлены научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения. Содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

Необходимо сделать **замечания по работе**, не влияющие на общую положительную оценку:

1. Автор в явном виде не рассматривает деформации ползучести и усадки бетона, ограничиваясь в расчетных алгоритмах упруго-пластической моделью. Хотя данные границы исследования оговорены во введении, было бы интересно оценить влияние этих факторов на длительную работу цилиндрических оболочек, особенно при температурных нагрузках.

2. При моделировании разрушения бетона на растяжение в расчетном модуле соискателя принято достаточно жёсткое условие — обнуление модуля деформации при превышении предела прочности. Более физически обоснованным и численно стабильным при реализации метода конечных элементов (МКЭ) является учет постепенного развития микротрещин через диаграммы разупрочнения бетона (softening). Автор упоминает об этом подходе в тексте диссертации, однако в текущей расчетной модели данный аспект не реализован.

3. В диссертационном исследовании реализованы сугубо детерминированные расчетные алгоритмы, не учитывающие стохастическую природу строительных материалов и геометрических параметров. В то же время, учет случайных факторов (таких как статистический разброс прочности бетона по объему конструкции или пространственная неоднородность расположения дискретного армирования) принципиально необходим при оценке реальных коэффициентов надежности. Для физически нелинейных систем, работающих в экстремальных условиях объемного нагружения и температурных полей, фактические коэффициенты надежности могут существенно отличаться от стандартных нормативных значений, в связи с чем разработанные автором математические модели в дальнейшем полезно дополнить вероятностным подходом.

4. В качестве одной из базовых гипотез соискателем принято условие абсолютного контакта между бетонным массивом и элементами дискретного армирования (или внешней стальной обоймы). Данное допущение оправдано в рамках поставленных задач, однако пренебрежение возможным проскальзыванием стержней относительно бетона может приводить к некоторому завышению локальной жесткости. Учет податливости контактного шва и сдвиговых деформаций на границе сред рекомендуется в качестве перспективного направления развития разработанных расчетных модулей.

5. Некоторые иллюстрации в главе 3 содержат мелкие шрифты на легендах, что затрудняет их визуальное восприятие и анализ результатов численного моделирования.

6. В оглавлении диссертации (пункт 2.2.2), а также в названии соответствующего подраздела на странице 36 допущена техническая опечатка: вместо СП 63.13330.2018 ошибочно указан несуществующий СП 63.13380.2018.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и носят в основном рекомендательный характер для будущих исследований.

Заключение

Диссертационная работа Кузнецова Владимира Вячеславовича является законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком теоретическом уровне на актуальную тему, содержит научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся новизной. Она вносит существенный вклад в развитие методов расчёта железобетонных конструкций

цилиндрической формы с учётом физической нелинейности и температурных воздействий. Работа соответствует требованиям, изложенным в пп.9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, (05.23.17 —
Строительная механика), профессор,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет», кафедра «Строительные
конструкции, основания и надёжность
сооружений», профессор

**Валерия Александровна
Пшеничкина**

« 06 » октября 2026 г.

Подпись В.А. Пшеничкиной заверяю:

Ученый секретарь ученого совета ИАиС ВолгГТУ

к.т.н., доцент



А.В. Савченко

06.10.2026 г.

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