

О Т З Ы В

официального оппонента Гаврюшина Сергея Сергеевича
на диссертационную работы ГЕРАСИМОВА Олега Владимировича
«Моделирование деформирования образцов из негетомогенных материалов по данным компьютерной томографии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

1. Оценка актуальности диссертационной работы.

Диссертационная работа Герасимова О.В. посвящена актуальной для расчетной практики проблеме - экспериментальному определению параметров и разработке математического аппарата необходимого для проведения анализа поведения объектов из негетомогенных и композиционных материалов.

В работе поставлена цель создания метода расчёта и оценки напряжённо-деформированного состояния по данным компьютерной томографии образцов из негетомогенных материалов, находящихся под действием внешних нагрузок.

Используемые в настоящий момент для проведения этих операций трудоемкие и дорогостоящие методы натуральных экспериментов обладают рядом недостатков и в ряде случаев не позволяют проводить моделирование с учётом распределения структурных особенностей материала и оценивать его прочностные характеристики. Перспективным подходом к моделированию образцов на основе данных с изображений выступает гомогенизация исследуемой области. Учитывая вышеизложенное, разработка нового альтернативного способа анализа механических свойств негетомогенных материалов, основанного на методе прямого учёта механических свойств среды по данным с изображений, представляет собой важную практическую задачу, что позволяет сделать вывод об **актуальности** темы диссертационной работы.

2. Структура, объем и краткое содержание работы.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 276 наименований и 5 приложений. Полный объём диссертации составляет 181 страницу, включая 79 рисунков и 6 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, излагается научная новизна и положения, выносимые на защиту. Обосновывается теоретическая и практическая значимость работы, подтверждается достоверность полученных результатов, устанавливается личный вклад автора представленной работы.

В первой главе приводится обзор современного состояния исследований в области моделирования образцов из негетомогенных материалов. Определяется необ-

ходимость разработки новых подходов к вычислению прочностных свойств образцов. В качестве исследуемых структур могут рассматриваться композиты и многосвязные пористые объекты. Отмечается, что натурные эксперименты не позволяют в полной мере решить проблему определения свойств материала, так как могут привести к значительному разбросу в оценке физико-механических свойств материала. Приводятся основные сведения о методах неразрушающего контроля, которые могут эффективно использоваться для разработки методов численного моделирования. Таким образом, объективно существующий пробел в области разработки методов оценки механических параметров неомогенных материалов определяет новизну исследований, а трудоёмкость существующих подходов является причиной развития способов применения изображений в численных расчётах. Автором излагается концепция разрабатываемого метода, основанная на применении «расширенного» метода конечных элементов, позволяющего учитывать неоднородность материала, связанную с наличием в нём пор, включений и трещин. Для математического описания автор вводит в рассмотрение построение конечного элемента сплошной среды на основе метода прямого учёта данных с изображений соответствующей ему области, позволяющего учитывать неоднородное распределение структурных характеристик материала. В качестве одного из объектов, для которых задача описания механических параметров стоит наиболее остро, автор отмечает трабекулярную структуру костной ткани.

Вторая глава посвящена вопросам численного моделирования по данным с изображений образцов. В первую очередь рассматриваются диагностические способы получения цифрового двойника объекта, в основе которых лежат интерпретация исходного массива данных и препроцессорная обработка значений. Приводится описание рентгеновской компьютерной томографии, в результате проведения которой формируется массив значений, характеризующий проницаемость материала в соответствующем микрообъёме среды (вокселя). На основе использования шкалы Хаунсфилда полученные величины пересчитываются в механические параметры среды. Рассматриваются определяющие соотношения, описывающие построение по данным с изображений гексагонального восьмиузлового трёхмерного изопараметрического конечного элемента. В каждой точке пространства сохраняется связь между напряжениями и деформациями, соответствующая модели линейно упругого тела. На основе шкалы Хаунсфилда устанавливается связь между оптической плотностью и механическими параметрами материала. На основе найденных узловых перемещений вычисляется напряжённо-деформированное состояние, которое локально усредняется по объёму. Отдельно рассматривается задача построения конечно-элементного ансамбля, основанного на применении неортогональных и ортогональных сеток. Также

приводится описание методики восстановления механических параметров материала на основе результатов вычислительных и натуральных экспериментов. Используемые в работе модели материала предполагают линейную зависимость полученного решения от величины прикладываемого воздействия, что позволяет определять на основе результатов натурального эксперимента соотношение между действительной величиной возникающего усилия и моделируемой по данным компьютерной томографии.

