

Отзыв официального оппонента

на диссертацию **Хорошева Дениса Владимировича «Биомеханическое моделирование гиперрецепции в капсуле фасеточного сустава позвоночно-двигательного сегмента L4–L5»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия».

В настоящее время развитие биомеханики костной ткани значительно ускорилось, причем на первый план выходят те ее разделы, которые непосредственно связаны с некоторыми проблемами практической ортопедии позвоночника. Отметим, что детализация касается различных отделов позвоночника, причем особого внимания заслуживает поясничная область, в которой чаще всего наблюдаются патологии. Разработка новых способов диагностики фасеточного синдрома на уровне сегмента L4–L5 при помощи цифровой модели пациента с точки зрения биомеханики и биоинженерии и внедрении этих результатов в медицинскую практику является важной научной задачей, позволяющей повысить качество медицинского обслуживания пациентов в целом. Согласно Указу Президента РФ «О стратегии развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2025 года» решение основных задач развития здравоохранения в Российской Федерации должно включать ускоренное развитие фундаментальных и прикладных научных исследований, внедрение и использование их результатов в развитие персонализированной медицины, ориентированной на конкретного пациента.

Диссертация Хорошева Д.В. посвящена разработке способа диагностики фасеточного синдрома на уровне позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на ранней стадии. Таким образом, **актуальность диссертационного исследования** не вызывает сомнений, так как в нем развиваются биомеханические способы моделирования применительно к решению задач, важных в практической ортопедии.

Работа изложена на 122 страницах, включает в себя 49 рисунков, 4 таблицы, 21 страницу библиографии, которая содержит 157 наименований использованных литературных источников. Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы.

Во **введении** представлена информация о цели, задачах, научной новизне, актуальности работы, теоретической и практической значимости, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации, публикациях по теме диссертации и личном вкладе диссертанта. *

Глава 1 содержит описание анатомического строения позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела человека. Достаточно подробно рассмотрена каждая составляющая исследуемого сегмента. Представлены известные заболевания позвоночного столба на уровне поясничной области, которые могут вызывать болевые ощущения, схематически описаны общие методы исследования. Обоснована необходимость при описании количественных причин возникновения болевых ощущений использования термина «гиперрецепция», а не более емкий термин «боль».

В **Главе 2** диссертантом выполнен литературный обзор по определению геометрических параметров позвоночно-двигательного сегмента поясничного уровня. Обзор показал отсутствие исследований по определению геометрических параметров поясничных фасеточных суставов. В работе предложены критерии включения пациентов в исследование, чтобы ввести понятие «позвоночно-двигательного сегмента без патологий». Разработана «Методика определения геометрических параметров цифровой модели позвоночно-двигательного сегмента L4–L5». Применение этой методики позволило получить для трех возрастных групп геометрические

параметры фасеточных суставов на уровне сегмента L4–L5, тел позвонков L4 и L5, межпозвонкового диска L4–L5 для позвоночно-двигательного сегмента без патологий. Впервые рассчитаны диапазоны базовых значений геометрических параметров FLC и FRC, которые топографо-анатомически подтверждают и показывают отсутствие подвывиха фасеточного сустава. Автором разработан «Способ диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5», который поможет врачу выбрать правильную тактику лечения пациента.

Глава 3 содержит достаточно широкий литературный обзор существующих моделей поясничного позвоночно-двигательного сегмента в мире за 2005–2023 годы. Анализ соответствующих публикаций подтвердил актуальность проблемы моделирования выбранного сегмента. На основании обзора выбраны наиболее адекватно отражающие механику процесса определяющие соотношения для каждой составляющей поясничного сегмента, что свидетельствует о биомеханической ориентированности модели. Автором представлен процесс построения геометрической модели поясничного позвоночно-двигательного сегмента L4–L5. Детальное анатомическое строение геометрической модели фасеточного сустава выполнено впервые, что подтверждено литературным обзором. Приведены механические характеристики тканей сегмента L4–L5 двух видов - без патологий и с дегенеративными изменениями, представлено КЭ-исследование в рамках этих двух видов о нахождении напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 с критерием возникновения гиперрецепции; при этом постановка задачи моделирует травматичное осевое нагружение сегмента, при котором возникает подвывих фасеточных суставов.

