



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»  
(СГУ)**

Астраханская ул., д. 83, г. Саратов, Россия, 410012  
Тел. (845-2) 26-16-96, факс (845-2) 27-85-29  
E-mail: rector@sgu.ru, http://www.sgu.ru  
ОКПО 02069177, ОГРН 1026402674935  
ИНН/КПП 6452022089/645201001

Astrakhanskaya Street, 83, Saratov, Russia, 410012  
tel: 7(845-2) 26-16-96, fax: 7(845-2) 27-85-29  
E-mail: rector@sgu.ru, http://www.sgu.ru

04.09.2024 № 3/3727  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе и цифровому  
развитию Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Саратовский  
национальный исследовательский  
государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского»,  
профессор А.А. Короновский



(подпись)

« 09 » 09 2024 г.  
(дата)

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Герасимова Олега Владимировича  
«Моделирование деформирования образцов из неомогенных материалов по данным  
компьютерной томографии», представленную на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого  
твёрдого тела»

**Актуальность работы**

Одним из актуальных исследовательских направлений механики деформируемого  
твёрдого тела выступает разработка методов описания свойств получаемых моделей и  
использования их для прогнозирования поведения элементов среды, подверженных  
воздействию внешних нагрузок. В этом случае проведение натуральных экспериментов

1

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

« 13 » 09 2024 г.

применяется для валидации разрабатываемых подходов и в ряде случаев оказывается трудоёмким процессом, что объясняется уникальностью структуры исследуемых образцов и сложностью её воспроизведения.

Методы неразрушающего контроля получили наибольшее распространение при исследовании сложных анизотропных материалов: применение данных с изображений элементов среды позволяет восстанавливать распределение механических свойств в пространстве. Данный подход оказывается применимым как по отношению к композитным материалам, так и к объектам биологического происхождения (костная ткань). Таким образом, численное моделирование по данным цифрового двойника объектов позволяет проводить гомогенизацию исследуемой области с целью определения усреднённых характеристик материала.

Существующие на данный момент подходы не в полной мере решают вопрос сегментации исходной области и в основном направлены на изучение относительно тривиальной топологической структуры.

В диссертационной работе Герасимова Олега Владимировича предложен новый метод, основанный на прямом учёте распределения механических свойств материала по данным с изображений исследуемых объектов. Он предполагает численное моделирование методом конечных элементов, в котором построение отдельного конечного элемента выполняется исходя из данных с изображений соответствующего ему подобъёма среды. Применение такого метода учёта пространственного распределения свойств материала позволяет использовать в качестве исходных данных компьютерную томографию образцов, выбирая в качестве показателей механических параметров материала значения проницаемости среды в текущем микроэлементе объёма. Дискретизация расчётной области в этом случае предполагает процесс восстановления геометрии и топологической структуры образца на основе построения регулярной сетки с последующим исключением конечных элементов с низким содержанием упругого вещества. Таким образом, актуальность и своевременность предложенного в диссертационной работе метода не вызывает сомнений.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа изложена на 181 странице, 79 рисунков и 6 таблиц, и 30 страниц библиографии, содержащей 276 наименований.

Во **введении** определяется актуальность выполняемых в данной работе исследований, приводится литературный обзор, ставится цель, формулируются задачи, излагаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описываются методология и методы исследования, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, подтверждается апробация работы, указываются основные публикации по теме диссертации, обозначается личный вклад автора работы.

**Первая глава** направлена на изучение современного состояния проблемы в области моделирования образцов из негетомогенных материалов. Приводится обзор научной литературы, раскрывающий вопросы применения методов неразрушающего контроля в расчётах. Существующий в настоящее время набор задач механики деформируемого твёрдого тела показывает, что проведение натуральных экспериментов не позволяет в полной мере решить проблему определения механических свойств негетомогенных материалов, что приводит к существенной разнице в результатах вычислений. Таким образом, новизна темы диссертационной работы Герасимова Олега Владимировича обуславливается отсутствием разработанных методов оценки механических параметров элементов из негетомогенных материалов, что также определяет перспективу развития подходов к применению изображений в численных расчётах.

