



Утверждаю:

Проектор по научной работе  
ФГБОУ ВО ПГУПС  
д-р техн. наук, проф.  
Т. С. Титова  
2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» на диссертацию Самошкина Антона Сергеевича «Исследование взаимодействия арматуры с бетоном расчетно-экспериментальными методами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность темы исследования.** Важным направлением развития современных железобетонных конструкций является разработка и применение эффективных видов металлической и неметаллической арматуры. Работоспособность железобетонных изделий в значительной мере определяется процессом взаимодействия арматуры с бетоном (сцеплением), который обусловлен, во-первых, неоднородностью бетона и, как следствие, нелинейным характером его деформирования, во-вторых, сложной геометрией арматуры.

Исследованию проблеме сцепления в последние десятилетия были посвящены многочисленные научные работы. Это свидетельствует об актуальности и сложности данной задачи. Однако до настоящего времени не разработано практически реализуемой математической модели железобетона, которая позволила бы комплексно учитывать особенности деформирования его структурных компонентов, а также их взаимодействие.

Для решения данной задачи необходимо, сочетая экспериментальные методы исследования с методами математического моделирования и численного анализа, создать практически реализуемый подход к расчету железобетонных конструкций. При этом учет нелинейных процессов в зоне сцепления арматуры с бетоном должен быть основан на простом алгоритме. В связи с чем, автор в своем исследовании ставит задачи, направленные на разработку математической модели деформирования железобетона, учитывающую контактное взаимодействие арматуры и бетона и позволяющую численно решать задачи прочности железобетонных конструкций.

**Структура** диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 122 источников, одно приложение и содержит 122 страницу машинописного текста, 63 рисунка и 7 таблиц.

**Основные результаты диссертационной работы.** В первой главе автором проводится анализ экспериментальных, аналитических методов, а также методов математического моделирования, применяемых для исследования взаимодействия арматуры с бетоном. На его основании соискатель делает вывод о несовершенстве существующих математических и численных моделей взаимодействия арматуры с бетоном.

Таким образом, обосновывается необходимость проведения комплексного исследования взаимодействия арматуры с бетоном, на основе экспериментальных методов и методов математического моделирования. Сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Для экспериментальных исследований выбрана схема испытаний – вытягивание арматуры из бетонных образцов, которая позволила определить характеристики контактного взаимодействия, и является наиболее рациональной.

Сформулированы требования к разрабатываемой математической модели контактного взаимодействия арматуры с бетоном: пригодность для численной реализации; учет возможных физических и геометрических нелинейностей; простой алгоритм идентификации параметров.

Во второй главе описано экспериментальное исследование взаимодействия бетона с арматурой периодического профиля, проведенное автором. Испытание образцов произошло в широком диапазоне нагрузок, в том числе превышающий предел текучести арматуры.

Представлены результаты испытаний трех серий по пять железобетонных образцов, различающихся длинной, которые были использованы при определении параметров контактного взаимодействия. Для примененных в эксперименте арматуры и бетона установлено значение эффективной длины заделки. Полученные результаты позволили автору сделать вывод о том, что образцы, длина которых превышает определенную величину, деформируются одинаково при выбранной схеме испытаний, следовательно, и зона нелинейного деформирования бетона вокруг арматуры для таких образцов одинакова.

В третьей главе описана разработанная автором математическая модель железобетона, которая позволяет учитывать контактное взаимодействие арматуры с бетоном. Она представляет собой сплошную среду, состоящую из трех упругопластических материалов: бетон, арматура и контактный слой. При этом, арматура моделируется круговым цилиндром с гладкой поверхностью, а контакт между структурными компонентами модели принят идеальным. Используя такой подход, соискатель рассматривает проблему контактного взаимодействия арматуры как задачу механики сплошной среды. Для каждой составной части модели были выбраны соотношения, описывающие характер ее деформирования и предложен алгоритм определения их параметров. Численную реализацию своей математической модели автор предлагает проводить с применением метода конечных элементов, считая его наиболее разработанным и подходящим для решения нелинейной задачи механики деформируемого твердого тела. Для этого было разработаны правила дискретизации конечно элементной модели.

На тестовых задачах автором проведена численная реализация предложенной модели железобетона с металлической и не металлической арматурой. В результате получено хорошее соответствие опытных и расчетных данных.

В четвертой главе диссертации представлены результаты численного моделирования задач теории железобетона, в которых взаимодействие арматуры с бетоном значительно влияет на результаты расчета.

Были рассмотрены: вытягивание арматуры из бетона, растяжение железобетонной призмы, сжатие бетонного цилиндра предварительно напряженным канатом и изгиб железобетонной балки. Для всех задач были созданы конечно элементные (КЭ) модели, параметры которых определены по разработанным автором алгоритмам. Получено удовлетворительное соответствие опытных и расчетных данных.

