



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**“Томский государственный архитектурно-
строительный университет”**
пл. Соляная, 2, г. Томск, 634003,
тел. (3822)65-32-61 факс (3822)65-24-22
e-mail: canc@tsuab.ru
ОКПО 02069295690001, ОГРН 1027000882886
ИНН/КПП 702000080/701701001

Утверждаю:

Ректор ТГАСУ

доктор физ.-мат. наук

профессор



В.А. Власов

2019 г.

_____ № _____

На _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»
на диссертационную работу Мальцева Виктора Васильевича
«Разработка и экспериментальная апробация численно-аналитических методов
расчета железобетонных конструктивных элементов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

Для обеспечения эксплуатационной надежности конструкций зданий необходимо иметь адекватные и достаточно простые методы расчета и проектирования. Это особенно актуально в настоящее время, когда строительство перестало быть серийным, проекты практически всех сооружений эксклюзивны. Поиск новых методов расчета, отвечающих нормативным требованиям и позволяющих проводить расчет на всех стадиях работы конструкции, выходит на первый план.

В связи с развитием новых информационных технологий, появлением высокоскоростных компьютеров стало возможным применение математических моделей, наиболее адекватно описывающих поведение железобетонных элементов

при любом способе нагружения, на произвольном этапе нагружения и с приемлемой точностью. Тем не менее, надежность расчетов строительных конструкций не может быть обеспечена, например, за счет простого увеличения количества элементов, узлов и связей при конечно-элементном анализе.

Железобетонные конструкции являются наиболее широко распространенными, а требования повышения адекватности расчета и возможности оптимизации возрастают при современном отходе от типовых конструктивных решений. Расчет и конструирование железобетонных элементов сопряжены с преодолением целого ряда трудностей, связанных с необходимостью учета не до конца исследованных физических явлений (физическая нелинейность работы бетона, взаимодействие арматуры и бетона и др.). С одной стороны, развитие подходов и методов, таких, как переход от расчета по допустимым напряжениям к расчету по предельным состояниям, разработка норм, узаконенных СНиП, имело целью упрощение вычислений. С другой стороны, с развитием методов конечно-элементного анализа (в частности, широким распространением программных комплексов типа SCAD) появилась возможность расчета сложных сооружений, что привело к возникновению серьезных противоречий, так как в инженерной практике в основном ограничиваются расчетами по упругой схеме без учета физической нелинейности. Для разрешения данных противоречий необходимы принципиально новые эффективные методы расчета железобетонных элементов, учитывающие работу конструкции от начала нагружения до потери несущей способности, которые должны иметь возможность перспективы внедрения в алгоритмы современных расчетных программных комплексов.

Диссертация Мальцева Виктора Васильевича посвящена разработке и экспериментальной апробации численно-аналитических методов расчета железобетонных конструктивных элементов с учетом физической нелинейности поведения бетона на основе применения нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры. В диссертации приводятся алгоритмы численно-аналитических методов расчета железобетонных конструктивных элементов, а также их непосредственная программная реализация в программных пакетах Mathcad и Excel. Результаты, полученные с помощью разработанных методов, хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований (натурных и численных) выполненных,

как непосредственно самим соискателем, так и с экспериментальными исследованиями, полученными сторонними авторами. Математическая модель, включающая реальные диаграммы деформирования материалов (сталь и бетон), используется для исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов до момента образования трещины. Результаты применения численно-аналитических методов, продемонстрированные в диссертации, является первым серьезным шагом в сторону формирования принципиально нового метода расчета для изгибаемых железобетонных конструктивных элементов, основанном на достижениях теории сопротивления железобетона и механики деформируемого твердого тела.

Актуальность диссертационной работы обусловлена острой необходимостью создания принципиально нового методов расчета железобетонных элементов, свободного от противоречий метода расчета по предельным состояниям, способного учитывать особенности работы конструкции от начала нагружения до потери несущей способности. В основе таких методов должны быть возможность внедрения в современные конечно-элементные программные комплексы.

Диссертационная работа содержит 159 страниц текста, в том числе 63 рисунка, 15 таблиц и список литературы из 110 наименований, состоит из введения, 4 глав, заключения, 3 приложений в которых приводятся программные реализации алгоритмов, разработанных численно-аналитических методов, а также акты внедрения проектных организаций города Новосибирска.

