

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Сидоренко Дмитрия Александровича «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.

В настоящее время развитие исследований, связанных с моделированием деформирования костной ткани, в том числе элементов позвоночно-тазового комплекса, значительно ускорилось, что продиктовано как необходимостью перехода к персонально-ориентированным медицинским технологиям, так и совершенствованием методов оценки упругих свойств костной ткани и деформативности биомеханических конструкций. Цель диссертационного исследования Д. А. Сидоренко состоит в разработке и применении в биомеханическом моделировании схем изучения деформирования сегментов позвоночника с установленными системами металлофиксации.

Диссертационная работа Сидоренко Д.А. содержит введение, шесть глав, заключение, пять приложений и список использованных источников. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включает в себя 51 рисунок, 13 таблиц.

Во **введении** описана актуальность и степень разработанности темы диссертации, объекты, предметы и цель исследования. Поставлены задачи, решение которых необходимо для достижения цели, описаны научная новизна, практическая значимость результатов работы, представлены положения, выносимые на защиту, изложены методы исследования, обсуждены достоверность результатов работы, авторский вклад, апробация результатов.

В **первой главе** представлен обзор научной литературы по теме диссертации, приведены данные об анатомии позвоночника, о современных

направлениях биомеханического моделирования позвоночно –тазовых сегментов. Описаны современные методы построения пациент-ориентированных твердотельных моделей сегментов позвоночника, а также обсуждены возможности использования единиц Хаунсфилда как критерия стабильности металлофиксации в предоперационном планировании. Изложены известные экспериментальные и расчетные методы определения механических свойств губчатой костной ткани, математические постановки задач для оценки напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательных сегментов.

Глава 2 посвящена постановке пространственных задач теории упругости о напряженно-деформированном состоянии изучаемых сегментов позвоночника вместе с установленными системами фиксации. Представлены механические свойства исследуемых объектов (кортикальная кость, связки, имплантаты, межпозвонковые диски) и методики их расчета для губчатой кости позвонков. Также глава 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 результаты анализа сеточной сходимости и валидации биомеханических моделей.

Глава 3 содержит методологию натурных экспериментов по одноосному сжатию призматических образцов губчатой кости. Описана методика определения объемной минеральной плотности кости, основанная на обжиге образцов в муфельной печи. В главе даны подробные описания авторского алгоритма автоматизированной обработки результатов натурных экспериментов и оригинальной методики кластеризации данных.

В **Главе 4** представлены результаты механических экспериментов с образцами губчатой кости и результаты автоматизированной обработки данных экспериментов. Проведена апробация разработанных автором диссертации алгоритмов на данных по одноосному сжатию образцов губчатой кости крупного рогатого скота и головок бедра человека. Получены

новые зависимости для расчета модуля упругости и предела прочности губчатой кости головок бедра человека. Проведены эксперименты по одноосному сжатию губчатой кости позвонков детей дошкольного возраста: представлены модули упругости детских позвонков в продольном (вдоль оси тела позвонка) и поперечном направлениях (поперек оси тела позвонка). Построены новые оригинальные зависимости, связывающие модуль упругости губчатой кости детских позвонков и рентгеновскую плотность.

Глава 5 содержит результаты численного решения задач теории упругости о нагружении позвоночно-двигательного сегмента L4-L5 с системой фиксации статическими нагрузками, имитирующими статичное положение тела пациента, а также его наклоны и повороты (при различных значениях модуля упругости губчатой костной ткани). Проанализированы наибольшие эквивалентные напряжения по Мизесу, возникающие в губчатой, кортикальной костной ткани позвонков, а также в имплантатах. Показано, что изменение механических свойств губчатой кости влечет за собой существенное изменение показателей напряженно-деформированного состояния вместе с установленной системой фиксации. Выявлены условия нагружения, при которых может возникать расшатывание транспедикулярных винтов и проседание кейджа, связанное с повреждением губчатой костной ткани. В работе предложено пороговое значение единиц Хаунсфилда $Hu=125$, позволяющее выявлять пациентов с риском расшатывания транспедикулярных винтов в поясничных позвонках. Определены группы риска пациентов, у которых возможна нестабильность транспедикулярной фиксации и проседания кейджа на нижнепоясничном уровне.

В **Главе 6** приведены результаты биомеханического моделирования конкретного клинического случая пациента раннего возраста, связанного с расчетом допустимой контрактационной нагрузки, необходимой для коррекции сколиотической деформации. На основе данных компьютерной томографии по построенным в работе зависимостям определены модули упругости тел и

корней дуг позвонков пациента раннего возраста. Проведено моделирование конкретного клинического случая и определена предельно допустимая контрактационная нагрузка, которая может быть приложена к транспедикулярным винтам в процессе операции по коррекции врожденной сколиотической деформации у пациента раннего возраста. Предлагаемый пациент-ориентированный подход к предоперационному планированию лечения последствий врожденных сколиотических деформаций позвоночника у пациентов раннего возраста позволяет снизить риски возникновения осложнений, связанных с повреждением губчатой кости позвонков.

В **заключении** приведены основные результаты исследования и выводы.

