

## 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».

Распространенность дегенеративных заболеваний поясницы в мире является серьезной медицинской и социальной проблемой, затрагивающей около 80% взрослого населения. В Российской Федерации, дегенерация пояснично-крестцового отдела является одной из наиболее частых причин обращения за медицинской помощью, особенно среди людей среднего и старшего возраста. С возрастом риск возникновения дегенеративных изменений в позвоночнике значительно увеличивается. К основным заболеваниям относятся остеоартрит, межпозвонковая грыжа и фасеточный синдром, которые могут привести к значительным ограничениям в физической активности и ухудшению качества жизни. Даже в условиях современной медицинской помощи не всегда возможно правильно диагностировать подобные заболевания у пациента. **Актуальность диссертационной работы** Хорошева Д.В. обусловлена разработкой способа диагностики фасеточного синдрома на уровне позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 на ранней стадии при помощи методов биомеханического моделирования.

Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Текст работы представлен на 122 страницах, включая 49 рисунков, 4 таблицы и 21 страницу библиографии, содержащей 157 наименований.

Во **введении** изложена актуальность темы исследования, теоретическая и практическая значимость. Автором представлена информация о цели, задачах, положениях, выносимых на защиту, новизне, публикациях по теме диссертации, личном вкладе и сведения об апробации работы.

В **первой главе** подробно изложено анатомическое строение позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела человека и детально разобрана каждая составляющая сегмента. Уделено внимание составу поясничного межпозвонкового диска. Представлены заболевания, которые могут быть причиной боли в поясничном отделе позвоночника и методы их лечения. Приведено обоснование применимости термина «гиперрецепция» к объекту исследования.

Во **второй главе** автором приводятся критерии включения пациентов в исследование для выбора позвоночно-двигательного сегмента без патологий, чтобы конкретизировать отличие от сегмента с патологией. Разработана «Методика определения геометрических параметров цифровой модели позвоночно-двигательного сегмента L4–L5». На ее основании для трех возрастных групп получены геометрические параметры фасеточных суставов на уровне сегмента L4–L5, тел позвонков L4 и L5, межпозвонкового диска L4–L5 для позвоночно-двигательного сегмента без патологий. Получены диапазоны базовых значений размеров FLC и FRC, которые морфофункционально обосновывают и показывают отсутствие подвывиха фасеточного сустава. Диссертантом разработан «Способ диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5», который поможет врачу выбрать правильную тактику лечения пациента и избежать ошибки при постановке диагноза.

В **третьей главе** автором представлена оценка текущего положения и актуальности проблемы моделирования поясничного позвоночно-двигательного сегмента в мире за 2005–2023 годы. Показано, что модель позвоночно-двигательного сегмента является более физиологически ориентированной, так как выбраны наиболее адекватно отражающие физику процесса определяющие соотношения для каждой составляющей поясничного позвоночно-двигательного

сегмента. Диссертантом описан процесс построения геометрической модели поясничного позвоночно-двигательного сегмента L4–L5. Детальная проработка геометрической модели фасеточного сустава получена впервые, что отображено в литературном обзоре. В постановке задачи модели использован критерий возникновения гиперрецепции. В работе рассмотрено моделирование двух видов позвоночно-двигательных сегментов L4–L5: сегмента без патологий и сегмента с дегенеративными изменениями. Автором исследования представлена постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 в сочетании упругой, пороупругой задач и задачи об идеальной жидкости. Постановка задачи моделирует травматичное осевое нагружение сегмента, при котором появляются подвывихи фасеточных суставов.

В **четвертой главе** диссертант обосновал выбор конечно-элементной сетки для модели позвоночно-двигательного сегмента L4–L5. Выполнил проверку модели сегмента L4–L5 без патологий на адекватность. Представил оценку влияния параметров (определяющих соотношений межпозвонкового диска, синовиальной жидкости в фасеточных суставах, губчатой кости в позвонках, дегенеративных (возрастных) аспектов в заднем опорном комплексе сегмента) модели сегмента L4–L5 на напряженно-деформированное состояние капсулы фасеточного сустава. В рамках данной постановки задачи результаты моделирования позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 показывают появление подвывиха фасеточного сустава в нижней части правой капсулы. Автор разработал 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 подвывихи фасеточных суставов.

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

**Достоверность результатов** работы в диссертационном исследовании обусловлена корректной математической постановкой задачи, сравнением результатов с экспериментальными исследованиями и результатами численного моделирования других авторов.

