

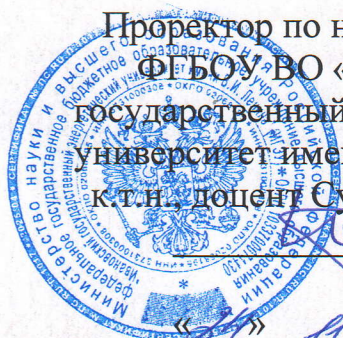
**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина»
(ИГЭУ)**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
**ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»**
к.т.н., доцент Сулыненков И.Н.



2025

Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003
тел. (4932) 269-999, факс (4932) 385-701
e-mail: office@ispu.ru <http://игэу.рф> <http://ispu.ru>
ОКПО 02068195; ОГРН 1033700074430
ИНН/КПП 3731000308/370201001

24.11.2025 № 02-04-1264

На № 4514-исх от 21.10.2025

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Сидоренко Дмитрия Александровича
на тему «Биомеханическое исследование элементов позвоночно-тазового
комплекса и систем металлофиксации у взрослых и детей»,
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия.

Актуальность темы диссертации

Исследование прочностных свойств тканей организма человека, а также разработка зависимостей, позволяющих на основе данных медицинского диагностического оборудования оценить механические свойства тканей конкретного пациента, являются актуальными задачами современной биомеханики и биомедицинского инжиниринга. Биомеханическое моделирование в последние годы все чаще применяется в качестве инструмента персонализированной медицины, концепция которой утверждена приказом Министерства здравоохранения РФ от 24 апреля 2018 г. № 186. В этой связи диссертационная работа Сидоренко Дмитрия Александровича является актуальным научным исследованием, в котором не только получены новые данные о свойствах губчатой кости взрослых пациентов и пациентов раннего возраста, но и предложена методика оценки контракционных усилий, необходимых для исправления сколиотической деформаций и не приводящих к повреждению губчатой кости детских

позвонков. Таким образом, актуальность данной работы не вызывает сомнений.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация Дмитрия Александровича состоит из введения, шести глав, заключения, пяти приложений и списка литературы. Объем работы составляет 145 страниц, включая 51 рисунок, 13 таблиц и 22 страницы списка литературы, содержащего 145 ссылок.

Во Введении описаны актуальность и степень разработанности темы диссертации, представлены объект, предмет исследования и сформулированы цель и задачи работы. Также во Введении описаны использованные при реализации работы методы и подходы, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна результатов работы, а также их практическая значимость.

Глава 1 содержит обзор современной литературы по теме диссертации: представлены основные подходы к изучению механических и структурных свойств губчатой кости, описаны наиболее часто встречающиеся в литературе постановки задач о напряженно-деформированном состоянии позвоночно-двигательных сегментов, сформулирован ряд нерешенных задач и проблем, связанных с пациент-ориентированным биомеханическим моделированием сегментов позвоночника и изучением механических свойств губчатой кости.

В Главе 2 приведены постановки пространственных задач теории упругости о напряженно-деформированном состоянии изучаемых в диссертации сегментов позвоночника. Глава 2 также содержит методики построения трехмерных твердотельных моделей исследуемых сегментов позвоночника: в ручном режиме и в полуавтоматическом с применением нейросетей для обработки исходных данных компьютерной томографии. Описаны использованные в работе методики анализа сеточной сходимости и валидации биомеханических моделей позвоночно-двигательного сегмента L4-L5 взрослого пациента.

В Главе 3 описаны материалы и методы проведенных в работе экспериментальных исследований, связанных с определением механических и структурных свойств образцов губчатой кости позвонков крупного рогатого скота и пациентов раннего возраста. В главе также представлен разработанный автором диссертации алгоритм, позволяющий по данным диаграммы «напряжение-деформация» автоматически определять модуль упругости и предел прочности. Описан авторский алгоритм кластеризации данных, позволяющий автоматически разбивать данные экспериментов на кластеры и строить для каждого из них регрессионную зависимость, связывающую механические и структурные свойства губчатой кости.

