

На правах рукописи



Зыюнг Ван Лам

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
НА ОСНОВЕ СКАНИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пыхалов Анатолий Александрович

Официальные оппоненты: **Москвичев Владимир Викторович**
доктор технических наук, профессор,
Красноярский филиал ФГБУН Института
вычислительных технологий СО РАН – Спе-
циальное конструкторско-технологическое
бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

Алпатов Юрий Никифорович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Братский государственный
университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государ-
ственный университет технологий
и управления»

Защита состоится «21» июня 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла-Маркса, 24, кор. 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, кор. 2, ауд. 101, <http://www.bgu.ru/>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Важную роль при математическом моделировании реальных деформируемых твердых тел (ДТТ) на основе численных методов, в частности, на основе высокоэффективного метода конечных элементов (МКЭ), играет уровень точности задаваемых в нем параметров, главными из которых являются механические характеристики материала и индивидуальность геометрии.

Традиционно механические характеристики реального ДТТ задаются в виде усредненного значения, например, общего для материала детали и полученного при испытании стандартных образцов. До недавнего времени такой подход был вполне приемлем. Однако, с развитием ряда технологий, таких, например, как применение композитных материалов, сварные соединения и другие, возрос уровень требований к математическому моделированию в них изменения механических характеристик. То есть, от того насколько точно они заданы в математической модели ДТТ зависит достоверность информации о том, какой уровень надежности и долговечности закладывается в изделие в целом.

Широкий диапазон изменений структуры материала и геометрии изделий (деформируемых твердых тел) определяется технологическими аспектами их изготовления, условиями работы, длительностью эксплуатации и другими факторами. Ещё более сложный характер представленных изменений имеют ДТТ из материала природного происхождения: дерева, горной породы, бетонов, костной ткани и др. Математическая конечно-элементная (КЭ) модель этих объектов не может считаться эффективной без идентификации в них реального изменения механических характеристик, а также индивидуальной геометрии.

Для решения представленной проблемы в рассматриваемой работе предлагается использовать технологию сканирования деформируемых твердых тел, которая дает возможность распознавания в них изменения механических характеристик материала и геометрии, а главное, применять эти данные для повышения точности и реалистичности при математическом конечно-элементном моделировании реальных ДТТ.

На пути реализации представленного подхода существует ряд проблем, связанных, например, с тем, что плотность сканируемых материалов не тождественна их механическим характеристикам; в результате сканирования, для достаточно точной идентификации реального ДТТ в КЭ модели, требуется использовать чрезвычайно большой объем данных (информации); математическое моделирование идентификации реального ДТТ должно быть применимо для *любых физических принципов сканирования*, таких как рентгеновский, ультразвуковой и др., а также для *любых типов материалов*, когда, полученная в результате сканирования, информация сформирована в виде цифрового (растрового) изображения.

Данная работа направлена на решение этих проблем, то есть, на разработку специальных математических методов интерпретации результатов сканирования ДТТ и их алгоритмизации, без которых невозможно получить достоверную картину изменения представленных параметров.

В качестве примера исследуемого ДТТ в работе используется анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) костной ткани человека, в виде фрагмента его бедренной кости, зубов в челюсти и зубов с композитной пломбой. Представленный выбор ДТТ *не принципиален*, но обусловлен двумя важными обстоятельствами. Первое из них определяется высокой степенью неоднородности материала кости и индивидуальностью её геометрии. Вторым обстоятельством является высокий уровень развития технологии и качества сканирования компьютерным томографом (КТ) в медицине и технике. Также, необходимо отметить, что костная ткань человека хорошо изучена на практике, что способствует высокому уровню контроля правильности (достоверности) её математического моделирования.

Таким образом, разработка технологии математического моделирования и ее компьютерной реализации для интерпретации результатов сканирования ДТТ, позволяющих идентифицировать в них поле изменения механических характеристик материала и геометрии, и их использование при конечно-элементном моделировании, является актуальной научной задачей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются ДТТ с неоднородной структурой механических характеристик и индивидуальными параметрами геометрии, и, в частности, ДТТ природного происхождения.

Предмет исследования – разработка численного метода математического конечно-элементного моделирования неоднородности структуры механических характеристик и индивидуальности геометрии ДТТ с использованием их КТ сканирования, и получение на этой основе картины напряженно-деформированного состояния рассматриваемых объектов.

Целью исследования является разработка математических методов моделирования, вычислительных алгоритмов и комплексов проблемно-ориентированных программ, предназначенных для интерпретации результатов сканирования ДТТ, в виде структуры механических характеристик и геометрии, с последующим использованием этих данных при построении и анализе НДС их КЭ моделей.

Для достижения представленной цели исследования в настоящей работе решаются следующие **задачи**:

1. Отработка входных данных и настройка КТ при проведении сканирования исследуемого ДТТ, а также предварительная обработка её результатов в виде оценки степени неоднородности механических характеристик материала и индивидуальности геометрии (поверхностей, внутренних структур и др.).

2. Разработка комплекса математических методов и алгоритмов интерпретации результатов сканирования ДТТ для построения их индивидуальной геометрии, которая включает в себя: определение внешних контуров сечений и контуров внутренней структуры материала.

3. Разработка методов математического моделирования интерпретации неоднородности механических характеристик материала ДТТ, построенных на основе сканирования и результатов натурных испытаний образцов материала, с использованием этих данных при построении и анализе НДС КЭ моделей.

4. Исследование точности сходимости численного решения МКЭ в анализе НДС КЭ моделей реальных стандартных образцов из костной ткани, построен-

ных на основе разработанного подхода моделирования неоднородности механических характеристик материала и данных натуральных испытаний.