В первой главе рассмотрено состояние вопросов, касающихся способов аппроксимации диаграмм деформирования бетона, в том числе с учетом высокой степени неопределенности характеристик бетона. В результате анализа существующих методик расчета железобетонных элементов установлено, что методик, позволяющих производить адекватный «сквозной» расчет железобетонных элементов от начала нагружения до потери несущей способности, не существует. Возможно создание алгоритма «сквозного» расчета на основе энергетического подхода к расчету железобетонных элементов, разработанного В.М. Митасовым и В.В. Адищевым. Данный алгоритм предполагает расчет железобетонного элемента с помощью иерархических моделей от начала нагружения до потери несущей способности. Условия перехода от одной стадии к другой имеют в своей основе

уравнения энергетического баланса, в которые входит дополнительная работа внешних сил.

Поставлена задача разработки численно-аналитических методов, которые станут основой алгоритмов «сквозных» расчетов, определяющих напряженно-деформированное состояние в изгибающихся, сжатых и сжато-изогнутых железобетонных элементах на любой стадии нагружения. При этом железобетонные элементы рассматриваются как «аналитические суперэлементы» (термин, впервые предложенный в данной работе). При конечно-элементном анализе деформирования конструкций «аналитические суперэлементы» могут быть встроены в расчетную схему с помощью «суперузлов». Задачи исследования сформулированы четко и аргументированно.

Вторая глава посвящена разработке численно-аналитических методов расчета железобетонных конструктивных. Предложен численно-аналитический метод определения прогибов железобетонной балки с применением нелинейной диаграммы деформирования бетона до момента образования трещины. Главной особенностью разработанного метода является то, что он основан на едином подходе к построению аппроксимаций нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры, а также аппроксимаций функций кривизны, высоты сжатой зоны и прогибов с помощью сплайн-функций. Метод продемонстрирован на примере расчета шарнирно опертой железобетонной балки, при этом проведено сравнение результатов расчета с использованием различных аппроксимаций диаграмм деформирования бетона.

На основании гипотезы о том, что характер совместного деформирования арматуры и бетона вблизи трещины в изгибающем элементе, такой же, как при вытягивании арматуры из бетонного массива, разработан и программно реализован алгоритм численно-аналитического метода определения зоны краевого эффекта (анкеровки) арматурного стержня, замоноличенного в матрицу при вытягивании.

Разработанные численно-аналитические методы могут быть использованы для расчета дискретно армированных элементов из любых материалов. В диссертации рассматриваются железобетонные элементы, так как бетон выделяется из всех конструкционных материалов. Реальные диаграммы деформирования бетона обладают не только ярко выраженным свойствами нелинейности, но имеют так

называемые ниспадающие участки, вследствие чего оказывается невозможным применение таких диаграмм в расчетах с использованием расчетных комплексов типа SCAD, ЛИРА, ANSYS.

В третьей главе представлены результаты трех серий экспериментальных исследований. В силу того, что при экспериментальном определении физико-механических свойств наблюдаются большие разбросы определяемых жесткостных и прочностных характеристик. В качестве материалов для экспериментальных образцов выбраны материалы, характеристики которых не обладают такой степенью неопределенности как бетон. **Первая серия экспериментов** посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния опытных образцов – пластин с замоноличенными армирующими элементами с использованием поляризационно-оптического метода на основании которых сделан вывод о адекватности разработанной математической модели. **Вторая серия экспериментов** представляет собой обработку результатов экспериментального исследования В.В. Адищева, А.Г. Демешкина, В.В. Роота, посвященного исследованию напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из ячеистого бетона, армированных полосами дюралюминия, с помощью численно-аналитического метода. Сравнение теории и эксперимента показало, что предложенный численно-аналитический метод позволяет адекватно моделировать напряженно-деформированное состояние в армированных балках из однородного ячеистого бетона, армированных полосами дюралюминия до момента образования трещины. **Третья серия экспериментов**, выполненная с участием автора, посвящена исследованию балок с заранее организованными трещинами с использованием поляризационно-оптического метода. Показана хорошая согласованность экспериментальных данных с результатами, полученными разработанным численно-аналитическим методом на основе модифицированной модели Аутвотера, и результатами конечно-элементного анализа с применением ПК ANSYS. Показано, что зона краевого эффекта (анкеровки) при увеличении нагрузки остается постоянной как в образце с одной, так и с тремя заранее организованными трещинами.