Третья глава посвящена анализу результатов, исследованию сходимости представленного метода, а также валидации методики на основе проведения натуральных испытаний. В первой части излагается общая постановка задачи и основные соотношения механики деформируемого твёрдого тела. Сходимость метода интегрирования проверялась на основе исследования влияния размера исходного изображения и геометрии расчётной области. Оценка сходимости конечно-элементного ансамбля выполнялась на основе нагружения стержня квадратного поперечного сечения с одним характеристическим размером, варьируя количество конечных элементов, принадлежащих расчётной области. Использование бинаризации исходного массива при численном моделировании костной ткани основывалось на предположении, что структурное распределение материала оказывает большее влияние на анизотропию свойств, чем изменение механических параметров. Сходимость предложенного в данной работе подхода исследовалась на основе оценки влияния весовой функции на примере двумерной постановки задачи. Исследование влияния равномерного заполнения материалом некоторой области на жёсткость образованной неомогенной среды проводилось на основе моделирования изображения, соответствующего двухфазному веществу, предполагающему наличие упругого материала и пустоты, описывающей поры, влияние возникающих сил реакции в которых пренебрежительно мало. Оценка влияния неравномерного распределения материала проводилась воссозданием полости, нарушающей симметрию механических свойств относительно оси приложения сжимающей нагрузки. В качестве экспериментальных образцов рассматривались кости конечностей крыс и свиней. Механические свойства костной ткани соответствовали линейно-упругому материалу. При решении модельных задач использовались данные компьютерной томографии диафиза бедренной кости крысы и образец плечевой кости минипига. Сравнительный анализ с данными натурального эксперимента проводился на основе вычисления эквивалентного усилия в области приложения кинематического нагружения. Валидация предложенной методики выполнялась на основе моделирования разных видов костей.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложениях 1 - 4 приведены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В приложение 5 вынесен ряд диаграмм.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в научных публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

3. Оценка новизны исследований и полученных результатов.

Представленная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твердого тела» и посвящена разработке математических моделей и экспериментальному определению параметров негетогенных и композиционных материалов для проведения анализа поведения объектов, что соответствует пунктам 1, 2, 4, области исследований:

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

2 Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой.

4 Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов.

Сопоставление с достигнутым в настоящее время уровнем исследований в этой области позволяет отметить следующие новые положения и результаты работы, обладающие признаками научной новизны.

1. Сформулирована и реализована методика оценки физико-механических характеристик негетогенных материалов по данным компьютерной томографии, позволяющая проводить оценку напряжённо-деформированного состояния неоднородных объектов.

2. Разработан и программно реализован алгоритм расчёта образцов из негетогенных материалов методом конечных элементов на основе данных компьютерной томографии.

3. Получены новые результаты решения задач вычислительной механики деформируемого твёрдого тела, основанные на обработке данных компьютерной томографии.

4. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Научные положения, лежащие в основе диссертационной работы, базируются на классических положениях математики и механики, соблюдении основных принципов построения математических моделей исследуемых физико-механических процессов.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректностью сформулированных задач, обоснованностью принятых допущений, устойчивой работой разработанного про-

граммного обеспечения, соответствием результатов численных экспериментов с экспериментальными результатами.

5. Практическая значимость работы.

1. Разработан метод численного учёта пространственного распределения свойств материала, полученного на основе данных с изображений, позволяющий прогнозировать поведение объектов из негомогенных и композиционных материалов и определять их напряжённо-деформированное состояние.

2. Предложен метод полуавтоматического восстановления расчётной геометрии образцов на основе пространственного распределения материала, позволяющий с заданной точностью выполнять сегментацию выделенного объёма, который может быть эффективно применен для анализа свойств костных органов в клинической практике.

3. Представленный метод оценки упругих констант негомогенных материалов рекомендуется при исследовании образцов неоднородной структуры для определения механических свойств образующей ткани.

6. Апробация диссертационной работы.

Основные положения работы представлены в 4 рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами цитирования, в том числе рекомендованных ВАК РФ для публикации по направлению механика деформируемого твёрдого тела. Положения диссертационной работы докладывались на 17 международных и 5 всероссийских конференциях и семинарах по профилю механики деформируемого твёрдого тела.

7. Замечания по диссертации.