**Научная новизна** основных результатов работы определяется тем, что автором были 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. В работе представлена новая биомеханическая модель позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 с учетом подвижности фасеточных суставов, синовиальной жидкости и критерия появления гиперрецепции. Автором представлена физиологически ориентированная постановка биомеханической задачи определения напряженно-деформированного состояния в позвоночно-двигательном сегменте L4–L5 с учетом подвижных фасеточных суставов и критерия появления гиперрецепции. Диссертантом впервые проведено биомеханическое моделирование позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 с учетом двигательной активности фасеточных суставов, которые в совокупности приводят к поясничной гиперрецепции. В исследовании впервые разработан «Способ диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5» для объективизации практического опыта специалистов из области медицины.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационного исследования заключается в диапазоне базовых значений геометрических параметров фасеточных суставов для каждой возрастной группы, предложенной в «Способе диагностики состояния фасеточных суставов поясницы человека на уровне сегмента L4–L5», которая так же является дополнительным критерием количественной оценки подвывиха фасеточных суставов. Построенная диссертантом 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 в патологии с учетом дегенеративных (возрастных) аспектов в заднем опорном комплексе. Это, в свою очередь, позволяет сформулировать дифференцированную тактику ведения пациентов с дегенеративными заболеваниями на поясничном уровне, что может улучшить их качество жизни.

Основные результаты, полученные в работе, прошли **апробацию** на ряде серьезных российских и международных научных конференций.

По диссертационной работе имеются **вопросы и замечания**:

1) В главе 3 диссертантом по известным публикациям проанализированы различные конечно-элементные модели позвоночно-двигательного сегмента L4-L5, в которые включены модели связок. Однако в защищаемой модели эти связки, как следует из текста диссертации, не представлены. Почему? Не приводит ли это к снижению адекватности модели?

2) В главе 4 приведена верификация модели путем сравнения с численными и экспериментальными данными, приведенными в известных публикациях. Результаты попадают в диапазон известных значений, однако показывают меньшую жесткость разработанной модели. Как это можно обосновать? Проведена ли верификация модели по тестам на наклоны и повороты, (графики тестов показаны на рис. 30)?

3) Замечание по терминологии. В тексте диссертации, как правило, идет речь о капсуле фасеточного сустава и лишь несколько раз упоминается связка фасеточного сустава. Оппонент исходил из того, что это одно и то же, поскольку именно повреждение связки приводит к гиперрецепции и именно в связке по работам Zarej оценивается деформация, но тем не менее, хотелось бы уточнить данный вопрос.

4) В работе представлены результаты определения деформации в капсуле фасеточного сустава (которая, как указано выше, предполагается идентичной связке фасеточного сустава), которая рассматривается как критерий возникновения подвывиха и гиперрецепции при значительной нагрузке (до 120 кг). К постановке задачи и результатам есть следующие вопросы и пожелания:

- Смущает используемые в диссертации термины «деформация по оси X, Y, Z» и их значения, достигающие до 0.4 (рис. 43, 44, 48 и т.п.). Есть некоторые сомнения, действительно ли это деформации, а не перемещения по осям X, Y, Z? Если же это деформации, то не лучше ли использовать главные значения тензора деформаций, и корректно ли использовать линейные упругие модели при возникновении таких больших деформаций?

- Ввиду достаточно большого значения нагрузки, которая может приводить к значительным смещениям позвонков, т.е. подвывиху, было бы полезным в качестве результатов представить оценку напряженного состояния и прочности компонент биомеханической системы.

- Было бы также полезно более детально показать в качестве результатов моделирования смещения и области контакта фасеточных суставов, в том числе в сравнении с приведенными в главе 2 снимками КТ, чтобы более наглядно продемонстрировать суть явления подвывиха.

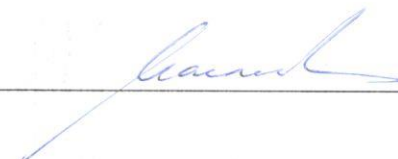
Сделанные замечания не влияют на общую **положительную оценку** диссертационной работы и квалификацию ее автора. Диссертация хорошо структурирована, написана на высоком профессиональном уровне. Результаты работы отражены в 25 печатных изданиях, в том числе 4 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

В связи с вышеизложенным, считаю представленную диссертацию высококачественным научным трудом, соответствующим актуальным требованиям науки, и рекомендую к защите. Диссертационное исследование **соответствует паспорту специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия»** по отрасли наук – «Физико-математические науки»: 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». Таким образом, диссертация Хорошева Дениса Владимировича является завершённой научно-квалификационной работой, содержит новые научные положения, соответствует 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 указанной специальности.

Согласен на обработку персональной информации.

Доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

  
Маслов Леонид Борисович

31 октября 2024 г.

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

Телефон: +7 4932 269712

E-mail: leonid-maslov@mail.ru

Подпись доктора физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой теоретической и прикладной механики Маслова Леонида Борисовича заверяю.

Ученый секретарь совета ИГЭУ





Ю.В. Вылгина