

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по научной
деятельности Федеральное
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования "Казанский (Приволжский)
федеральный университет",
профессор Д.А. Тагурский

« 16 »



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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»

Актуальность работы

Одним из распространенных заболеваний является боль в спине. Согласно современной клинической практике одной из причин появления поясничной боли является фасеточный синдром, а его морфологическая основа – подвывих фасеточных суставов на уровне сегмента позвоночника L4–L5, что в свою очередь приводит к гиперрецепции, то есть повышенной возбудимости рецепторов и проводников. Стоит отметить, что боль в спине напрямую и негативно влияет на качество жизни и работоспособность. Причиной подвывиха фасеточного сустава являются анатомические особенности и характер внешнего нагружения. При этом с клинической точки зрения актуален вопрос диагностики ввиду близкого расположения грыжи межпозвонкового диска и фасеточного сустава.

В диссертационной работе Хорошева Дениса Владимировича разработан способ диагностики состояния подвывиха фасеточного сустава позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на основе методов биомеханического моделирования для повышения эффективности лечения гиперрецепции на поясничном уровне. На основе снимков компьютерной томографии, при отсутствии патологий в капсулах суставов, автором установлены значения физиологической нормы геометрических параметров фасеточных суставов позвоночно-двигательного сегмента L4–L5. В работе построена биомеханическая модель капсулы фасеточного сустава с учетом критерия возникновения гиперрецепции, и разработана биомеханическая модель позвоночно-двигательного

сегмента *L4–L5* с учетом подвижных фасеточных суставов и критерия возникновения гиперрецепции. На основе результатов численного моделирования была произведена оценка изменений биомеханических параметров в позвоночно-двигательном сегменте *L4–L5* с учетом дегенеративных (возрастных) аспектов в заднем опорном комплексе: с учетом изменения геометрии и механических свойств сегмента. Таким образом, актуальность и своевременность предложенного в диссертационной работе метода не вызывает сомнений.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 122 страницах, включая 49 рисунков, 4 таблицы, и 21 страницу библиографии, содержащей 157 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 исследование особенностей физиологии позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела человека. В главе подробно рассмотрено анатомическое строение позвоночно-двигательного сегмента, в частности строение поясничных позвонков, структура и состав позвоночного межпозвоночного диска, строение фасеточного сустава поясничного отдела и устройство связочного аппарата на уровне поясницы. Проведенное исследование использовалось впоследствии для создания моделей поясничного отдела позвоночника. Отдельное внимание в главе уделено заболеваниям поясницы и существующим методам их лечения, рассмотрены возможные причины возникновения болей. Приводится классификация болей в пояснице и подробно рассмотрено два термина «боль», «гиперрецепция».

Вторая глава посвящена исследованию геометрии позвоночно-двигательного сегмента *L4–L5*. На основе проведенного исследования была разработана методика определения геометрических параметров цифровой модели позвоночно-двигательного сегмента *L4–L5*. Были получены геометрические параметры для трех возрастных групп. Определены диапазоны значений размеров *FLC* и *FRC*, которые морфофункционально (топографо-анатомически) определяют подвывих фасеточных суставов. На основании чего был разработан способ диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента *L4–L5*, который может быть внедрен в клиническую практику, имеется акт внедрения, подана заявка на патент на изобретение.

Третья глава приведено построение конечно-элементной модели позвоночно-двигательного сегмента *L4–L5*. Приводится описание восстановления геометрической модели с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациента для двух вариантов: без патологии и с дегенеративными изменениями. Построена подробная многоуровневая конечно-элементная модель, включающая пульпозное ядро, фиброзное

кольцо, матрикс, эластичные волокна, хрящевую замыкательную и костную замыкательную пластинки, кортикальную и губчатую ткань позвонка, отростки позвонков, связки и суставной хрящ фасеточного сустава. Для каждого типа тканей обоснован выбор реологических моделей и определены соответствующие физико-механические характеристики. В главе математически сформулирована биомеханическая задача в смешанной постановке, с использованием критерия возникновения гиперрецепции.