1. Одним из центральных допущений, лежащих в обосновании использования бинарного подхода, является предположение о большем влиянии распределения материала, чем его свойств (стр. 48). Так, для описания свойств трабекулярных костей автор выделяет только две фазы материала, что по мнению оппонента существенно снижает общность методики. Тем более, что в третьей главе дается подробная информация о строении исследуемых костных тканей, содержащих плотную ткань — надкостницу, и губчатую кость, содержащую поры.

2. В 1970 году В. И. Лоциловым, Г. А. Николаевым, Э. П. Бабаевым зарегистрировано научное открытие "Явление возникновения собственных напряжений в костях человека и животных", о котором автор не упоминает хотя по мнению оппонента, оно имеет непосредственное отношение к рассматриваемой в работе проблеме.

3. В тексте диссертации нет разъяснений как вводятся и как соотносятся между собой координатные системы, используемые для описания конечно-элементной

модели (глобальная система координат, локальная система координат изопараметрического представительного элемента).

4. В соотношениях (2.10-2.13) используется «вектор глобальных координат точки $\{r\}$ » вызвавший у оппонента недоумение. Это функциональный вектор или дискретный? Поскольку речь идет о построении конечного элемента, то это дискретная величина, но если величина дискретная, то нужно, во избежание путаницы, уточнить: В какой точке она вычисляется, в узле или в центре вокселя?

5. Излагаемая автором последовательность расчета механических свойств конкретизируется недостаточно четко, и сводится к описанию различных приемов. Один из них основан на эмпирическом задании физических констант. Учитывая, что эмпирика основана на количественной шкале рентгеновской плотности Хаунсфилда, остается неясным как задаются характеристики анизотропии.

6. В работе имеются опечатки и неточности, так в трехмерном восьмиузловом элементе поле перемещений характеризуется автором как линейное (?!).

7. Требуется пояснения процесс вычисления матрицы жесткости (стр. 53), поскольку в тексте не конкретизируется, как соотносятся между собой размер представительного конечного элемента с размером вокселя томографического изображения. Учтен ли эффект изопараметрического преобразования для отдельного вокселя в «методе средних прямоугольников», используемом автором для интегрирования?

8. Имеются замечания по изложению материала. Диссертация содержит три главы. По мнению оппонента материалы 3-ей главы, посвященные программной реализации алгоритма и материалы этой же главы, посвященные экспериментальным исследованиям, следовало бы разделить на отдельные главы. Содержание работы и последовательность изложения материала недостаточно четко структурированы, что мешает читателю разобраться с основными положениями предлагаемой автором методики. Автор многократно отсылает читателя к работам других ученых и перечисляет способы и приемы, имеющие отношение к рассматриваемой проблеме, но не нашедшие применения в алгоритме автора. Более четкое и последовательное изложение материала несомненно сыграло бы в пользу автора.

Высказанные замечания не снижают ценность представленной работы и в определенной мере носят дискуссионный характер, отражая понимание изложенной проблемы оппонентом.

8. Основные результаты.

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 печатных работах, в том числе: 4 - в периодических научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 4 - в статьях, включенных в список периодических изданий, реко-

мендованных ВАК РФ. Соискатель является соавтором 4 зарегистрированных программ для ЭВМ.

9. Общее заключение по работе.

Приведенные замечания не снижают общей ценности работы. Представленная к защите диссертация является законченной, актуальной научно-квалификационной работой, а ее тема соответствует заявленной специальности.

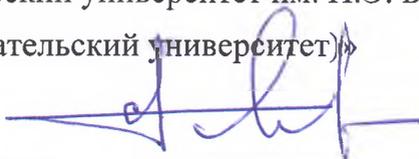
Полученные в диссертации результаты исследования обладают научной новизной, представляют как научный, так и практический интерес. Выносимые на защиту положения прошли достаточную апробацию.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твердого тела» (физико-математические науки), отвечает требованиям положения «О порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

Автор диссертации, **Герасимов Олег Владимирович**, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Компьютерные системы
автоматизации производства ФГБОУ ВО «Московский
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»



Гаврюшин Сергей Сергеевич
«16» сентября 2024 г.

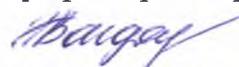
Контактные данные:

Тел.: 7(499) 263 66 39, e-mail: gss@bmstu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Адрес места работы: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, стр.1
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Подпись сотрудника МГТУ им. Н.Э. Баумана
профессора Гаврюшина С.С. удостоверяю:

 **БОНДАРЕНКО И.В.**, 16.09.2024
С отзывом ознакомлен, 16.09.2024 

