

В диссертационный совет Д 212.070.07 при ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 24

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Зыонга Вана Лама «**Математическое конечно-элементное моделирование деформируемых твёрдых тел на основе сканирования**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность исследования

При математическом моделировании деформируемых твердых тел (ДТТ) на основе численных методов, в частности, метода конечных элементов (МКЭ), важную роль играют точность параметров механических характеристик материала и индивидуальности геометрии объекта.

Широкий диапазон структуры и геометрии изделий определяются технологическими аспектами их изготовления. Математически конечно-элементная модель (КЭ) неэффективна без идентификации индивидуальной геометрии, которая в работе осуществляется путем сканирования, что обеспечивает точность при математическом КЭ моделировании реальных ДТТ.

В работе рассмотрены специальные математические методы интерпретирующие результаты сканирования ДТТ и их алгоритмизация с целью получения достоверной картины представленных параметров.

Объектом и предметом исследования является ДТТ с неоднородной структурой механических характеристик; в результате разработаны численные методы математического КЭ моделирования неоднородности структуры механических характеристик и индивидуальности геометрии с использованием (КТ) сканирования

Целью исследования является разработка математических методов моделирования, вычислительных алгоритмов и комплексов проблемно-ориентированных программ для интерпретации результатов сканирования ДТТ.

Методы исследования. В работе использовано математическое моделирование реальных ДТТ на основе аналитической геометрии, линейной алгебры и статистических методов. Для получения пиксельной характеристики сканирования ДТТ использовались технологии компьютерного томографа. Для программной реализации использованы среды алгоритмических языков

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 геометрии реальных ДТТ для внешнего контура и внутренней структуры материала с учетом неоднородности их механических характеристик.

2. Разработан численный метод интерпретации характеристик материала ДТТ полученной пиксельной характеристики изображений сканирования и результатов натуральных испытаний стандартных образцов для анализа КЭ моделей твёрдых тел.

3. Доказано, что свойство неоднородности механических характеристик КЭ модели можно представить набором конечных элементов изотропного материала определенного модуля упругости, а неоднородный (анизотропный) характер материала ДТТ в КЭ модели определяется набором конечных элементов.

4. На основе математических методов моделирования создан комплекс программ интерпретации результатов сканирования, предназначенных для построения и анализа КЭ моделей, разработаны методы повышения эффективности вычислительного процесса по времени и ресурсам.

Достоверность результатов определяется построением КЭ моделей и проведением анализа стандартных образцов и реальных ДТТ, с исследованием точности и сходимости численного решения МКЭ, с учетом неоднородности структуры механических характеристик и индивидуальной геометрии. Полученные теоретические результаты при воздействии внешней нагрузки согласуются на высоком уровне точности с известными результатами научных испытаний.

Практическая значимость и внедрение работы.

Представленный в работе комплекс математических методов моделирования может быть использован для любых типов материалов и физических принципов сканирования информации, сформированной в виде цифрового изображения.

По результатам исследования получен акт внедрения результатов.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и межвузовских научных конференциях.

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

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 167 наименований и приложения. Объем работы составил 182 страница, 93 рисунка (5.16) и 22 таблиц.

Оценка содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность исследования, содержание объекта и предмета исследования, изложена цель и методы исследования и сформулирована научная новизна работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе формулируются процедуры исследований процесса при создании математических КЭ моделей ДТТ.

Для обеспечения заданной точности моделирования реальных ДТТ предлагается использование технологии сканирования, в результате которой возможно идентифицировать геометрические параметры, а также определить изменение механических характеристик материала.

Сканирование ДТТ может быть построено на любом физическом принципе (рентгеновский, акустический, радиационный) с помощью цифрового изображения с определенным шагом, которое используется при построении КЭ моделей.

В настоящее время широко используется сканирование компьютерным томографом.

В результате формулируется постановка задачи разработки математических моделей интерпретации растровых изображений сканирования ДТТ для построения и анализа их КЭ моделей.

В работе решаются следующие задачи:

1. Отработка входных данных и настройка КТ при проведении сканирования исследуемого ДТТ.
2. Разработка комплекса математических методов и алгоритмов интерпретации результатов сканирования ДТТ.

3. Разработка методов математического моделирования интерпретации неоднородности механических характеристик материала ДТТ.

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

5. Проведение численного эксперимента на реальных ДТТ природного происхождения.

6. Решение этой проблемы возможно лишь при разработки специального математического моделирования и его компьютерной реализации.

Во второй главе приведены:

- основные математические зависимости аналитической геометрии и линейной алгебры интерпретации растровых изображений сканирования для построения индивидуальной геометрии;

- основные математические зависимости для моделирования неоднородности механических характеристик материала реальных (ДТТ);

- основные математические зависимости МКЭ с использованием вариационно-энергетического принципа метода перемещений теории упругости для анализа НДС КЭ моделей твёрдых тел.

Основными конечными элементами являются гексаэдр (HEX) и тетраэдр (TET), каждый из которых имеет свои преимущества: гексаэдр при построении КЭ модели ДТТ используется чаще, поскольку он более точен при одинаковой размерности; тетраэдр используется для построения КЭ модели ДТТ с высокой степенью нерегулярности геометрии.

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, Вильсон Е и реализованной в работе Пыхалова А. А, Милова А. Е.

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

Результаты математических методов, рассмотренных в данной главе, являются основанием для построения алгоритмов и комплексов программ (глава 3).