Четвертая глава посвящена результатам расчета напряженно-деформированного состояния разработанной модели позвоночно-двигательного сегмента *L4–L5*. В первую очередь автором проведено исследование сеточной сходимости модели, показана адекватность модели путем сравнения с опубликованными результатами. Численные результаты показали влияние учета фасеточной капсулы сустава в позвоночно-двигательном сегменте *L4–L5* на биомеханическое поведение сустава. Показано, что учет губчатой кости в позвонках имеет существенное значение для оценки деформаций в фасеточных капсулах суставов. Из численных результатов показано, что синовиальная жидкость в капсулах фасеточных суставов смягчает биомеханический отклик сегмента на нагрузку. На основе численных экспериментов выявлено влияние дегенеративных (возрастных) аспектов в заднем опорном комплексе сегмента, которые приводят к раннему появлению подвывиха фасеточных суставов, что подтверждается и клинической врачебной практикой. Выполнена оценка влияния параметров модели сегмента *L4–L5* на напряженно-деформированное состояние капсулы фасеточного сустава. Моделирование показало появление подвывиха фасеточного сустава в нижней части правой капсулы.

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

В приложении 1 приведен акт об использовании результатов диссертационного исследования в учебной деятельности, в приложении 2 приведен акт об использовании результатов диссертационного исследования в практической деятельности.

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

Отраженные в диссертации Хорошева Дениса Владимировича положения соответствуют паспорту специальности 1.1.10. «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1 – изучение физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем; 2 – изучение закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах; 4 – 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; 6 – 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.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

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

Научная новизна исследования

В диссертационной работе Хорошева Дениса Владимировича получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана биомеханическая модель позвоночно-двигательного сегмента $L4-L5$ с учетом капсул фасеточных суставов.
2. Разработан способ определения напряженно-деформированного состояния в позвоночно-двигательном сегменте $L4-L5$ с учетом капсул фасеточных суставов в рамках критерия образования гиперрецепции, который позволяет методами биомеханического моделирования диагностировать подвывих фасеточных суставов.
3. Исследовано напряженно-деформированное состояние позвоночно-двигательного сегмента $L4-L5$, которое в совокупности приводит к поясничной гиперрецепции.

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. Разработан способ диагностики состояния подвывиха фасеточного сустава позвоночно-двигательного сегмента $L4-L5$ на основе методов биомеханического моделирования для повышения эффективности лечения гиперрецепции на поясничном уровне.
2. Сформулирован «Способ диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента $L4-L5$ », который позволяет по данным КТ диагностировать подвывих фасеточных суставов. Подана заявка на патент (Заявка № 2023126533 от 17.10.2023 / Хорошев Д.В., Ильялов О.Р., Устюжанцев Н.Е.). Изобретение применяется в ГБУЗ ПК «ГКБ им. С.Н. Гринберга» (г. Пермь).
3. Установлены значения физиологической нормы геометрических параметров фасеточных суставов позвоночно-двигательного сегмента на снимках КТ при отсутствии патологий в капсулах суставов для трех возрастных групп.

Апробация диссертационной работы

Диссертационная работа Хорошева Дениса 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 1.1.10. «Биомеханика и биоинженерия».

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

По содержанию диссертационной работы имеются вопросы и замечания:

1. В качестве замечания можно отметить, что в приведенной статистике геометрических параметров стоило бы более ярко выделить случаи патологий.
2. В таблице 1 приведены результаты измерений FLC , FRC - удивляет, что в таблице не приведены квартили, несмотря на непараметричность рассматриваемых распределений.
3. Из текста диссертационной работы не совсем ясно, какой тип элемента использовался для моделирования кортикальной костной ткани.
4. В таблице 3 для губчатой костной ткани указаны изотропные механические упругие свойства, насколько это оправдано с учетом наличия анизотропии губчатой ткани?
5. В качестве замечания можно отметить, что можно было оценить модель с учетом вариации физико-механических констант модели.

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

Заключение

Диссертационная работа Хорошева Дениса Владимировича «Биомеханическое моделирование гиперрецепции в капсуле фасеточного сустава позвоночно-двигательного сегмента L4–L5» представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10. – «Биомеханика и биоинженерия» 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 Хорошев Денис Владимирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10. – «Биомеханика и биоинженерия».

Отзыв подготовлен доцентом, кандидатом физико-математических наук, заведующим кафедрой компьютерной математики и информатики Казанского

(Приволжского) федерального университета Саченковым Оскаром Александровичем (420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, тел. +7 (9503) 17-13-00, 4works@bk.ru).

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры компьютерной математики и информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» «4» октября 2024 г., протокол № 2. Заключение принято единогласно.

Доц., к.ф.-м.н., заведующий кафедрой компьютерной математики и информатики



Саченков О.А.