5. Проведение численного эксперимента на реальных ДТТ природного происхождения по исследованию влияния в них структуры материала, особенностей геометрии, действующей внешней нагрузки и граничных условий, в частности, с применением решения контактной задачи теории упругости для анализа взаимодействия деформируемых твердых тел.

Методы исследования. В работе использовано математическое моделирование реальных ДТТ на основе аналитической геометрии, линейной алгебры и статистических методов, а также численного решения МКЭ. Для получения пиксельной характеристики сканирования ДТТ использовались технологии компьютерного томографа. При моделировании неоднородности механических характеристик использовался комплекс методов интерполяции, а также специальные сплайн-функции аналитической зависимости между пиксельной характеристикой сканирования ДТТ и его механическими характеристиками. Для программной реализации использованы среды алгоритмических языков FORTRAN, Visual Basic, PATRAN Command Language. Для построения и проведения анализа НДС КЭ моделей ДТТ использовано подключение программных комплексов: AutoCAD, NX Unigraphic, MSC Patran, Nastran и Marc.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента»; п. 7 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс методов математического моделирования индивидуальной геометрии реальных деформируемых твердых тел (ДТТ), как для внешнего контура, так и контуров внутренней структуры материала, а также неоднородности их механических характеристик.

2. Разработан численный метод интерпретации механических характеристик материала ДТТ относительно пиксельной характеристики растровых изображений сканирования и результатов натуральных испытаний стандартных образцов, с последующим использованием этих данных при построении и анализе КЭ моделей реальных деформируемых твердых тел.

3. На основе комплекса расчетов точности и сходимости численного решения МКЭ, а также расчетов НДС реальных ДТТ природного происхождения, доказано, что свойство неоднородности их механических характеристик в КЭ модели может быть представлено набором конечных элементов, каждый из которых имеет изотропный материал со своим модулем упругости, а неоднородный (анизотропный) характер материала ДТТ в КЭ модели в целом определяется набором этих конечных элементов.

4. На основе разработанных математических методов моделирования создан комплекс программ интерпретации результатов сканирования, предназначенный для построения и анализа НДС КЭ моделей, с учетом реального изменения структуры механических характеристик деформируемого твердого тела и его геометрии; включая, методы повышения эффективности вычислительного процесса по времени и ресурсам.

Теоретической значимостью результатов диссертационной работы является математическое моделирование с разработкой численных методов и комплексов программ для построения КЭ моделей ДТТ с неоднородностью механических характеристик материала и индивидуальной геометрией на основе интерпретации результатов их сканирования КТ и данных натуральных испытаний.

Достоверность результатов, полученных в ходе работы, определяется построением КЭ моделей и проведением анализа НДС стандартных образцов и реальных ДТТ, с исследованием точности и сходимости численного решения МКЭ, учетом неоднородности структуры механических характеристик и индивидуальности геометрии, при воздействии внешней нагрузки; полученные теоретические результаты согласуются на высоком уровне точности с известными результатами натуральных испытаний.

Практическая значимость и внедрение работы. Предложенный комплекс математических методов моделирования и созданный пакет программ, позволяют определить в ДТТ неоднородность структуры механических характеристик и индивидуальность геометрии, с дальнейшим использованием этих данных для повышения уровня реалистичности их КЭ моделирования и достоверности анализа НДС.

Представленный в работе комплекс математических методов моделирования может быть использован для любых типов материалов и физических принципов сканирования, когда полученная информация сформирована в виде цифрового изображения.

По результатам исследования получен акт о внедрении результатов.

Апробация результатов исследования. Работа выполнялась на кафедре «Теоретическая механика и сопротивление материалов» ИРНИТУ. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: международная научно-практическая конференция «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2015, 2016, 2017, 2018); V и VI научно-практическая конференция «Молодежь. Проекты. Идеи» (Иркутский авиационный завод – ИАЗ, финал ПАО, г. Иркутск, 2015, 2017); всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иркутск, 2015); всероссийская научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2016); VII всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (г. Иркутск, 2017); II Российская научно-практическая конференция "Инженерные технологии MSC Software для высших учебных заведений" (MSC-VUZ-2016), (г. Москва, 2016); XX Российский форум «Компьютерные системы инженерного анализа MSC Software» (г. Москва, Измайлово, 2017); X региональная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в практической стоматологии» (г. Иркутск, 2018).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 научных работах, из них 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК; 1 статья в издании, входящем в базу данных *Scopus*. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 167 наименований, и приложения. Объем работы составляет 182 страницы, 93 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор состояния вопроса, связанного с решением проблемы математического моделирования интерпретации результатов сканирования ДТТ, в виде цифровых (растровых) изображений, используемых при построении КЭ моделей и анализе НДС.

Для данного научного направления, представлено его хронологическое развитие и решаемые проблемы. В качестве примера исследования неоднородности механических характеристик и геометрии ДТТ, рассматривается материал костной ткани человека. Свой вклад в развитие этого научного направления внесли такие ученые как: Кнетс И. В., Утенькин А. А., Чуйко А. Н., Соколов А. К., Симонов Е. Н., Аврамов Д. В., Саулгозис Ю. Ж., Родионова С. С., Макаров М. А., Науменко Л. Ю., Зайцев Д. В., Демидова И. И., Герман Дж. и др.

На основе обзора состояния вопроса и анализа проблем обоснована актуальность работы и поставлена научная задача.

Во второй главе приведены основные математические зависимости интерпретации результатов сканирования реальных ДТТ и данных натурных испытаний для построения КЭ моделей и решения задачи их НДС, реализуемых на основе определенных подходов метода конечных элементов.