Четвертая глава посвящена численным расчетам с применением программного комплекса ANSYS. Проводится сравнение с результатами

физического эксперимента и данными, полученными с помощью численно-аналитических методов. В частности, приводятся результаты численного моделирование процесса вырывания армирующего элемента из матрицы, а также результаты исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из однородного ячеистого материала, армированных полосами дюралюминия. Выполнено численное моделирование деформирования балок с заранее организованными трещинами. При этом используется разработанный автором способ моделирования балок с заранее организованными трещинами.

Среди результатов, представляющих наибольший научный и практический интерес, можно отметить следующие:

1. Алгоритм численно-аналитического метода определения прогибов железобетонной балки с применением нелинейной диаграммы деформирования бетона до момента трещинообразования. Алгоритм программно реализован на конкретном примере расчета шарнирно опертой железобетонной балки с применением диаграмм деформирования стали и бетона, аппроксимированных сплайн-функциями, а также с аппроксимациями диаграмм деформирования бетона, рекомендованных нормативными документами по расчету железобетонных конструкций. Результаты расчетов по разработанной методике хорошо согласуются с данными физических и численных экспериментов.

2. Алгоритм и программная реализация численно-аналитического метода определения зоны краевого эффекта арматурного стержня, замоноличенного в матрицу, при вытягивании. Результаты расчетов по разработанной методике хорошо согласуются с экспериментальными данными, а также с результатами численного моделирования в ПК ANSYS.

3. Результаты экспериментальных исследований балок с заранее организованными трещинами с использованием поляризационно-оптического метода. Данные численного моделирования подтвердили экспериментально полученный результат о независимости длины зоны краевого эффекта от прикладываемой нагрузки.

4. Способ численного моделирования напряженно-деформированного состояния балки в окрестности трещины с помощью «жесткого контакта», обеспечивающий возможность создания однотипной структурированной сетки по всей длине образца.

5. Интересный результат многочисленных численных экспериментов в ПК ANSYS доказано предположение о существовании специальной плоскости в продольном направлении балки с заранее организованными трещинами. В этой плоскости распределение продольных деформаций не зависит от изменения плотности армирования на всех участках балки кроме области в окрестности трещин. Расхождение деформаций наблюдается слева и справа от крайней трещины на расстоянии, соответствующем высоте поперечного сечения балки h для образцов с одной и тремя трещинами и $1,25 h$ для образца с пятью трещинами.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в рамках диссертационного исследования, подтверждается поддержкой грантами РФФИ. Практическая значимость результатов исследования подтверждается также актами внедрения в следующих проектных организациях города Новосибирска: ООО «Девали», ООО «Астра-Проект», ООО «АРТ-Проект», ООО ПСК «СИБКОНТРФОРС».

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.

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

Пункт 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых».

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

Пункт 4 «Механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций».

Пункт 5 «Теория упругости, пластичности и ползучести».

Пункт 7 «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники».

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

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

По диссертации имеются замечания:

1. Некоторые пункты научной новизны можно было сформулировать конкретнее.
2. Утверждение, что нет алгоритмов, позволяющих проводить сквозной расчет до разрушения конструкции, является не корректным, так как существуют много алгоритмов и численных методик, позволяющих моделировать процессы деформирования, разрушения и фрагментации материалов и конструкций.
3. В работе не обозначены границы применимости предложенных подходов.
4. Из диссертации неясно, чем обусловлен выбор шага расчетной сетки и его влияние на сходимость решения.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований, и не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования.

Заключение. Диссертационная работа Мальцева Виктора Васильевича «Разработка и экспериментальная апробация численно-аналитических методов расчета железобетонных конструктивных элементов» является законченной научным исследованием на актуальную тему. Представленные в работе новые научные результаты, полученные соискателем, вносят существенный вклад в совершенствование методов расчета изгибаемых железобетонных конструктивных элементов.

Диссертация Мальцева Виктора Васильевича удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует требованиям пункты 9, 10 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» (постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени кандидата наук, а ее автор Мальцев Виктор Васильевич, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв подготовлен кандидатом физико-математических наук, доцентом Радченко Павлом Андреевичем.

Отзыв обсужден на заседании кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» 23 сентября 2019 года (протокол №3).

Кандидат физико-математических наук,



Радченко П.А.

доцент, заведующий кафедрой

прикладной математики ФГБОУ ВО «ТГАСУ»

Ученый секретарь



Какушкин Ю.А.

Ученого совета ТГАСУ