Установлена, возможность определения зоны нелинейного деформирования бетона в области контакта по эпюре продольных деформаций, измеренных на поверхности образца. Предложена численная процедура образования поперечных трещин при растяжении железобетона. Получено удовлетворительное соответствие опытных и расчетных данных.

Численная реализация предложенной модели показала широкие возможности ее применения для моделирования объемных железобетонных элементов, армированных одним или несколькими стержнями, с учетом образования трещин при растяжении и нелинейном деформировании арматуры и бетона.

**Новизна** проведенных исследований заключается в следующих результатах:

- 1) разработана и численно реализована новая математическая модель железобетона, учитываящая контактное взаимодействие арматуры с бетоном;
- 2) предложен алгоритм определения параметров модели, который позволил описать деформирование железобетона с учетом условия в зоне контакта бетона с металлической и неметаллической арматурой;
- 3) проведен численный анализ задач железобетона, при решении которых было учтено взаимодействие бетона и арматуры: вытягивание металлической и неметаллической арматуры из бетона; растяжение железобетонного элемента; создание предварительного напряжения в железобетонном стержне, армированного канатом; изгиб железобетонной балки.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается корректным использованием положений механики деформируемого тела и методов математической статистики, а также хорошим совпадением расчетных данных с результатами экспериментов, полученных различными авторами.

**Практическая значимость** состоит в совершенствовании математической модели железобетона, которая может быть реализована на любом конечно-элементном программном комплексе и позволяет рассматривать задачи анализа напряженно-деформированного состояния железобетона в нелинейной постановке, что подтверждается актами внедрения.

Метод математического моделирования напряженно-деформированного состояния железобетона, позволяющего повысить точность расчетов железобетонных конструкций, может быть использован при проектировании и экспертизе элементов железобетонных конструкций.

По результатам исследований, изложенным в диссертации, есть **замечания**:

1. Использование идеально пластической аппроксимации с применением критерия Мизеса в контактном слое представляется в общем случае нагружения железобетонных конструкций спорным, поскольку напряженное состояние в прилегающем к арматуре слое может отличаться от чистого сдвига (в случае отклонения от осесимметричного вытягивания, например при появления изгиба в армирующих стержнях). Даже для идеального случая осесимметричного выдёргивания указанные оценки для толщины КС порядка 5/8 диаметра стержня (см. стр. 79, 80) указывает на ведение в рассмотрение весьма обширной зоны бетона, в которой пренебрегается отличием в пределах прочности бетона при растяжении и сжатии (нечувствительностью к виду напряженного состояния, анизотропией свойств при растяжении-сжатии)
2. В работе не рассматриваются ниспадающие ветви диаграмм сцепления и диаграмм деформирования (за исключением обзорной части).
3. Не учитываются реальные механизмы возникновения нелинейности при деформировании, связанные с микрорастрескиванием. Не производится сравнение с получившими широкое распространение в последнее время моделями поврежденности бетона (Глава 2).
4. Автор пишет (стр. 76): “стандартный метод Ньютона-Рафсона, который требует вычисления матрицы касательной жёсткости”. Обычно в серьёзных КЭ расчётах с использованием метода Ньютона-Рафсона используется алгоритмически согласованная матрица жёсткости (consistent tangential matrix), поскольку только она обеспечивает квадратичную скорость сходимости итерационных процедур (а не матрицы “касательной жёсткости”).

**Заключение.** Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Самошкина А.С. является научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи по созданию математической модели нелинейного деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия

арматуры и бетона, имеющей важное практическое и теоретическое значение для развития методов расчета на прочность элементов железобетонных конструкций.

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертант демонстрирует владение терминологией соответствующей теме исследования. Предложенные автором решения аргументированы. Оформление работы соответствует требованиям, устанавливаемым Министерством образования и науки Российской Федерации.

Диссертационная работа соответствует формуле паспорта специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» (технические науки) и следующим пунктам областей исследования по этой специальности:

п. 2: «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой».

п. 8: «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования».

п. 9: «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях».

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, среди которых четыре работы в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, а одна в журнале, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа полностью удовлетворяет критериям, приведенным в разделе II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертация Самошкина Антона Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки в области железобетонных конструкций, имеющие важное значение, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Заключение рассмотрено на семинаре кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), протокол № 4 от 14.11. 2017 г.

Профессор кафедры  
«Механика и прочность  
материалов и конструкций»,  
д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.



Кутовой Виктор Петрович

Специальность докторской диссертации 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Почтовый адрес: Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Телефон: (812) 457-86-28.

Факс: (812) 315-26-21.

E-mail: [dou@pgups.edu](mailto:dou@pgups.edu), [dou@pgups.ru](mailto:dou@pgups.ru).