

## 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

Цель диссертационной работы Сидоренко Д.А. состоит в разработке и применении в биомеханическом моделировании сегментов позвоночника с установленными системами фиксации зависимостей, связывающих механические и структурные свойства губчатой костной ткани.

Задачи исследования:

1. Выполнить механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости детских позвонков.
2. Разработать программное обеспечение для автоматизации обработки результатов механических экспериментов по одноосному сжатию образцов костных тканей и автоматического определения эффективного модуля упругости и предела прочности по диаграмме «напряжение-деформация».
3. Разработать методику построения регрессионных зависимостей, позволяющих вычислять эффективный модуль упругости и предел прочности губчатой кости на основе ее объемной минеральной плотности и рентгеновской плотности, выраженной в единицах Хаунсфилда.
4. Построить регрессионные зависимости, позволяющие на основе объемной минеральной плотности и единиц Хаунсфилда губчатой кости головок бедра и поясничных позвонков вычислять ее эффективный модуль упругости и предел прочности.
5. С использованием биомеханического моделирования обосновать пороговое значение единиц Хаунсфилда для прогнозирования несостоятельности результатов моносегментарного декомпрессивно-стабилизирующего вмешательства на нижнепоясничном сегменте позвоночника у взрослых пациентов.



6. С использованием биомеханического моделирования определить величину безопасного максимального контракционного усилия, прикладываемого хирургом к транспедикулярным винтам для исправления сколиотической деформации, при подготовке к операции по лечению данной патологии, вызванной наличием полупозвонка, у пациента раннего возраста.

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

Среди новых результатов, полученных диссертантом, можно выделить следующие.

1. Впервые проведены механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости поясничных позвонков детей.

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.

3. Разработан новый метод получения регрессионных зависимостей, связывающих механические характеристики губчатой кости при сжатии и ее структурные свойства (объемная минеральная плотность, рентгеновская плотность).

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.

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.

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



7. С помощью биомеханического моделирования выполнено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, вызванной наличием полупозвонка.

Во **обзоре литературы** содержится обзор современной литературы по теме диссертации. Описана структурно-функциональная организация позвоночника как биомеханической системы, представлены основные современные направления биомеханического моделирования позвоночно-двигательных сегментов, описаны основные методы построения пациент-ориентированных твердотельных моделей сегментов позвоночника. Приведены некоторые результаты, посвященные анализу рентгеновской плотности (единицы Хаунсфилда) как предиктора стабильности металлофиксации в предоперационном планировании. Далее автором охарактеризованы экспериментальные и расчетные методы определения механических свойств губчатой костной ткани, а также представлены математические постановки задач для оценки напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательных сегментов.

**Глава 2** посвящена постановке задачи биомеханики об НДС позвоночно-двигательных сегментов. Автор приводит математическую постановку задачи, в том числе описывает процесс разработки пациент-ориентированных геометрических моделей сегментов позвоночника (модель сегмента L4-L5 взрослого пациента, а также модель груднопоясничного сегмента позвоночника пациента раннего возраста. Далее автором приводится примененная в работе методика расчета пациент-ориентированных механических свойств губчатой кости на основе данных компьютерной томограммы для тел позвонков L4-L5 взрослого пациента и тел позвонков пациента раннего возраста. Автор также провел анализ сходимости по пространственной сетке для верификации конечно-элементных моделей, а также валидацию биомеханической модели сегмента позвоночника L4-L5.

В **главе 3** подробно представлены материалы и методы экспериментальных исследований. Представлена методология проведения экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой костной ткани поясничных позвонков и коленного сустава крупного рогатого скота, а также образцов губчатой кости,



полученных из полупозвонков детей. Представлены исходные данные экспериментов по сжатию образцов губчатых костей головок бедра человека и их повторная обработка. Далее автор описывает методику определения объемной минеральной плотности костной ткани, а также приведен протокол оценки средних значений единиц Хаунсфилда в телах позвонков по данным компьютерной томографии. Представлено подробное описание алгоритма автоматизированной обработки диаграмм напряжение-деформация для определения механических характеристик. Автором также разработан и апробирован алгоритм кластеризации данных механических испытаний.

В главе 4, посвященной результатам исследований механических свойств губчатой кости, представлены результаты апробации алгоритма автоматической обработки экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой кости бедра человека, а также результаты апробации алгоритма кластеризации на данных экспериментов с образцами губчатой кости крупного рогатого скота. Далее в главе приведены результаты применения алгоритма кластеризации на данных экспериментов с образцами губчатой кости головок бедра человека, а также результаты автоматизированной обработки экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой кости детских позвонков.

Глава 5 посвящена определению критерия стабильности металлофиксации поясничных позвонков. Для этого автором проведен расчёт механических свойств губчатой кости позвонков по данным компьютерной томографии, которые затем были применены при биомеханическом моделировании комбинированного спондилодеза на уровне позвонков L4-L5. На основе биомеханических расчетов обосновал пороговое значение единиц Хаунсфилда, на основе которого на этапе предоперационного планирования можно выявлять пациентов с риском расшатывания транспедикулярных винтов и проседания кейджа на нижнепоясничном уровне.

В главе 6 представлены результаты расчета конкретного клинического случая для определения максимальной допустимой контракционной нагрузки. Автор на основе данных предоперационной компьютерной томограммы конкретного пациента выполнил оценку механических свойств губчатой кости позвонков Th11-



L2 пациента раннего возраста, построил индивидуальную биомеханическую модель сегмента Th11-L2 и на основе биомеханического моделирования оценил максимальную безопасную контракционную нагрузку на винты у пациента раннего возраста.

