

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, Айзиковича Сергея Михайловича на диссертационную работу **Иванова Дмитрия Валерьевича** «Биомеханика как основа систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.08 – Биомеханика.

В структуре общей заболеваемости населения в России болезни сердечно-сосудистой системы и опорно-двигательного аппарата не меняют своих позиций уже более 15 лет: 13.3-15.2 % и 7.5-8.2 % соответственно. Несмотря на то, что в последнее десятилетие по данным Росстата уровень травматизма неуклонно снижается, он остается одной из ведущих причин инвалидизации и смертности населения. Дегенеративно-дистрофические заболевания опорно-двигательного аппарата также часто приводят к серьезному ухудшению качества жизни и инвалидизации населения, а при их диагностике и лечении врачи могут испытывать серьезные трудности.

В то же время, в 2018 году в России смертность от болезней системы кровообращения составляла от 22.9 % для женщин до 32.5 % для мужчин. Среди патологий сердечно-сосудистой системы выделяют аневризмы сосудов головного мозга, встречающиеся у 0.3-5 % населения, не имеющие особой симптоматической картины и приводящие к крайне тяжелым последствиям при разрыве (в половине случаев разрыва приводят к смерти).

Сложность диагностики вышеперечисленных заболеваний, а также, что для каждого из них возможны различные варианты лечения, ставит задачу по разработке современных методов и инструментов их исследования с целью выбора в каждом конкретном случае успешного варианта лечения. Одним из современных инструментов помощи врачу являются системы поддержки принятия врачебных решений. Внедрение биомеханики и моделирования в процесс диагностики предоперационного планирования требует решения научной проблемы по разработке биомеханических основ для принятия врачебных решений, что и было сделано в данной работе.

Предлагаемые в работе биомеханические подходы к предоперационному планированию и внедрению биомеханики как одного из инструментов количественной оценки патологий и вариантов их лечения, являются универсальными и могут быть применены как к «мягким» (артериальные стенки), так и к «жестким» (кости, позвонки, суставы) объектам. В данной работе объединены принципиально разные объекты, рассматриваемые с точки зрения биомеханики и единых принципов предоперационного планирования.

Актуальность темы диссертации

Разработка и внедрение количественных методов оценки тяжести заболевания и вариантов его лечения, основанных на биомеханическом моделировании, может существенно повысить качество лечения, а также улучшить послеоперационный прогноз и качество жизни пациентов. Это целиком и полностью соответствует утвержденным президентом России приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечню критических технологий Российской Федерации, в которые включены науки о жизни и технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний. Этим определяется **актуальность диссертационного исследования** Дмитрия Валерьевича.

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

Достоверность результатов диссертации обусловлена корректностью математических постановок задач и применением обоснованных численных методов. Результаты биомеханического моделирования и натурных экспериментов качественно и количественно соответствуют опубликованным результатам других авторов. Достоверность подтверждается доклинической апробацией результатов, полученных в диссертации и их сравнением с экспериментальными данными.

Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость

Научная новизна работы обеспечивается тем, что в работе представлена общая теория построения напряженно-деформированного состояния персонифицированного позвоночно-тазового комплекса, включающая в себя принципы автоматизированного построения твердотельных моделей элементов позвоночно-тазового комплекса и применения геометрических и биомеханических количественных критериев оценки успешности вариантов лечения. В области биомеханики аневризм обоснован с помощью биомеханического моделирования количественной оценки риска разрыва аневризм сосудов головного мозга. **Теоретическая значимость** результатов работы определяется развитием методов неинвазивного определения модуля упругости костных тканей а также введением нового понятия «критерий оценки успешности лечения».

Практическая ценность результатов работы определяется их реализацией в виде компонентов программной платформы Аккорд. На основе исследований Иванова Д.В. создана первая в мире система предоперационного планирования операций на позвоночнике SmartPlan Ortho 2D, вошедшая в реестр отечественного программного обеспечения и рекомендованная для использования при планировании лечения дегенеративных заболеваний позвоночника. В работе показано, что в рамках рутинного предоперационного планирования последствий

заболеваний позвоночника биомеханическое моделирование может быть эффективно использовано хирургом самостоятельно и в кооперации с инженером-биомехаником.