Глава 4 посвящена исследованию механических свойств губчатой кости. Представлены результаты апробации алгоритма по автоматизированной обработке результатов экспериментов по одноосному сжатию и оригинального алгоритма кластеризации данных. Применение новых алгоритмов позволило получить новые результаты по ранее проведенным

экспериментам с образцами губчатой кости головок бедра. Апробация алгоритмов автоматической обработки результатов экспериментов и алгоритма кластеризации была проведена на данных экспериментов с образцами губчатой кости позвонков крупного рогатого скота. Показано, что алгоритм кластеризации применим к обработке данных различных экспериментов и является универсальным. Проведены эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости полупозвонков пациентов раннего возраста. Получены данные о модуле упругости позвонков в продольном (вдоль оси тела позвонка) и поперечном направлениях (поперек оси тела позвонка). Построены новые оригинальные зависимости, связывающие модуль упругости (в продольном и поперечном направлениях) губчатой кости детских позвонков и рентгеновскую плотность, выраженную в единицах Хаунсфилда.

В Главе 5 представлены результаты численного решения задачи об определении критерия нестабильности металлофиксации поясничных позвонков взрослых пациентов. Для этого для различных N_u были вычислены модули упругости и пределы прочности губчатой кости тел позвонков, которые затем были использованы при численном расчете напряженно-деформированного состояния системы «позвонки-металлофиксаторы» при действии типовых нагрузок. Для оценки риска расшатывания транспедикулярных винтов и проседания кейджа анализировались и сравнивались с пределом прочности максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в губчатой кости тел позвонков. На основе анализа максимальных напряжений по Мизесу в губчатой кости тел позвонков было выявлено, что $N_u=125$ является пороговым значением, которое можно использовать для оценки риска расшатывания транспедикулярных винтов и проседания кейджа на нижнепоясничном уровне.

В Главе 6 представлены результаты расчета конкретного клинического случая для определения максимальной допустимой контракционной нагрузки на транспедикулярные винты, необходимой для исправления сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста. Для этого по данным КТ и с использованием полученных ранее зависимостей были вычислены модули упругости тел и корней дуг позвонков Th11-L2, поставлены и решены задачи биомеханики о действии контракционной нагрузки на транспедикулярные винты, установленные в позвонки Th11-L2. На основе анализа результатов моделирования определена предельно допустимая контракционная нагрузка, которая может быть приложена в процессе операции по коррекции врожденной сколиотической деформации у пациента раннего возраста.

Каждая глава включает в себя описание результатов исследований, а также обобщающие результаты и выводы. Вся информация в диссертации представлена ясно и логично, а раздел «Заключение» систематизирует и обобщает все полученные в работе результаты.

Связь с планами соответствующих отраслей наук

Диссертационное исследование выполнено в Саратовском университете в рамках Государственного задания FSRR-2023-0009. Работа имеет важное практическое значение для практической травматологии и ортопедии и согласуется с указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года", в котором среди прочих указана задача о развитии и внедрении инновационных методов диагностики, профилактики и лечения, а также основ персонализированной медицины, определенная в соответствии с национальными целями.

Степень обоснованности и достоверность научных достижений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертационное исследование Сидоренко Д.А. реализовано при помощи современных и апробированных методов и подходов. При постановке задач использована теория линейной упругости, при оценке механических свойств кости применялось одноосное квазистатическое сжатие, решение задач теории упругости получено с помощью метода конечных элементов, твердотельные модели сегментов позвоночника (на основе данных компьютерной томографии) и систем фиксации построены с помощью ручных и автоматизированных методов с использованием технологии искусственного интеллекта. При обработке результатов механических испытаний и численных расчетов применялись методы математической статистики (описательные статистики, критерий Манна-Уитни, линейный регрессионный анализ), а также авторские алгоритмы и методики обработки экспериментальных кривых и кластеризации данных.

В работе достоверность результатов обусловлена корректностью постановок задач, применением типовых методик проведения экспериментов по одноосному сжатию, сравнением результатов с экспериментальными исследованиями и результатами численного моделирования других авторов.