Актуальность темы диссертации

Диссертация Сидоренко Д.А. направлена на получение новых знаний о механических и структурных свойствах губчатой костной ткани, на разработку методов их изучения, а также на разработку методик биомеханического моделирования, которые могут быть использованы в рамках предоперационного планирования в травматологии и ортопедии. Таким образом, цель и задачи диссертационной работы Сидоренко Д.А. согласуются с указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. N 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года", формулирующим в том числе и задачу о развитии и внедрении инновационных методов диагностики, профилактики и лечения, а также основ персонализированной медицины. В соответствии с этим **актуальность исследования** Дмитрия Александровича не вызывает сомнений, так как развивает направление прикладной биомеханики и предлагает подходы к ее внедрению в практическое здравоохранение.

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

Достоверность результатов диссертации обусловлена корректностью постановок решаемых задач теории упругости, а также сравнением результатов с экспериментальными исследованиями (в том числе клиническими) и результатами численного моделирования, представленными в научной литературе. Отметим также, что при решении возникающих задач методом конечных элементов автор проанализировал сеточную сходимость и провел валидацию биомеханических моделей.

Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость

Научная новизна работы базируется на том, что в работе впервые проведены механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости поясничных позвонков детей; представлен новый метод получения регрессионных зависимостей, связывающих механические характеристики губчатой кости при сжатии и ее структурные свойства, с помощью которого получены регрессионные зависимости предела прочности при сжатии и рентгеновской плотности губчатой кости головок бедра человека, а также эффективного модуля упругости при сжатии и рентгеновской плотности губчатой кости детских позвонков. В работе впервые предложено пороговое значение единиц Хаунсфилда губчатой костной ткани поясничных позвонков человека, позволяющее выявлять позвонки с риском возникновения нестабильности транспедикулярных конструкций на нижнепоясничном уровне. С помощью биомеханического моделирования выполнено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, вызванной наличием полупозвонка.

Теоретическая значимость результатов работы определяется развитием методов неинвазивного определения модуля упругости губчатых костных тканей по данным компьютерной томографии, а также новыми данными о модулях упругости губчатой кости детских позвонков.

Практическая значимость результатов работы определяется следующим. Во-первых, автор разработал и зарегистрировал программные продукты и базы данных, которые могут быть использованы в других подобных исследованиях, а также при разработке систем планирования в травматологии и ортопедии. Во-вторых, полученные автором механические свойства позвонков пациентов раннего возраста и их зависимости от единиц Хаунсфилда могут быть использованы при пациент-ориентированном предоперационном планировании с использованием биомеханического моделирования. В-третьих, автор представил методику оценки контракционного усилия, которая также может быть применена при планировании операций по хирургической коррекции сколиотических деформаций у пациентов раннего возраста.

Апробация результатов диссертационного исследования

Всего по материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, а также 3 публикации в сборниках трудов конференций и тезисах докладов. Результаты исследования неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и форумах.

Вместе с тем по работе можно сделать следующие замечания

1. Ключевым вопросом при изучении деформирования сложных биомеханических конструкций является оценка модулей упругости костной ткани пациента. В работе для такой оценки использована связь модуля упругости с единицами Хаунсфилда, которая не является универсальной, а позволяет лишь дать оценку модуля упругости. Кроме того, для расчетов по КЭ-технологиям необходимо знание коэффициента Пуассона, который в работе принят равным 0.3. Неясно, насколько это обосновано, и возможно ли определение его из серий испытаний на сжатие призматических образцов костной ткани?

2. Второй вопрос, касающийся собственно расчетов биомеханических структур, состоит в учете механических свойств связок. Неясно, откуда брались соответствующие жесткости для конкретного пациента и насколько их конкретные значения влияют на оценку деформативности в целом.

3. При проведении расчетов о контактном взаимодействии принято, что коэффициент трения равен 0.2. К сожалению, из постановок задач неясно, в какие соотношения он входит.

4. В основных результатах работы сформулирован критерий порогового значения для биомеханической конструкции в единицах Хаунсфилда-125. Неясно, на основе чего автор достаточно определенно формирует такое условие при весьма широком разбросе механических свойств костной ткани как у разных позвонков, так и у различных пациентов.

Отмечу, что представленные замечания носят характер пожеланий для дальнейших исследований и уточнения оценок деформативности, не снижают научной ценности диссертационной работы и не влияют на положительное впечатление о проведенном Сидоренко Д.А. исследовании в области биомеханики и биоинженерии.

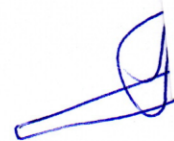
Текст автореферата диссертации правильно и полно отражает содержание диссертационной работы, тема и содержание исследования соответствуют паспорту специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия по пунктам 1, 2, 4 и 6: изучение физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем; изучение закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах; 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; 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.

Резюмируя, считаю, что диссертационная работа **Сидоренко Дмитрия Александровича «Биомеханическое исследование элементов позвоночно-тазового комплекса и систем металлофиксации»** является законченным квалификационным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия, а ее автор **Сидоренко Дмитрий Александрович** заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теории упругости
Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8-А, оф. 110
+7(863) 218-40-00 доб. 14023, aovatulyan@sfedu.ru

Согласен на обработку персональных данных


19.11.2025 г.

Ватульян Александр Ованесович

