

В диссертационный совет  
Д 212.070.07  
ФГБОУ ВО «Байкальский  
государственный университет»



«УТВЕЖДАЮ»  
Ректор ФГБОУ ВО «Восточно-  
Сибирский государственный  
университет технологий и управления»  
доктор экономических наук, профессор

 В.Е. Сактоев

« 20 » 05 2019 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Зыонг Ван Лам**  
«Математическое конечно-элементное моделирование деформируемых твердых тел на основе сканирования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### 1. Актуальность темы диссертационной работы

Работа посвящена решению актуальной задачи – разработке математических методов моделирования, вычислительных алгоритмов и комплексов проблемно-ориентированных программ, предназначенных для интерпретации результатов сканирования реальных деформируемых твердых тел (ДТТ), с получением результатов в виде структуры механических характеристик материала и геометрии, с последующим использованием этих данных при построении и анализе напряженно-деформируемого состояния (НДС) их конечно-элементных (КЭ) моделей.

В современных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах все активнее развивается практика математического моделирования объектов методом конечных элементов (МКЭ), который позволяет решать широкий спектр задач и, в частности, эффективно проводить анализ НДС твердых тел. Представленная работа направлена на развитие математического моделирования для получения КЭ модели ДТТ максимально соответствующей реальному объекту, что напрямую зависит от задания в модели геометрических параметров и механических характеристик материала. Эти параметры в современной практике инженерного анализа предполагают допущения, вызванные их назначением в виде некоторой средней величины, что, в итоге, оказывает влияние на точность результатов анализа математической модели относительно реального объекта. Чаще всего, механические характеристики ДТТ определяются на основе натуральных испытаний стандартных образцов и эти данные используются для всей КЭ модели деформируемого тела. Проблема заключается в том, что в



изделии, в пределах объема его деталей, наблюдается существенная неоднородность механических характеристик материала. Упрощение моделирования этих неоднородностей могут привести к неточной оценке надежности и долговечности работы изделий.

Для решения этой проблемы в диссертационной работе предлагается использовать технологию сканирования ДТТ, которая дает возможность распознавания в них изменения механических характеристик материала и геометрии, а главное, применять эти данные для повышения точности и реалистичности КЭ моделирования.

## 2. Структура и содержание работы

Диссертация 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.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена 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. 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 относительно данных натурных испытаний для построения КЭ моделей, а также, для решения задачи их НДС; также, представлены зависимости объемных моделей метода конечных элементов реализуемые с решением контактной задачи теории упругости.

*В третьей главе* приведен разработанный алгоритм решения задачи интерпретации результатов сканирования ДТТ, включающий этапы:

- предварительная обработка результатов сканирования;
- построение и уточнение геометрии сечения на основе исследования изменения градиента индексов цвета; векторизация геометрии сечение в системе проектирования;

- определение зависимости модуля упругости от значений индексов цвета растровых изображений сканирования, в виде линейной, кусочно-линейной и нелинейной зависимости;

- определение неоднородности механических характеристик материала деформируемого твердого тела в КЭ модели в целом.

*В четвертой главе* представлены исследования точности и сходимости численного решения МКЭ анализа напряженно-деформируемого состояния КЭ моделей образцов с учетом неоднородности механических характеристик материала и индивидуальных параметров геометрии.



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

### **3. Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс методов математического моделирования интерпретации индивидуальной геометрии реальных деформируемых твердых тел, как для внешнего контура, так и контуров внутренней структуры материала.

2. Разработан численный метод интерпретации механических характеристик материала деформируемых твердых тел относительно пиксельной характеристики растровых изображений сканирования и результатов натурных 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 анализа НДС КЭ моделей реальных деформируемых твердых тел, доказано, что свойство неоднородности их механических характеристик может быть представлено набором конечных элементов, каждый из которых имеет изотропный материал со своим модулем упругости.

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

### **4. Значимость для науки и рекомендации по использованию полученных результатов**

Разработанный комплекс математических методов моделирования и созданный пакет программ позволяют проводить исследование любых сложных структур реальных деформируемых твердых тел, результаты которого используются при построении их КЭ моделей с учетом неоднородности в них механических характеристик материала и индивидуальности геометрии. Также, представленный комплекс может быть использован для любых типов материалов и, в частности, композитных материалов, а также физических принципов сканирования, когда полученная информация сканирования сформирована в виде цифрового изображения.

На основе результатов исследования точности и сходимости численного решения МКЭ при моделировании свойства неоднородности механических характеристик материала и геометрии ДТТ, а также результатов построения и анализа напряженно-деформируемого состояния КЭ моделей реальных деформируемых твердых тел, доказана эффективность использования



представленного математического моделирования, повышение уровня реалистичности напряженно-деформируемого состояния КЭ моделей.

### **5. Замечания по диссертационной работе и автореферату**

1. В первой главе имеется возможность уменьшить содержание.
2. Отсутствует метод определения шума на изображении, а также метод исправления этого шума изображения при сканировании КТ (раздел 2.1.1). Не указано, когда имеется возможность удаления шума изображения: в процессе сканирования, или только после получения результатов сканирования.
3. Необходимо подробнее интерпретировать нелинейную зависимость модуля упругости от значений индексов цвета растровых изображений сканирования на примере композитного материала.
4. Представлены подробно основные зависимости МКЭ при реализации вариационно-энергетического подхода метода перемещений теории упругости для рассматриваемой деформируемой системы, но, к сожалению, не указано чем определяется эффективность использования несовместных функций формы при построении и анализе КЭ моделей реальных деформируемых твердых тел с использованием результатов их сканирования.
5. В третьей главе имеются излишние подробности математических зависимостей, которые частично дублируются с материалом главы 2.
6. В разделе 3.2.2 и в разделе 4.3 необходимо визуализировать плотности сетки КЭ относительно размеров пикселей растрового изображения сканирования, что необходимо для анализа соотношения этих размеров.

### **6. Заключение**

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Зыонг Ван Лам выполнена на научном уровне и представляет собой завершённую, самостоятельно выполненную научно-квалификационную работу на актуальную тему по специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а именно: 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».

На основании вышеизложенного считаем, 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 ее автор Зыонг Ван Лам заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв и диссертационная работа Зыонг Ван Лам обсуждены и утверждены на расширенном заседании кафедры «Сопротивление материалов» с участием преподавателей кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», протокол № 9 от «14» мая 2019 г.

Председатель заседания  
зав. кафедрой «Сопротивление материалов»  
ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный  
университет технологий и управления»  
доктор технических наук, профессор



Л.А. Бохоева

Сведения о ведущей организации:  
ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный  
университет технологий и управления» (ВСГУТУ)  
670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1  
тел.: (3012) 43-14-15; e-mail: office@esstu.ru  
официальный сайт: <https://www.esstu.ru/index.htm>