В **Главе 4** автор обосновал выбор размеров сетки для модели позвоночно-двигательного сегмента L4–L5. Представлена проверка адекватности результатов моделирования сегмента L4–L5 без патологий. Показана степень влияния параметров (определяющих соотношений межпозвонкового диска, синовиальной жидкости в фасеточных суставах, губчатой кости в позвонках, дегенеративных изменений в заднем опорном комплексе сегмента) модели на поля перемещений и деформаций точек капсул фасеточных суставов. В результате моделирования выявлено появление подвывиха фасеточного сустава в нижней части правой капсулы. Диссертант осуществил способ определения напряженно-деформированного состояния в рассматриваемом сегменте позвоночного столба с учетом капсул фасеточных суставов в рамках критерия образования гиперрецепции, на основании которого можно диагностировать подвывих фасеточных суставов.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, сформулированы выводы.

Степень обоснованности и достоверности научных достижений, выводов, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов диссертации Хорошева Д.В. обусловлена корректной математической постановкой биомеханических задач в рамках моделей механики сплошной среды, использованием апробированных КЭ-пакетов для осуществления расчетов, сравнением результатов с экспериментальными исследованиями и результатами численного моделирования других авторов.

Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые предложен способ диагностики фасеточного синдрома на уровне позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на ранней стадии с использованием предложенного «Способа диагностики состояния фасеточных

суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5» и биомеханической моделью позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, впервые определены значения физиологической нормы геометрических параметров фасеточных суставов позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на снимках компьютерной томографии при отсутствии патологий в капсулах суставов для трех возрастных групп. **Теоретическая и практическая значимость** результатов заключается в указании диапазонов базовых значений геометрических параметров фасеточных суставов для каждой возрастной группы, которая также является дополнительным критерием количественной оценки подвывиха фасеточных суставов. Построенная автором биомеханическая трехмерная модель позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, учитывающая подвижность фасеточных суставов и синовиальную жидкость, позволяет прогнозировать возникновение гиперрецепции в пояснице и описывает поведение фасеточных суставов в норме и при патологии с учетом дегенеративных изменений, что позволяет формулировать обоснованную тактику лечения пациента.

Апробация результатов диссертационного исследования

По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях (среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ), а также 20 публикаций в сборниках конференций и тезисов докладов.

В качестве замечаний по диссертации отмечу следующие:

1. На с.77-78 диссертации описана математическая постановка исследуемых задач. Неясно, почему уравнения пороупругости и упругости записаны для стационарного состояния рассматриваемых объектов, а для жидкости – для нестационарного. Соотношения (4.14) представляют собой продифференцированное по времени соотношение (4.11). Отметим также, что временные зависимости для исследуемых задач в диссертации отсутствуют.
2. В критерий гиперрецепции (20) входит максимальное значение диагональных компонент тензора деформаций. Если эта величина составляет 0.4 согласно статьи [153], на которую ссылается диссертант, - то такое значение деформаций для твердых тканей, скорее всего, отвечает большим деформациям и нельзя описывать процесс деформирования линейными моделями, которые фигурируют в постановках задач.
3. Сравнительный анализ результатов, представленных на рис. 45а и 45б, свидетельствует о том, что смещения меняются линейно с увеличением давления, а та же зависимость для осевой деформации имеет существенно нелинейный характер при принятой линейной модели деформирования. Как это объяснить?
4. Имеется вопрос по результатам вычислительных экспериментов, который состоит в следующем. При описании физических характеристик моделей пороупругости коэффициенты проницаемости имеют порядок 10^{-15} . Как такой малый порядок при КЭ-аппроксимациях может влиять на рассчитываемые компоненты напряжений и деформаций?