Апробация результатов диссертационного исследования

Результаты диссертации представлены в 59 работах, в том числе в 27 статьях в рецензируемых журналах (среди них 21 публикация в журналах, рекомендованных ВАК). На основе исследования было получено 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, написана 1 коллективная монография, а также опубликовано 16 статей в сборниках конференций и тезисов докладов. Работа доложена на всероссийских и международных конференциях.

Краткий обзор работы. Диссертация Иванова Д.В. включает список использованных сокращений, введение, восемь основных глав, заключение, четыре приложения и список литературы. Работа представлена на 438 страницах машинописного текста, содержит 157 рисунков, 60 таблиц, 38 страниц библиографии из 424 использованных литературных источников.

Во введении определены актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель, обоснована практическая значимость результатов работы. Представлены положения и результаты, выносимые на защиту, описаны методология и методы исследования, обоснована достоверность результатов, приведена информация об апробации результатов работы, структуре и объеме диссертации, публикациях автора по теме диссертации, личном вкладе автора, а также перечислены благодарности.

Глава 1 представляет собой обзор современной литературы по теме исследования. Освещены задачи предоперационного планирования в хирургии позвоночно-тазового комплекса, а также сердечно-сосудистой системы. Выделены задачи, которые необходимо решить. Эти задачи и решены диссертантом в представленной работе. Рассмотрены механические модели в биомеханике опорно-двигательного аппарата и сердечно-сосудистой системы, приведены способы определения индивидуальных механических свойств биологических тканей. Приведены способы построения твердотельных моделей исследуемых объектов. Продемонстрировано, что современные компьютерные системы предоперационного планирования обеспечивают только этап геометрического (традиционного) планирования, а биомеханическое моделирование как этап планирования не представлено ни в одном продукте.

Глава 2 посвящена материалам и методам исследования. В ней представлены математические постановки задач биомеханики, решаемых в диссертации, указаны методы их решения, а также использованные в работе методы построения твердотельных геометрических моделей по данным компьютерной томографии.

Описаны методики экспериментов на компьютерном томографе по сканированию костных тканей, приведена методика механических экспериментов на одноосное сжатие и методика подготовки образцов. Приведены статистические методы, примененные при обработке результатов экспериментов и литературных данных. Приведены результаты анализа сеточной сходимости для решаемых в диссертации задач биомеханики. Указаны научные и исследовательские проекты, часть результатов реализации которых легла в основу данной работы, а также необходимые методы и подходы, использованные при ее реализации.

Глава 3 представляет результаты по отысканию механических свойств элементов позвоночно-тазового комплекса, в которой представлены методика и регрессионные зависимости для неинвазивного расчета модуля Юнга губчатой костной ткани по данным компьютерной томографии (КТ). Диссертантом были получены зависимости между единицами Хаунсфилда и модулем Юнга костной ткани с учетом кода МКБ-10. Эти зависимости в применены для определения механических характеристик костей при биомеханическом моделировании хирургических операций. Разработанный подход позволяет получать механические свойства тканей конкретного пациента, что важно при персонифицированном подходе к планированию лечения.

Глава 4 освещает результаты исследования сагиттального баланса позвоночника при различных вариантах лечения последствий его заболеваний. Обоснован выбор рациональной величины коррекции сагиттальных позвоночно-тазовых параметров. Продемонстрирована непосредственная связь между параметрами сагиттального баланса и параметрами напряженно-деформированного состояния позвоночника. Получены обобщающие формулы, связывающие параметры сагиттального баланса и позволяющие рассчитывать оптимальные параметры баланса для конкретного пациента. Обоснована взаимосвязь между геометрическими параметрами позвоночника и характеристиками его напряженно-деформированного состояния при патологических изменениях его профиля.