Построение КЭ модели ДТТ начинается с его геометрии. При сканировании реальных ДТТ, их геометрия может быть заранее не известна (или ее невозможно измерить с помощью обычных инструментов). В результате сканирования формируется пакет снимков, каждый из которых представляет собой растровое изображение на определенном шаге (рисунок 1). Эти изображения подвергаются предварительной обработке, состоящей в определении для них системы координат, преобразовании в оттенках серого и построении матриц индексов цвета.

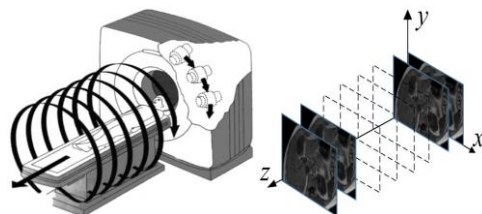


Рисунок 1 – КТ сканирования и полученный пакет растровых изображений сечений

Геометрия сечения ДТТ определяется двумя компонентами: внешним контуром и контурами внутренней структуры материала. Её построение реализуется в двух этапах.

На первом из них, проводится выделение областей с ярко выраженным из-

менением механических характеристик. Оно осуществляется с использованием функций «0-1» и «0-1-2». Целью этого этапа является построение предварительных контуров сечения и определение в них временного центра тяжести.

На втором этапе, относительно предварительных контуров, полученных на первом этапе, проводится уточнение геометрии внешнего контура и контуров внутренней структуры материала в сечении. Для реализации этого этапа используется метод исследования градиентов функции индексов цвета пикселей (рисунок 2) вдоль нормалей предварительного контура. Максимальная величина этого градиента определяет координаты точек уточненного контура (рисунок 3).

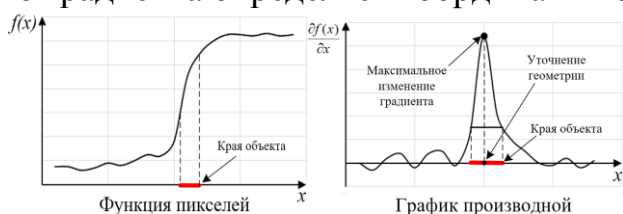


Рисунок 2 – График функции пикселей и её производной

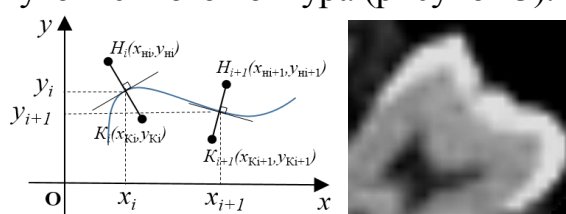


Рисунок 3 – Исследование градиента изменения индексов цвета

Далее, для построения КЭ модели ДТТ, необходимо определиться с механическими характеристиками материала. В настоящей работе, в отличие от существующей практики осреднения, для решения задачи моделирования неоднородности материала используется принцип, построенный на двух составляющих: - пиксельной характеристики растровых изображений сканирования; и - данных натуральных испытаний стандартных образцов.

Определение зависимости механических характеристик, в виде модуля упругости (рисунок 4), от значений индексов цвета осуществляется с использованием специального весового коэффициента, устанавливающего зависимость между средним значением индексов цвета n_{cp} и опытным (экспериментальным) значением $E_{ОП}$. Тогда, весовой коэффициент определяется выражением вида:

$$k_E = \frac{E_{ОП}}{n_{cp}}. \quad (1)$$

Присвоение пикселям значения модуля упругости материала E_i будет производиться по формуле:

$$E_i = n_i k_E. \quad (2)$$

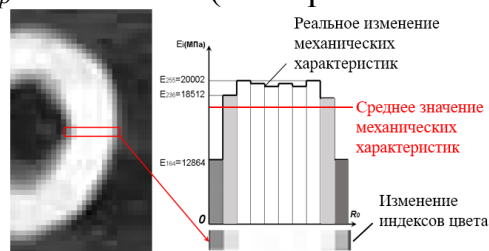


Рисунок 4 – Моделирование реального изменения механических характеристик от значений индексов цвета

Реализация зависимостей (1) и (2), выполняется решением следующих задач: определение среднего и/или среднестатистического значения индексов цвета пакета растровых изображений; определение зависимости механических характеристик (линейной или нелинейной) от значений индексов цвета; определение механических характеристик материала в узлах и в конечных элементах КЭ модели.

Изменение модуля упругости определяется на основе линейной или нелинейной зависимости от значений индексов цвета. Для материала, имеющего не высокую степень неоднородности зависимость может быть построена с использованием линейного закона (2), для идентификации которого используется единственное постоянное значение весового коэффициента модуля упругости. Однако, в природе и технике подобные материалы встречается редко. Чаще

всего, материал ДТТ по механическим характеристикам имеет определенную структуру, в которой можно выделить несколько областей, каждая из которых имеет свой, отличный от других диапазон изменения модуля упругости. Для таких материалов, предлагается в каждой области структуры ДТТ использовать свое значение весового коэффициента. В этом случае, зависимость изменения модуля упругости ДТТ от индексов цвета представляется в виде кусочно-линейной функции (рисунок 5), которая записывается в виде:

$$E_j(n) = \begin{cases} n \frac{E_{опi}}{n_{срi}}, & n \in [n_i, n_{i+1}] \\ 0, & n \notin [n_i, n_{i+1}] \end{cases} \quad (3)$$

Использование кусочно-линейной функции затруднительно с точки зрения эффективности вычислительного алгоритма. Для решения этой проблемы, предлагается использовать нелинейную зависимость, построенную на основе кусочно-линейной функции, в виде сплайна, например, кубического. Представленная процедура имеет универсальный характер для объединения нескольких зон с различным порядком механических характеристик (рисунок 6).