**Заключение** диссертации содержит основные результаты исследования и выводы.

### **Актуальность темы диссертации**

Данное диссертационное исследование направлено на изучение механических и структурных свойств губчатой костной ткани, а также на разработку и апробацию новых биомеханических моделей сегментов позвоночника пациентов раннего возраста. В работе также представлены новые результаты, позволяющие проводить предоперационную оценку риска расшатывания транспедикулярных винтов на нижнепоясничном уровне у взрослых пациентов. Полученные в работе результаты могут быть использованы при внедрении этапа биомеханического моделирования в предоперационное планирование хирургического лечения последствий дегенеративных заболеваний позвоночника. 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", в котором в том сформулированы задачи о развитии и внедрении инновационных методов диагностики, профилактики и лечения, а также основ персонализированной медицины. Таким образом, результаты диссертационной работы Сидоренко Д.А. **крайне актуальны** и важны для современной биомеханики и практической медицины.

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

В диссертационной работе достоверность результатов обуславливается корректностью постановок задач, сравнением результатов с экспериментальными исследованиями и результатами численного моделирования других авторов. При решении поставленных задач методом конечных элементов автор провел анализ сеточной сходимости и осуществил валидацию биомеханической модели позвоночно-двигательного сегмента L4-L5.



## **Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость**

**Научная новизна** результатов работы не вызывает сомнений. Автором проведены механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости поясничных позвонков детей и определены модули упругости губчатой кости тел детских позвонков. Сидоренко Д.А. разработал программное обеспечение, автоматизирующее обработку результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костных тканей и автоматически определяющее эффективный модуль упругости и предел прочности по диаграмме сжатия.

Представлен новый метод получения регрессионных зависимостей, связывающих механические характеристики губчатой кости при сжатии и ее структурные свойства (объемная минеральная плотность, рентгеновская плотность), на основе которого получены новые регрессионные зависимости, связывающие предел прочности при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой костной ткани головок бедренной кости человека, выраженную в единицах Хаунсфилда, а также зависимости, связывающие эффективный модуль упругости при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой кости детских позвонков, выраженную в единицах Хаунсфилда.

С помощью 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 и выполнено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, вызванной наличием полупозвонка.

Результаты диссертационного исследования также обладают **теоретической значимостью**, которая обосновывается тем, что автором получены новые данные о механических свойствах губчатой кости позвонков пациентов раннего возраста, доработаны методы неинвазивного определения модуля упругости костных тканей по данным компьютерной томографии, определены новые регрессионные зависимости, связывающие структурные и механические свойства губчатой кости.



**Практическая значимость** результатов работы подтверждается тем, что на основе результатов данной работы создано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024661970), реализующее автоматическое определение прочностных свойств костной ткани по экспериментальным кривым, полученным при одноосном сжатии. Программа может применяться в качестве встраиваемого модуля в другие программы или для дальнейших исследований, связанных с определением механических свойств костной ткани.

Также создана 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 нестабильности транспедикулярной фиксации и проседания межтелового заменителя на нижнепоясничном уровне позвоночника у взрослых пациентов может быть использован в рамках предоперационного планирования.

Пороговое значение единиц Хаунсфилда  $Hu=125$  губчатой костной ткани поясничных позвонков человека, полученное и обоснованное в данной работе, может быть применено в рутинной практике врачей при принятии решений о возможности выполнения хирургического лечения.

Разработанная и апробированная методика предоперационного планирования хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у пациента раннего возраста, включающая биомеханическое моделирование, является уверенным шагом к персонифицированной медицине и внедрению персонифицированного биомеханического моделирования в рутинную практику вертебрологов.



## **Апробация результатов диссертационного исследования**

По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 работ: из них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Автором получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, а также опубликовано 3 статьи в сборниках конференций и тезисов докладов. Результаты работы апробированы на всероссийских и международных конференциях.

В качестве **замечаний** необходимо отметить.

1. Чем обосновывалась необходимость разработки собственного алгоритма кластеризации? Возможно, существующих методов было бы достаточно для обработки результатов экспериментов.

2. Полученные зависимости модуля упругости от  $N_u$  для головок бедренной кости и для детских позвонков очень сильно похожи, чем это обуславливается?

Указанные замечания не являются значительными и не снижают ценности проведенного Сидоренко Д.А. исследования.

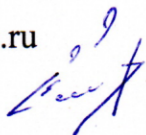
Автореферат диссертации соответствует диссертации, тема, цели, задачи и содержание диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности 1.1.10-Биомеханика и биоинженерия по пунктам 1, 2, 4 и 6, которые включают в себя изучение механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей (биореология), отдельных органов и систем, изучение движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах, изучение механики 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.

Можно заключить, что диссертационное исследование Сидоренко Д.А. 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. Автор Сидоренко Дмитрий Александрович заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории механики биосовместимых  
материалов НОЦ "Материалы"  
ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет»  
344003, Россия, Ростовская область,  
г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1  
+7 863 306-20-00, esadyrin@donstu.ru



Садырин Евгений Валерьевич

18.11.2025 г.

Подпись старшего научного сотрудника лаборатории механики биосовместимых материалов НОЦ «Материалы» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», кандидата физико-математических наук, Садырина Евгения Валерьевича, заверяю.

Ученый секретарь ДГТУ



Анисимов Владимир Николаевич