Все вышеперечисленное позволяет считать выносимые на защиту положения, а также выводы, сформулированные в диссертационном исследовании Сидоренко Д.А., достоверными и обоснованными.

Научная новизна исследования

Дмитрием Александровичем получены следующие новые научные результаты.

1. Проведены механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости поясничных позвонков детей (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

2. Разработано программное обеспечение, автоматизирующее обработку результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костных тканей и автоматически определяющее эффективный модуль упругости и предел прочности по диаграмме сжатия (п. 6 паспорта специальности 1.1.10).

3. Разработан новый метод получения регрессионных зависимостей, связывающих механические характеристики губчатой кости при сжатии и ее

структурные свойства (объемная минеральная плотность, рентгеновская плотность) (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

4. На основе нового авторского метода получены регрессионные зависимости, связывающие предел прочности при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой костной ткани головок бедренной кости человека, выраженную в единицах Хаунсфилда (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

5. На основе нового авторского метода получены регрессионные зависимости, связывающие эффективный модуль упругости при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой кости детских позвонков, выраженную в единицах Хаунсфилда (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

6. На основе биомеханического моделирования установлено пороговое значение единиц Хаунсфилда $Hu=125$ (критерий неустойчивости) губчатой костной ткани поясничных позвонков человека, позволяющее выявлять позвонки с риском возникновения неустойчивости транспедикулярных конструкций на нижнепоясничном уровне (п. 2, 4, 6 паспорта специальности 1.1.10).

7. С помощью биомеханического моделирования выполнено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, вызванной наличием полупозвонка (п. 2, 4, 6 паспорта специальности 1.1.10).

Рекомендации по использованию результатов и выводов приведенных в диссертации

На основе результатов диссертационной работы разработано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024661970), реализующее автоматическое определение прочностных свойств костной ткани по диаграммам одноосного сжатия. Программа может быть использована в качестве встраиваемого модуля в другие программы или для дальнейших исследований, связанных с определением механических свойств костной ткани. Автором разработана и наполнена база данных (свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2024622484) прочностных свойств губчатой костной ткани. База данных предназначена для сбора и хранения для последующего анализа прочностных свойств губчатой костной ткани, рассчитанных по результатам экспериментов на одноосное сжатие. Разработанный критерий неустойчивости транспедикулярной фиксации и проседания межтелового заменителя на нижнепоясничном уровне позвоночника у взрослых пациентов может быть использован при предоперационном планировании хирургического лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника. Разработанная и апробированная методика предоперационного планирования хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, включающая биомеханическое моделирование, является важным результатом для перехода к персонифицированной медицине и внедрению персонифицированного биомеханического моделирования в рутинную практику вертебрологов.

Соответствие диссертации специальности «Биомеханика и биоинженерия»

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.10. – «Биомеханика и биоинженерия» по следующим пунктам 1, 2, 4, 6: изучение физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем (физ.-мат. науки); изучение закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах (физ.-мат. науки); изучение механики и характеристик движения опорно-двигательной системы, плавания, полета и наземного движения животных, механики целенаправленных движений человека, движения совокупностей живых организмов, двигательной активности растений (физ.-мат. науки); разработка на основе методов механики средств для исследования свойств и явлений в живых системах, для направленного воздействия на них и их защиты от влияния внешних факторов (физ.-мат. науки).

Использование результатов диссертации

Результаты диссертационной работы внедрены в учебную деятельность механико-математического факультета и факультета фундаментальной медицины и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Личный вклад автора