Далее, интерпретация данных сканирования связана с интерполяцией и передачей значений индексов цвета от пикселей к узлам КЭ сетки. Самый сложный и общий случай имеет место, когда узлы КЭ сетки лежат между соседними плоскостями с растровым изображением, имеющими между собой существенные различия по форме и размерам, а также характеризуются появлением в них дополнительных внутренних контуров и других геометрических особенностей. В этом случае, для интерполяции используется ряд математических зависимостей, определяемых относительно прямой, наклонной к оси Z (рисунок 7).

Модуль упругости каждого конечного элемента рассчитывается как среднее арифметическое значение модулей упругости его узлов по формуле:

$$E_i = k_E \frac{\sum_{j=1}^q n_j}{q}, \quad (4)$$

где q – число узлов в элементе ($q = 4, 8$); n_j – индекс цвета j -ого узла; E_i – модуль упругости i -ого конечного элемента; k_E – весовой коэффициент модуля упругости.

Для реализации задачи анализа НДС ДТТ на основе МКЭ используется вариационно-энергетический подход метода перемещений теории упругости, заключающийся в минимизации функционала потенциальной энергии ДТТ.

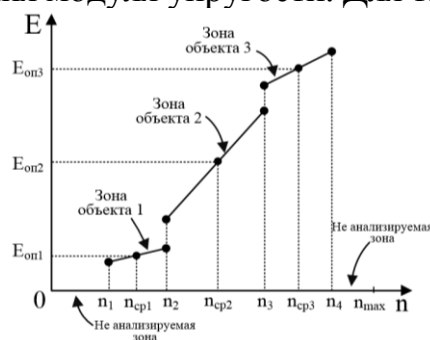


Рисунок 5 – Линейная зависимость модуля упругости от значений индексов цвета

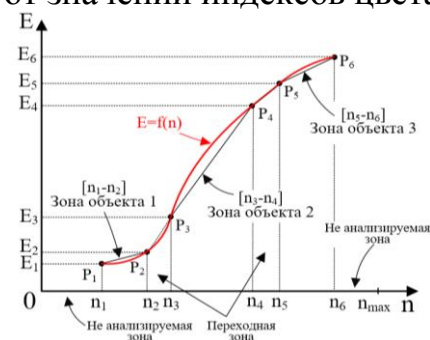


Рисунок 6 – Нелинейная зависимость модуля упругости от значений индексов цвета

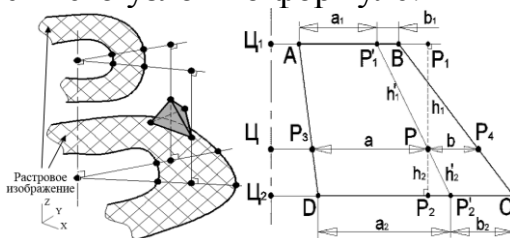


Рисунок 7 – Интерполяция по прямой, наклонной к оси Z

Базисные функции формы используемых типов КЭ построены относительно узлов на основе линейного алгебраического полинома. Дополнительно, для увеличения точности решения используется алгоритм несовместных функций формы, представленный в работе Бате К., Вилсон Е. и реализованный в работе Пыхалова А.А., Милова А.Е.

Кроме того, в работе используется решение контактной задачи теории упругости, построенное на основе минимизации величины невязки (неравенства) вектора контактных перемещений в глобальной системе алгебраических уравнений и метода штрафных функций (неравенство Фредгольма второго рода).

В третьей главе представлен алгоритм решения задачи интерпретации результатов сканирования ДТТ, для определения изменения механических характеристик материала и нерегулярности геометрии, с дальнейшим использованием этих данных при построении КЭ моделей и анализе их НДС. Алгоритм состоит из отдельных блоков и реализован в виде программного комплекса, интегрированного со стандартным программным обеспечением компьютерных технологий инженерного анализа.

Общая структура алгоритма представлена на рисунке 8 и отражает полный комплекс модулей: от сканирования ДТТ, до получения его КЭ модели и проведения анализа НДС.

На рисунке 9 представлен алгоритм модуля построения геометрии (рисунок 8, блок 5), его целью является: построение предварительной геометрии, уточнение геометрии сечения, корректировка центра тяжести. В этом алгоритме, этап уточнения геометрии сечения (рисунок 9, блок 5) проводится по контуру, полученному на предварительном этапе, и построен на основе исследования градиента изменения индексов цвета (рисунок 10).

Модуль определения механических характеристик (рисунок 8, блок 7) материала в узлах и конечных элементах КЭ модели представлен на рисунке 11 в виде блок-схемы алгоритма его реализации.

Для эффективного использования результатов работы модуля в КЭ модели, полученные данные группируются по увеличению модуля упругости и записываются в виде файла структуры *.pcl.