В третьей главе разработанные алгоритмы компьютерной реализации интерпретации результатов сканирования позволяют проводить

исследования любых сложных структур ДТТ, результаты которого используются при построении КЭ моделей реальных ДТТ и анализе их НДС.

Разработанный модуль построения геометрии сечения ДТТ на основе обработки результатов сканирования даёт возможность построить внешние и внутренние контуры ДТТ. В результате при построении модели ДТТ создаётся полная картина реального изменения механических характеристик материала в сечении и в объемной модели ДТТ в целом.

Разработанное алгоритмическое обеспечение позволило создать комплекс проблемно-ориентированных программ интерпретации растровых изображений сканирования КТ ДТТ для определения в них неоднородности механических характеристик материала при построении индивидуальной геометрии.

В четвертой главе представлены исследования точности и сходимости с использованием МКЭ для анализа НДС КЭ моделей образцов с учётом неоднородности механических характеристик материала и индивидуальной геометрии.

Результат анализа точности и сходимости решения МКЭ показывает, что в этом варианте комплекс методик и математических методов построения геометрии сечения ДТТ, а также интерполяция свойств материала, позволяет строить КЭ модели для анализа объемного НДС ДТТ с достаточной точностью.

Кроме этого результата, получен и представлен результат о том, что свойство неоднородности механических характеристик материала ДТТ может быть представлено набором конечных элементов, в каждом из которых используется изотропная структура материала со своим модулем упругости. Рекомендуется проводить КТ сканирование ДТТ шагом, равным размеру конечных элементов КЭ модели. Чем меньше шаг сканирования, тем точнее результат интерполяции геометрии сечений и механических характеристик материала. Однако, оптимальный шаг выбирается из условий целесообразности уровня точности моделирования.

Доказано, что КЭ типа гексаэдр, использующий при алгебраической аппроксимации несовместные функции формы, имеет лучшие показатели по точности и сходимости результатов, а также и по вычислительным затратам, в отличие от КЭ типа тетраэдр.

Для наиболее полноценного использования данных сканирования в виде растровых изображений в сечениях, генерацию КЭ рекомендуется проводить в три этапа:

- генерация сетки в сечении растрового изображения с использованием плоских КЭ;

- генерация сетки объемных КЭ на основе сетки плоских КЭ;
- удаление плоских КЭ, без удаления узлов, которые одновременно являются узлами объемных конечных элементов.

В пятой главе проведены построение и анализ КЭ моделей, реальных ДТТ с неоднородностью механических характеристик материала и произвольной (индивидуальной) геометрической формой.

В качестве примера исследования реальных ДТТ используются объекты из костной ткани человека в виде фрагмента бедренной кости и зуба человека.

Интерпретация растровых изображений реальных ДТТ, в виде фрагмента средней части бедренной кости и зубов человека, полученных сканированием компьютерным томографом, позволяют реализовать возможность определения индивидуальной геометрии и изменения механических характеристик неоднородных материалов в любой точке их объёма, необходимых для построения КЭ модели.

Результаты решения контактной задачи взаимодействий ДТТ, в данной главе, подтверждают точность и надёжность применения представленной технологии сканирования при моделировании реальных ДТТ с учетом неоднородности механических характеристик материала и индивидуальной геометрии. На этой основе доказывается повышение точности КЭ модели относительно реального объекта.

Для построения геометрии ДТТ, имеющей повышенный уровень сложности, включая индивидуальность геометрии и неоднородность структуры материала, используется подход дополнительного сканирования с изменением его направления, что повышает эффективность разработанной технологии обработки материала и геометрии.

Реализация технологии интерпретации результатов сканирования, при построении КЭ моделей ДТТ для достижения необходимого уровня точности и эффективности, осуществляется с использованием специального комплекса программ, построенного на основе математических методов и алгоритмов, представленных в главах 2 и 3, включая процессы сортировки и упаковки данных, что сокращает время обработки данных и анализа.

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

В конце работы представлены выводы по работе, включающие 5 пунктов. Все выводы достоверны и базируются на материалах исследований, представленных в диссертационной работе.

Дискуссионные положения и замечания

1. Излишне подробно изложен материал исследования во второй главе (например: пункты 2.1.3; 2.1.4; 2.2.4; 2.3)

2. Не выделены экспериментальные исследования и программы, выполненные лично автором.

3. В работе отсутствует метод оценки точности при использовании линейной и нелинейной функций зависимости модуля упругости от значений индексов цвета растрового изображения сканирования. В работе не указано в каком конкретном случае лучше используется нелинейная функция представленной зависимости.

Указанные замечания не снижают качества и уровня исследования. Диссертационная работа выполнена грамотно, исследования методически и научно глубоко проработаны, что позволило решить актуальную научную задачу.

Заключение

Диссертация Зыонг Ван Лам является законченной научно-исследовательской работой, содержащей новые решения задачи, имеющей важное теоретическое и практическое значение.

Автореферат полностью отражает материалы диссертации.

Тематика и содержание работы соответствуют специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Считаю, что диссертация Зыонг Ван Лам «Математическое конечно-элементное моделирование деформируемых твердых тел на основе сканирования» отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а её автор Зыонг Ван Лам заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,

доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика и прикладная математика» ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»

Дом адрес: 665709, г. Братск, Иркутской обл., ул. Приморская, ба, кв 15, с. Т.
89500541120, E-mail iipm@brst.ru

Подпись Алпатова Юрия Никифоровича

Заверяю

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»

Почтовый адрес: 665709 Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, 40

E-mail: iipm@brstu.ru.

И. С. Ефимолина