Автором лично разработан алгоритм и на его основе программное обеспечение для автоматизации обработки результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костей и для автоматического расчета механических свойств костных тканей. Автором лично был разработан алгоритм кластеризации, который лег в основу построения новых регрессионных зависимостей, связывающих механические и структурные свойства костной ткани. Автор самостоятельно обработал результаты механических экспериментов по одноосному сжатию губчатой кости головок бедра взрослых пациентов и губчатой кости позвонков пациентов раннего возраста, а также построил регрессионные зависимости для расчета эффективного модуля упругости и предела прочности кости на основе ее структурных свойств. Автор лично поставил и численно решил задачи биомеханики о нагружении ПДС внешними статическими нагрузками, проанализировал результаты численных экспериментов и определил пороговое значение N_c , являющееся критерием для определения позвонков с риском нестабильности транспедикулярной фиксации и проседания кейджа на уровне поясничных позвонков L4-L5. Автор лично поставил и численно решил задачи биомеханики о нагружении детских позвонков вместе с установленными транспедикулярными винтами контракционными нагрузками. Автор разработал и наполнил базу данных механическими и прочностными свойствами костных тканей.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат структурирован и оформлен в соответствии с требованиями ВАК. В автореферате изложены наиболее значимые результаты работы, представлены положения, выносимые на защиту, описана новизна, личный вклад автора, имеется заключение и список основных публикаций по результатам диссертации. Все разделы автореферата соответствуют материалам, представленным в диссертационном исследовании.

Замечания по диссертационной работе

1. На стр. 18 сказано, что автор «поставил задачу биомеханики в Ansys». Несмотря на то, что применяемый автором подход соответствует широкому внедрению цифровых технологий в исследования, подобная фраза звучит не очень научно. Наверное, более корректно сказать, что в комплексе Ansys автором разработана конечно-элементная постановка задачи биомеханики, которая затем решена средствами данного комплекса.

2. В разделах главы 2, посвященных модели ПДС, нет достаточно подробного описания, что из себя представляет межтеловый кейдж.

3. В работе описаны эксперименты на сжатие образцов губчатой кости позвонков и сустава КРС. Вызвало удивление использование довольно длинных образцов, поскольку не указан ГОСТ, по которому проводились испытания. Обычно длинные образцы используются для тестов на растяжение в случае однородных или периодических материалов, в то время как для тестов на сжатие более короткие или даже в форме кубика.

4. В работе представлены модули упругости губчатой кости тел позвонков пациентов раннего возраста, но не определены пределы прочности.

5. В качестве пожелания на развитие работы можно отметить, что было бы полезно в конечно-элементных моделях перейти от осредненных упругих модулей к заданию модуля Юнга поэлементно.

Указанные замечания не снижают ценность диссертационной работы и не влияют на общее положительное впечатление об исследовании Сидоренко Д.А.

Заключение

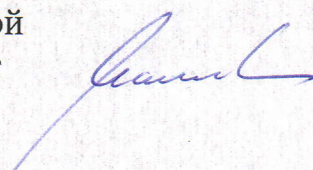
По материалам диссертационного исследования опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, автором получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных (1 свидетельство без соавторов), а также опубликовано 3 статьи в сборниках трудов конференций и тезисов докладов.

Диссертационная работа Сидоренко Дмитрия Александровича «Биомеханическое исследование элементов позвоночно-тазового комплекса и систем металлофиксации у взрослых и детей», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия, является законченной научной -

квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития математики и механики, и удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в действующей редакции, предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия, а ее автор Сидоренко Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв заслушан и единогласно утвержден на заседании кафедры теоретической и прикладной механики, протокол № 3 от 19.11.2025.

Заведующий кафедрой
теоретической и прикладной
механики, д.ф.-м.н., доцент



Маслов Леонид Борисович

Сведения о составителе отзыва:

Маслов Леонид Борисович, доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, почтовый адрес 153003, Ивановская область, город Иваново, улица Рабфаковская, дом 34, тел. + 79066177036, e-mail: leonid-maslov@mail.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ФГБОУ ВО «ИГЭУ»), должность: заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики.

Подпись Л.Б. Маслова заверяю



Ученый секретарь Совета ИГЭУ

Вылгина Юлия Вадимовна

«24» 11 2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Адрес организации: 153003, Ивановская область, город Иваново, улица Рабфаковская, дом 34, тел. +7 (4932) 269-999, e-mail: office@ispu.ru

Сайт организации <http://ispu.ru/>