Рисунок 8 – Математическое и КЭ моделирование реальных ДТТ

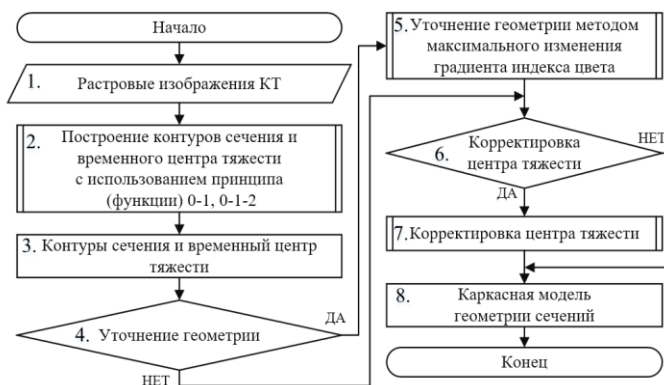


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма построения геометрии сечения реальных ДТТ

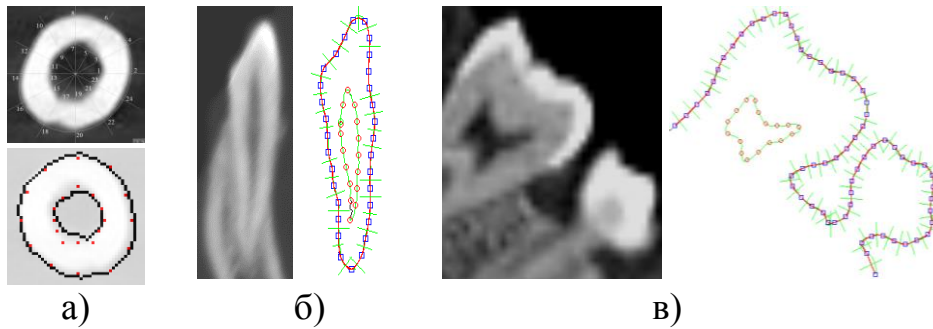


Рисунок 10 – Уточнение геометрии сечения симметричного (а) и произвольного (б и в) вида

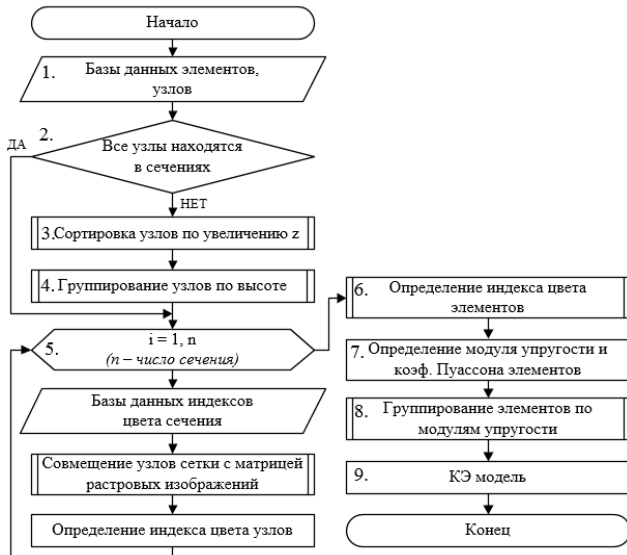


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма определения механических характеристик материала

На рисунке 12 представлены результаты работы алгоритма определения неоднородности механических характеристик материала относительно растрового изображения сканирования (рисунок 12а) фрагмента бедренной кости (рисунок 12б – вид в сечении; рисунок 12в – вид в объемной КЭ модели).

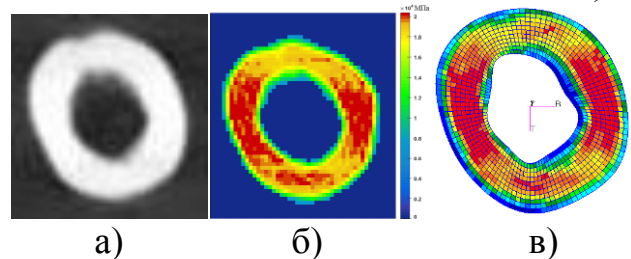


Рисунок 12 – Распределение неоднородности модуля упругости

В четвертой главе представлены исследования точности и сходимости численного решения МКЭ анализа НДС КЭ моделей образцов с учетом неоднородности механических характеристик материала и индивидуальной геометрии.

В первом исследовании используются образцы в форме параллелепипедов, вырезанных (рисунок 13) из фрагмента бедренной кости человека и имеющих реальные прототипы.

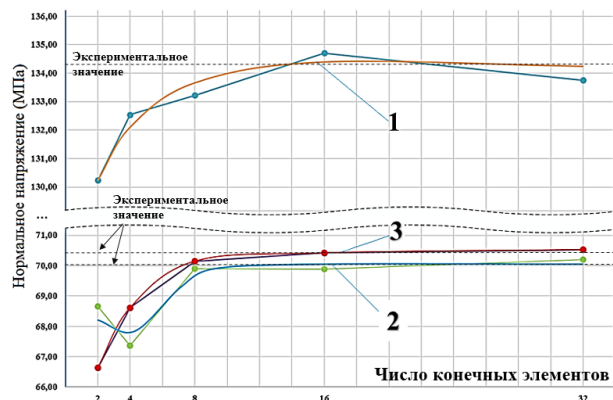
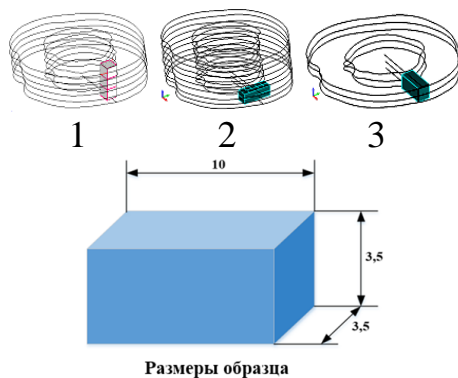


Рисунок 13 – График сходимости нормального напряжения в центре образцов, в направлениях: продольном (1), окружном (2) и радиальном (3)

Результаты этого исследования представлены на рисунке 13 в виде графиков 1; 2; и 3, отражающих зависимость величины нормальных напряжений в

центре образцов, в продольном, окружном и радиальном направлениях, от размеров и, соответственно, количества конечных элементов.