В главе 5 содержатся результаты разработки количественных геометрических, биомеханических и клинических критериев оценки успешности лечения. Геометрические критерии позволяют на дооперационном этапе оценить степень деформации патологического сегмента позвоночно-тазового комплекса, прогнозировать уровень и степень необходимой хирургической коррекции. Биомеханические критерии позволяют оценить стабильность планируемых к установке имплантатов, прочностные характеристики системы «кость-имплантат в целом и ее компонентов. Применение клинических критериев направлено на обоснование успешного варианта лечения среди нескольких и на формулировку послеоперационного прогноза. Критерии оценки успешности лечения внедрены в разработанную программную платформу Аккорд. Геометрические критерии

оценки успешности также использованы при разработке мобильного приложения «СпиноМетр».

Глава 6 описывает результаты применения методики биомеханического моделирования, возникающих при предоперационном планировании лечения заболеваний. Биомеханическое моделирование выполнено для разных по сложности, функциональным характеристикам и механическим свойствам объектов: сегмент позвоночника, тазобедренный сустав и бедренные кости. Алгоритм применения биомеханического моделирования, постановка задачи биомеханики и анализ результатов ее решения един. Результаты данной главы показывают универсальность предлагаемого в диссертации подхода биомеханического моделирования в рамках предоперационного планирования.

Глава 7 посвящена разработке и биомеханическому обоснованию предикторов разрыва аневризм сосудов головного мозга. Также представлены результаты биомеханического моделирования результатов операций по исключению аневризм из потока крови. Определены пороговые значения геометрических параметров аневризм сосудов головного мозга, позволяющие классифицировать аневризмы и определять среди них склонные к разрыву. Показано, что AR (aspect ratio) по сравнению с SR (size ratio) качественнее и надежнее классифицирует аневризмы. С помощью биомеханического моделирования было подтверждено, что AR (aspect ratio) пригоден для выявления склонных к разрыву аневризм. Показано, что биомеханическое моделирование может эффективно применяться на этапе предоперационного планирования как количественный метод оценки склонности к разрыву аневризмы сосудов головного мозга.

В Главе 8 представлены результаты пилотного внедрения биомеханического моделирования как этапа предоперационного планирования. Сформулирована концепция систем поддержки принятия врачебных решений. Разработанная концепция легла в основу программной платформы Аккорд и первой в мире системы предоперационного планирования SmartPlan Ortho 2D. Разработаны структура и функции «Управляющего модуля Биомеханическое моделирование», являющегося центральной компонентой программной платформы Аккорд и системы предоперационного планирования SmartPlan Ortho 2D. Модуль обеспечивает полный цикл предоперационного планирования.

В заключении приведены основные результаты исследования и выводы.

Содержание диссертационной работы говорит **об ее обоснованности. Научные положений и результаты**, выносимые на защиту, являются новыми.

К работе имеются **замечания**.

1. Следовало бы более подробно описать контакты при моделировании позвоночника, особенно, контакты в суставах.

2. Использование моделей изотропных и однородных материалов является существенным упрощением при механическом моделировании. В дальнейших исследованиях было бы интересно, с точки зрения приложений, рассмотреть неоднородные и анизотропные модели материалов.

Указанные замечания не снижают качество представленного диссертационного исследования Иванова Д.В.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, тема, цель и задачи исследования соответствуют паспорту специальности 01.02.08-Биомеханика в части пунктов 1, 2, 4 и 6, касающихся изучения механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей (биореология), отдельных органов и систем, изучения движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах, изучения механики опорно-двигательной системы, плавания, полета и наземного движения животных, механики целенаправленных движений человека, движения совокупностей живых организмов, двигательной активности растений, разработки 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.

Диссертационное исследование Иванова Дмитрия Валерьевича является законченной квалификационной научной работой и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемых к докторским диссертациям по специальности 01.02.08 – Биомеханика, а ее автор Иванов Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией функционально-градиентных
и композиционных материалов
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донской государственный технический университет»
(ДГТУ)

Почтовый адрес: 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, дом 1, корп. 2, ауд. 308

E-mail: saizikovich@gmail.com

Телефон: +7(863) 238-15-58; +7(928) 934-13-98

Подпись С.М. Айзиковича удостоверяю.



Ученый секретарь ДГТУ

Сергей Михайлович Айзикович

21.07.2022 г.

Владимир Николаевич Анисимов