**Вторая глава** определяет основные соотношения численного моделирования по данным с изображений исследуемой области. В главе рассматриваются методы построения цифрового двойника объектов, предполагающие интерпретацию исходного массива значений и препроцессорную обработку данных. В качестве исходных изображений элементов среды выступали данные рентгеновской компьютерной томографии, позволяющие получать информацию об усреднённой проницаемости материала с точностью до отдельного микрообъёма среды (вокселя). Проведение нормировки полученных значений согласно шкале Хаунсфилда позволяет использовать их для вычисления механических параметров среды. Далее во второй главе описываются определяющие соотношения для построения конечно-элементной сетки по данным компьютерной томографии расчётной области. В качестве конечного элемента использовался восьмиузловой изопараметрический конечный элемент с линейной аппроксимацией. Интегрирование локальной матрицы жёсткости для каждого конечного элемента выполнялось с учётом пространственного распределения материала согласно обработанным данным компьютерной томографии. Материал предполагался кусочно-однородным, состоящим из двух фаз среды, в силу чего исходные данные с изображения бинаризовались по заданному порогу. В качестве метода интегрирования использовался метод средних прямоугольников, размер шага в котором определялся разрешающей способностью компьютерного томографа. Другой задачей второй главы выступало построение конечно-элементного ансамбля, предполагающее учёт пространственного распределения материала: конечные элементы с низким содержанием упругого вещества исключались из исходной регулярной сетки. Заключительным разделом выступала формулировка основных соотношений для восстановления механических параметров материала на основе данных вычислительных и натуральных экспериментов, предполагающих линейную зависимость полученного решения от величины прикладываемой нагрузки.

**Третья глава** направлена на анализ результатов и исследование сходимости представленного в диссертационной работе метода. Проводится валидация метода на основе результатов натуральных экспериментов. В третьей главе выполняется общая постановка задачи, в рамках которой определяются основные соотношения механики деформируемого твёрдого тела. Сходимость метода интегрирования устанавливалась на

основе анализа влияния разрешения исходного изображения. Оценка сходимости конечно-элементного ансамбля выполнялась путём варьирования степени дискретизации расчётной геометрии относительно характеристического размера. Исследование влияния неоднородного пространственного распределения материала проводилось на основе заданной структуры материала, позволяющей выполнять расчёты как аналитически, так и в пакетах прикладных программ методом численного моделирования. Модельные задачи включали натурные образцы костей конечностей лабораторных крыс и карликовых свиней. В этом случае предполагалось, что костная ткань может быть представлена в виде двухфазной среды, соответствующей твёрдому веществу и материалу в порах. Таким образом, восстановление расчётной геометрии и построение численной модели выполнялось на основе бинаризованных данных компьютерной томографии образцов. Валидация предложенного в диссертационной работе метода также проводилась на основе сопоставительного анализа результатов вычислительных и натуральных экспериментов для образцов экспериментальной группы, соответствующих идентичным лабораторным испытаниям.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

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

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в научных публикациях автора. Выводы по диссертации полностью согласуются с основным содержанием работ.

Отражённые в диссертации Герасимова Олега Владимировича положения соответствуют паспорту специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела» по пунктам 1 – Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых, 12 – Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела, 13 – Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат логично структурирован, содержит сжатое изложение основных наиболее важных результатов работы. Все разделы автореферата соответствуют материалам диссертации, её основным положениям и выводам.

### **Научная новизна исследования**

В диссертационной работе Герасимова Олега Владимировича получены следующие новые научные результаты:

1. Реализован новый метод расчёта образцов из негетомогенных материалов по данным компьютерной томографии, позволяющий определять напряжённо-деформированное состояние тел в условиях действия внешних нагрузок.
2. Получены основные математические соотношения, определяющие методику взвешенного интегрирования локальной матрицы жёсткости конечного элемента сетки.
3. Реализована новая методика восстановления расчётной геометрии образцов на основе учёта пространственного распределения материала.
4. Разработан новый алгоритм и его программная реализация для расчёта образцов из негетомогенных материалов методом конечных элементов по данным компьютерной томографии.
5. Получены новые результаты решения задач вычислительной механики деформируемого твёрдого тела, предполагающие применение данных с изображений образцов.
6. Разработана и реализована новая методика оценки упругих констант негетомогенных материалов на основе результатов проведения вычислительных и натуральных экспериментов.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью математической постановки задачи теории упругости, применением строгих математических методов, сравнением результатов с известными работами других авторов, а также с данными численного моделирования и физических экспериментов.