Дополнительное исследование проведено для изучения применимости двух различных типов объемных КЭ (тетраэдр и гексаэдр) с использованием несовместных функций формы (глава 2).

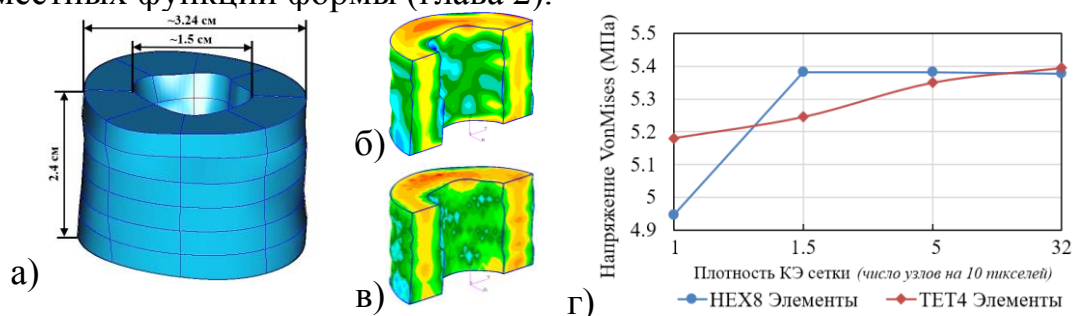


Рисунок 14 – Твердотельная геометрическая модель реального образца (а); результат анализа НДС с применением КЭ типа HEX (б) и TET (в); и график сходимости результатов (г)

Результаты показывают, что КЭ типа гексаэдр имеет лучшие показатели по точности и сходимости результатов (рисунок 14), а также по ресурсным затратам.

В пятой главе проведены построение и анализ КЭ моделей реальных ДТТ, построенных с учетом неоднородности механических характеристик материала и индивидуальной геометрии. В качестве примера исследования используются центральная часть бедренной кости и зубы человека.

Бедренная кость имеет неоднородную структуру механических характеристик. На рисунке 15а представлено поле напряжений в кости при учете этой неоднородности. Можно заметить, что по толщине стенки кости отчетливо определяются напряжения силовой и не силовой её части. На рисунке 15б представлен результат анализа НДС при использовании осредненных механических характеристик, где поле напряжений не отражает фактическое его изменение в бедренной кости в процессе её нагружения.

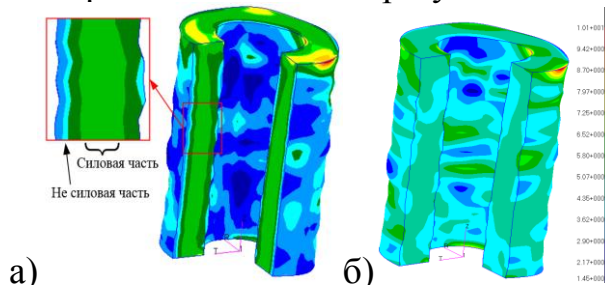


Рисунок 15 – Результат анализа НДС КЭ модели бедренной кости

В качестве более сложного примера исследования, по степени неоднородности механических характеристик материала ДТТ и нерегулярности его геометрии, выбраны реальные зубы человека, расположенные в челюсти. Каркасные модели геометрии, построенные на основе обработки растровых изображений сканирования, представлены на рисунке 16.

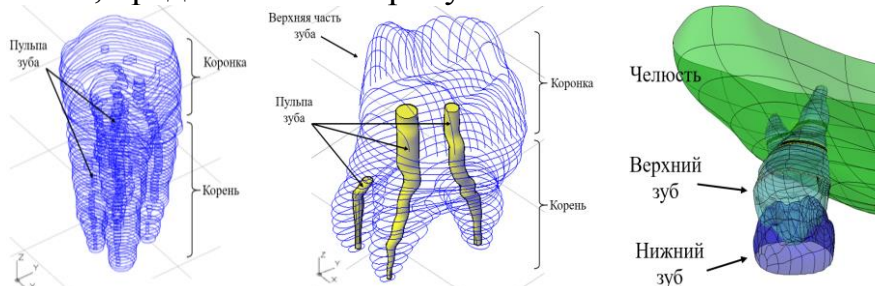


Рисунок 16 – Каркасные модели зубов человека

На рисунке 17, представлена расчетная схема анализа НДС зуба человека в челюсти с граничными условиями и внешней нагрузкой. Кроме этих параметров, на схеме дополнительно представлены условия для решения контактной задачи взаимодействия зубов «без продукта» (рисунок 17а) и «с продуктом» (рисунок 17б).

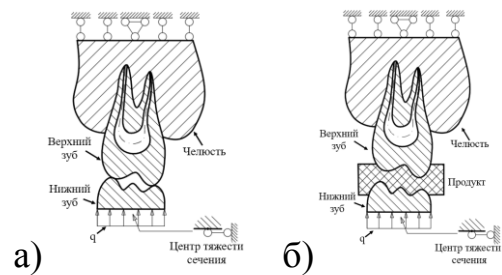


Рисунок 17 – Схема контактного взаимодействия зубов

На рисунке 18 представлен результат сканирования и моделирования реального изменения модуля упругости зуба на растровом изображении сечения (слева) и в трехмерной КЭ модели (справа). Это распределение полностью соответствует известным представлениям о структуре свойств материала зуба и его индивидуальных особенностях.