Представленные замечания носят характер пожеланий и не влияют в целом на положительное впечатление от диссертации Хорошева Д.В. Диссертация содержит результаты множественных вычислительных экспериментов, замечательно иллюстрирована.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования. Диссертация **соответствует** паспорту специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1, 2, 4, 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,

суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5» и биомеханической моделью позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, впервые определены значения физиологической нормы геометрических параметров фасеточных суставов позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на снимках компьютерной томографии при отсутствии патологий в капсулах суставов для трех возрастных групп. **Теоретическая и практическая значимость** результатов заключается в указании диапазонов базовых значений геометрических параметров фасеточных суставов для каждой возрастной группы, которая также является дополнительным критерием количественной оценки подвывиха фасеточных суставов. Построенная автором биомеханическая трехмерная модель позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, учитывающая подвижность фасеточных суставов и синовиальную жидкость, позволяет прогнозировать возникновение гиперрецепции в пояснице и описывает поведение фасеточных суставов в норме и при патологии с учетом дегенеративных изменений, что позволяет формулировать обоснованную тактику лечения пациента.

Апробация результатов диссертационного исследования

По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях (среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ), а также 20 публикаций в сборниках конференций и тезисов докладов.

В качестве замечаний по диссертации отмечу следующие:

1. На с.77-78 диссертации описана математическая постановка исследуемых задач. Неясно, почему уравнения пороупругости и упругости записаны для стационарного состояния рассматриваемых объектов, а для жидкости – для нестационарного. Соотношения (4.14) представляют собой продифференцированное по времени соотношение (4.11). Отметим также, что временные зависимости для исследуемых задач в диссертации отсутствуют.
2. В критерий гиперрецепции (20) входит максимальное значение диагональных компонент тензора деформаций. Если эта величина составляет 0.4 согласно статьи [153], на которую ссылается диссертант, - то такое значение деформаций для твердых тканей, скорее всего, отвечает большим деформациям и нельзя описывать процесс деформирования линейными моделями, которые фигурируют в постановках задач.
3. Сравнительный анализ результатов, представленных на рис. 45а и 45б, свидетельствует о том, что смещения меняются линейно с увеличением давления, а та же зависимость для осевой деформации имеет существенно нелинейный характер при принятой линейной модели деформирования. Как это объяснить?
4. Имеется вопрос по результатам вычислительных экспериментов, который состоит в следующем. При описании физических характеристик моделей пороупругости коэффициенты проницаемости имеют порядок 10^{-15} . Как такой малый порядок при КЭ-аппроксимациях может влиять на рассчитываемые компоненты напряжений и деформаций?

Представленные замечания носят характер пожеланий и не влияют в целом на положительное впечатление от диссертации Хорошева Д.В. Диссертация содержит результаты множественных вычислительных экспериментов, замечательно иллюстрирована.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования. Диссертация **соответствует** паспорту специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1, 2, 4, 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.

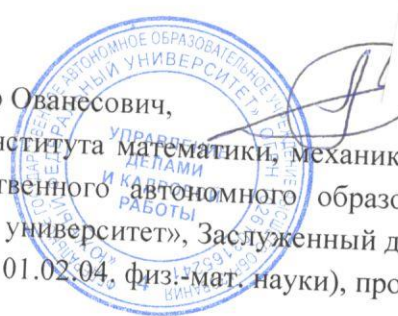
Резюмируя, считаю, что диссертационное исследование «Биомеханическое моделирование гиперрецепции в капсуле фасеточного сустава позвоночно-двигательного сегмента L4–L5» является самостоятельным законченным квалификационным научным исследованием и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.10. – «Биомеханика и биоинженерия», а её автор - Хорошев Денис Владимирович – заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по этой специальности.

Официальный оппонент Ватульян Александр Ованесович,
Заведующий кафедрой теории упругости Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04, физ.-мат. науки), профессор.

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

«25».10.2024 г.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пичную подпись Ватульяна А. О.

ЗАВЕРЕНО:

Главный специалист по управлению персоналом

М. И. Шодина
25 октября 2024 г.