### **Практическая значимость результатов исследования**

К практической значимости результатов работы следует отнести:

1. Разработанный метод позволяет определять напряжённо-деформированное состояние образцов из негетомогенных материалов, находящихся в условиях действия внешних сил. Он может найти широкое применение при решении пациентоориентированных задач биомеханики в травматологии и ортопедии.
2. Предложенный метод восстановления расчётной геометрии образцов на основе учёта пространственного распределения материала позволяет проводить сегментацию исходной области с заданной точностью. Что также может быть полезным при неразрушающем контроле различных элементов механических конструкций, не исключая биомеханические (например, элементы скелета человека на стадии планирования различных операционных вмешательств).
3. Представленный метод оценки упругих констант негетомогенных материалов, который может быть использован для определения механических свойств образцов неоднородной структуры, в том числе биологических тканей – костных.

### **Апробация диссертационной работы**

Диссертационная работа Герасимова Олега Владимировича в достаточной мере опубликована и апробирована. Работа докладывалась на семнадцати международных и пяти всероссийских конференциях и семинарах по профилю механики деформируемого твёрдого тела. Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела», 1 – в научном журнале, индексируемом в Web of Science и Scopus (квартиль Q2), 3 – в периодических научных журналах, индексируемых Scopus (квартили Q3 и Q4). Зарегистрированы 4 программы для ЭВМ.

### **Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы**

По содержанию диссертационной работы имеются вопросы и замечания:

1. При моделировании испытаний на изгиб автор сравнивает возникающие в кости напряжения с её пределом прочности, выбранным из литературы, но не приводит его числового значения (стр. 126 диссертации). Какое значение предела прочности бралось в рамках сравнительного анализа?
2. На рисунке 3.41 автор приводит диаграмму разрушения образца: красные точки соответствуют данным натурального эксперимента, зелёные – результатам численного моделирования. Далее говорится, что ошибка результатов варьировалась в пределах от 3 до 15 %. Также в работе сказано, что погрешность может быть в большей степени определена неточностью приложения граничных условий. Считает ли автор такую ошибку допустимой? Исследовался ли автором вопрос, на сколько изменится ошибка при варьировании области приложения граничных условий?
3. Можно ли по данным компьютерной томографии определять не только модуль упругости, но и коэффициент Пуассона костной ткани?
4. Требуется пояснение термина «сплошной материал», присутствующего на рисунке 3.46 и в таблицах 3.4, 3.5.
5. Достигнута ли сходимость решения для модуля упругости в случае «сплошной материал» в зависимости от количества конечных элементов (таблицы 3.4 и 3.5).

Высказанные замечания не влияют на актуальность и ценность диссертационной работы, не снижают позитивного впечатления о диссертационном исследовании Герасимова Олега Владимировича.

### **Заключение**

Диссертационная работа Герасимова Олега Владимировича «Моделирование деформирования образцов из негомогенных материалов по данным компьютерной томографии» представленная на соискание учёной степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела» является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, которая по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в Постановлении Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертационной работы Герасимов Олег Владимирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Отзыв подготовлен доцентом, доктором физико-математических наук, профессором кафедры математической теории упругости и биомеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Дмитрием Валерьевичем Ивановым (410012, Россия, Саратовская область, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, тел. +7(8452)26-04-46, ivanovdv.84@yandex.ru).

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры математической теории упругости и биомеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», «29» августа 2024 г., протокол № 1. Заключение принято единогласно.

доц., д.ф.-м.н., профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Иванов Д.В.

проф, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Коссович Л.Ю.

Подпись	<i>Иванов Д.В.</i>	Доверяю
Ученый секретарь	<i>Семенова В.Г.</i>	
Ученого совета СГУ	<i>Семенова В.Г.</i>	
« 09 »	<i>09.08.2024</i>	



*С отзывом ознакомлен.*

*16.09.2024*