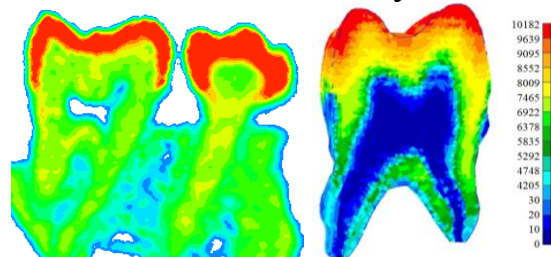


Рисунок 18 – Изменение модуля упругости зуба в сечении и в объемной КЭ модели

Результаты анализа НДС КЭ моделей зубов с учетом моделирования неоднородности механических характеристик материала, представленные на рисунках 19а и б, показывают, что максимумы напряжений в них, при взаимодействии зубов «без продукта» (рисунок 19а) и «с продуктом» (рисунок 19б), наблюдаются в точках контакта на вершинах зубных бугров. Большую часть нагрузки воспринимают эмаль и часть дентина зуба. Пульпа, которая располагается во внутренней части зуба, практически не воспринимает нагрузку. Картина распределения напряжений соответствует реальной работе зуба, когда нагрузка воспринимается эмалью и дентином.

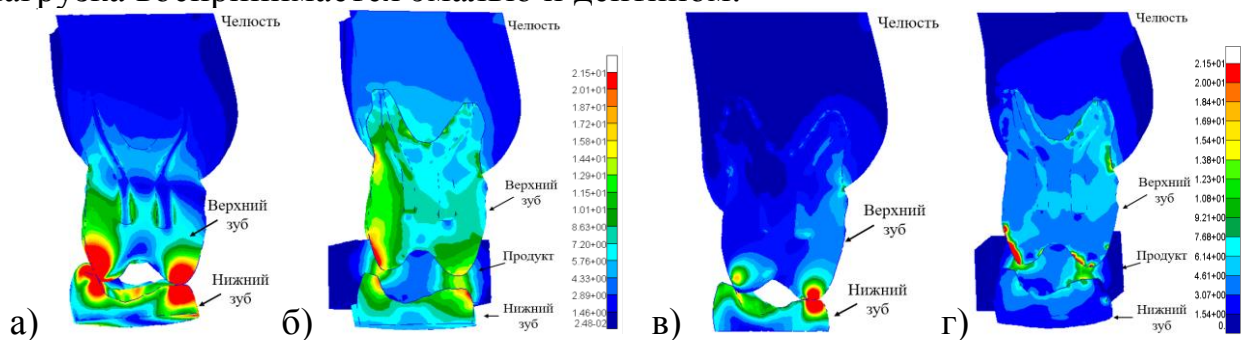


Рисунок 19 – Результаты анализа НДС КЭ моделей зубов с учетом неоднородности механических характеристик материала (а и б) и без учета неоднородности механических характеристик материала (в и г)

На рисунках 19в и г представлены результаты анализа НДС КЭ моделей зубов без учета моделирования неоднородности значений механических характеристик материала (с использованием их осреднения). Результат показывает, что качественная картина НДС имеет определенный уровень достоверности, например, в виде концентрации напряжений в местах контакта между зубами. Однако количественная картина величин напряжений в области зубов не характеризует их работу как некоторую систему деформируемого тела (эмаль – дентин – пористая ткань).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан комплекс математических методов моделирования интерпретации растровых изображений сканирования КТ, позволяющий проводить исследование любых сложных структур реальных ДТТ, результаты которого используются при построении их КЭ моделей с учетом неоднородности в них механических характеристик материала и индивидуальности геометрии.

2. Разработана технология математического моделирования и вычислительного эксперимента: от обработки растровых изображений сечений сканирования ДТТ, до построения и анализа их КЭ моделей. Включая: - построение индивидуальной геометрии сечений ДТТ и его внутренних структур; - определение изменения механических характеристик материала для каждого узла и конечного элемента объемной модели ДТТ в целом.

3. Проведен анализ НДС КЭ моделей тестовых образцов, с доказательством точности и сходимости численного решения МКЭ при моделировании свойства неоднородности механических характеристик материала и геометрии ДТТ. Установлено, что эта неоднородность может быть представлена набором конечных элементов, в каждом из которых используется изотропная структура материала со своим модулем упругости.

4. Построен и проведен анализ НДС КЭ моделей реальных ДТТ, в виде фрагмента бедренной кости и зуба человека, с учетом неоднородности механических характеристик материала и геометрии. Доказаны эффективность и точность использования представленной технологии в реальных условиях работы (проектирования и изготовления) конструкций.

5. Используя разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение, создан комплекс программ интерпретации растровых изображений сканирования КТ деформируемых твердых тел, с дополнительным использованием данных натуральных испытаний, для определения в них неоднородности механических характеристик материала и построения индивидуальной геометрии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания, входящие в Перечень ВАК РФ

1. **Зыонг В. Л.** Исследование точности численного решения методом конечных элементов анализа напряженно-деформированного состояния образцов из костной ткани на основе данных компьютерного томографа и натурального эксперимента / А. А. Пыхалов, В. П. Пашков, В. Л. Зыонг // ВЕСТНИК ИрГТУ. – 2017. – Т.21. – №4. – С. 47–56.

2. **Зыонг В. Л.** Математическое моделирование и автоматизация обработки изображений сканирования твердых деформируемых тел с неоднородными свойствами материала и геометрии для построения их конечно-элементных моделей / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – №2 (54). – С. 30–39.

3. **Зыонг В. Л.** Интерполяция геометрии и неоднородности материала деформируемых тел при построении их объемных моделей методом конечных элементов на основе сканирования компьютерным томографом / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов, С. Р. Татарникова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – №3(55). – С. 10–18.

4. **Зыонг В. Л.** Математическое моделирование для компьютерной обработки сканирования твердых деформируемых тел при построении и анализе их конечно-элементных моделей / А. А. Пыхалов, В. Л. Зыонг, О. П. Белозерцева // ВЕСТНИК ИрГТУ. – 2018. – Т.22. – №3. – С. 93–111.

Издание, входящее в базу данных Scopus:

1. **Зыонг В. Л.** Построение и анализ конечно-элементных моделей неоднородных деформируемых твердых тел на основе сканирования / А. А. Пыхалов, В. Л. Зыонг, В. Г. Толстикова // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2018. – № 4. – С. 106–118. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.10.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. **Зыонг В. Л.** Автоматизации обработки изображений сканирования твердых деформируемых тел для определения изменения модуля упругости и использования при построении их конечно-элементной модели / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов, И. Н. Зотов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2016615938 от 02/06/2016. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2016.

2. **Зыонг В. Л.** Математическое моделирование для автоматизации обработки результатов сканирования деформируемых твердых тел сложной геометрической формы с неоднородными механическими характеристиками для построения их конечно-элементных моделей / А. А. Пыхалов, В. Л. Зыонг // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2017661241 от 06/10/2017. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2017.

3. **Зыонг В. Л.** Математическое моделирование обработки результатов сканирования деформируемых твердых тел для построения геометрии их конечно-элементных моделей / А. А. Пыхалов, В. Л. Зыонг // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2018615239 от 03/05/2018. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2018.

Прочие издания

1. **Зыонг В. Л.** Исследование точности и сходимости численного решения МКЭ относительно результатов натурных испытаний образцов из костной ткани / В. П. Пашков, В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // Сборник трудов Первой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Иркутск, ИрГУПС. – 2015. – С. 37–45.

2. **Зыонг В. Л.** Контроль геометрии и свойств материала в конструктивных элементах, обладающих свойством неопределенности этих характеристик / В. П. Пашков, А. А. Пыхалов, И. Н. Зотов, В. Л. Зыонг // V Научно-практическая конференция: «Молодежь. Проекты. Идеи» - Иркутский авиационный завод (ИАЗ) - финал ПАО. – 2015. – С. 83–89.

3. **Зыонг В. Л.** Алгоритм обработки данных компьютерного томографа при сканировании твердых деформируемых тел для построения их конечно-элементной модели / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы 7-й международной научно-практической конференции – Иркутск, ИрГУПС. – 2016. – Т.2. – С. 839–844.

4. **Зыонг В. Л.** Анализ напряженно-деформированного состояния деформируемых тел при определении из геометрии и свойств прочности материала с

применением данных компьютерного томографа / В. П. Пашков, В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы 7-й международной научно-практической конференции – Иркутск, ИрГУПС. – 2016. – Т.2. – С. 844–849.

5. **Зыонг В. Л.** Разработка КЭ моделей деформируемых объектов с применением алгоритма автоматизации обработки данных компьютерной томографии / В. Л. Зыонг, В. П. Пашков // Всероссийская научно-практическая конференция: «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» - Иркутск, ИрННТУ. – 2016. – С. 13–16.

6. **Зыонг В. Л.** Автоматизация обработки изображений сканирования для моделирования напряженно-деформируемых твердых тел с неоднородными механическими свойствами материала / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // VI Научно-практическая конференция: «Молодежь. Проекты. Идеи» - Иркутский авиационный завод (ИАЗ) - финал ПАО. – 2017. – С. 40–44.

7. **Зыонг В. Л.** Обработка изображений сканирования деформируемых твердых тел сложной формы с неоднородными свойствами материала и геометрии для построения их конечно-элементных моделей / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов, О. П. Белозерцева, В. С. Петрова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы 8-й международной научно-практической конференции - Иркутск: ИрГУПС. – 2017. – Т.2. – С. 822–827.

8. **Зыонг В. Л.** Исследование неоднородности механических характеристик материала и их использование для построения КЭ модели / В. Л. Зыонг, В. П. Пашков // VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием “Жизненный цикл конструкционных материалов” – Иркутск, ИрННТУ. – 2017. – С. 368–371.

9. **Зыонг В. Л.** Исследование уровня неоднородности характеристик материала с помощью компьютерного томографа/ В. Л. Зыонг, В. П. Пашков// Международный журнал ДААД. – Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского. – 2017. – №1. – С. 43–47.

10. **Зыонг В. Л.** Построение конечно-элементных моделей неоднородных деформируемых твердых тел на основе обработки их результатов КТ сканирования / В. Л. Зыонг, А. А. Пыхалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы 9-й международной научно-практической конференции - Иркутск: ИрГУПС. – 2018. – Т.2. – С. 647–651.

11. **Зыонг В. Л.** Проблема конечно-элементного моделирования неоднородных деформируемых твердых тел // Молодежный научный вестник: – Башкортостан, ООО «Вектор науки». – 2018. – №10 (35). – С.178–182.

12. **Зыонг В. Л.** Практика математического моделирования с использованием данных компьютерной томографии в стоматологии / О. П. Белозерцева, А. А. Пыхалов, В. Л. Зыонг и др. // Инновационные технологии в практической стоматологии. – 2018. – С. 86–94.

Подписано в печать 16.04.2019. Формат 60 x 90 / 16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Зак. . Поз. плана 2н.

Отпечатано в типографии Издательства ФГБОУ ВО ИРНИТУ
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.