

Отзыв официального оппонента

на диссертацию 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

Цель диссертационной работы Иванова Д.В. состоит в создании биомеханических основ для разработки систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии опорно-двигательного аппарата и сердечно-сосудистой системы и их внедрения в рутинную практику предоперационной диагностики и планирования.

Задачи исследования:

1. Разработать и апробировать методику неинвазивного определения минеральной плотности и модуля Юнга губчатой костной ткани по данным компьютерной томографии.
2. Исследовать связь между параметрами сагиттального баланса и напряженно-деформированным состоянием элементов позвоночно-тазового комплекса. Оценить с позиций биомеханики компенсаторные механизмы в позвоночнике в ответ на патологические изменения наклона таза. Разработать обобщающие формулы для расчета теоретических значений параметров сагиттального баланса.
3. Разработать и апробировать количественные критерии оценки успешности хирургического лечения.
4. Продемонстрировать эффективность биомеханического моделирования при выборе варианта лечения в рамках предоперационного планирования в хирургии опорно-двигательного аппарата.
5. Определить и биомеханически обосновать геометрические критерии (пороговые значения предикторов) разрыва аневризм сосудов головного мозга.
6. Выполнить пилотное внедрение биомеханического моделирования в процесс предоперационного планирования.
7. Разработать концепцию систем поддержки принятия врачебных решений с биомеханической поддержкой.

Работа состоит из введения, восьми глав, заключения, четырех приложений и списка литературы. Общий объем работы составляет 438 страниц, включая 157 рисунков, 60 таблиц, 38 страниц библиографии, содержащей 424 наименования.

Среди новых результатов, полученных диссертантом, можно выделить следующие:

- общая теория построения напряженно-деформированного состояния персонифицированного позвоночно-тазового комплекса и его элементов для типовых и специальных нагрузок,
- программные компоненты первой в мире системы предоперационного планирования с биомеханической поддержкой решения врача, реализующие этап биомеханического моделирования (постановку, решение и анализ результатов решения задачи биомеханики) с целью количественной оценки повреждений и выбора оптимального варианта лечения пациентов с последствиями заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса,
- регрессионные зависимости для неинвазивного расчета модуля Юнга губчатой костной ткани на основе результатов ее сканирования в компьютерном томографе, учитывающие заболевание пациента в соответствии с МКБ-10, способ сканирования в компьютерном томографе, а также математический аппарат для обработки результатов сканирования компьютерного томографа,
- регрессионные зависимости, позволяющие использовать результаты сканирования образцов костной ткани на столе компьютерного томографа для определения их модуля Юнга, методика проведения комплексного натурального эксперимента, включающего этапы сканирования на компьютерном томографе и механических испытаний на одноосной машине,
- обобщающие регрессионные зависимости, связывающие между собой основные геометрические параметры сагиттального баланса позвоночника, и позволяющие на этапе предоперационного планирования прогнозировать их теоретические значения для конкретного пациента,
- установленная связь между изменением значений параметров сагиттального баланса позвоночника и напряженно-деформированным состоянием его элементов, а также подтверждена необходимость формирования оптимального сагиттального профиля при предоперационном планировании,

- геометрические и биомеханические количественные критерии оценки успешности лечения,

- обобщающий геометрический критерий количественной оценки риска разрыва аневризм сосудов головного мозга, который можно применять при их предоперационной диагностике и принятии решения о необходимости лечения,

- концепция программной платформы для систем поддержки принятия врачебных решений с биомеханической поддержкой в хирургии.

Диссертация состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, восьми глав, заключения, четырех приложений и списка использованной литературы.

Во **введении** содержится информация об актуальности темы исследования, степени ее разработанности, цели, практической значимости результатов работы. Положения и результаты, выносимые на защиту, методология и методы исследования, достоверность результатов, сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора также представлены во введении.

Глава 1 представляет собой обзор научной литературы по теме диссертации. В нем сформулированы задачи предоперационного планирования в хирургии опорно-двигательного аппарата и сердечно-сосудистой системы, а также проблемы внедрения биомеханики и биомеханического моделирования в практическую медицину. Рассмотрены механические модели, используемые при решении задач биомеханики, а также неинвазивные способы определения механических свойств биологических тканей. Приведены способы построения твердотельных моделей исследуемых объектов. Показано, что современные компьютерные системы предоперационного планирования обеспечивают только этап геометрического (традиционного) планирования.

В **главе 2** приведены математические постановки задач биомеханики, решаемых в диссертации, описаны методы их численного решения, а также методы построения твердотельных геометрических моделей исследованных в диссертации биологических объектов. Описаны методики экспериментов на компьютерном томографе, методика механических экспериментов и подготовки образцов, статистические методы, примененные при обработке массивов данных, методы

построения твердотельных моделей элементов позвоночно-тазового комплекса, бедренных костей и сосудов виллизиевого круга. Приведены результаты анализа сеточной сходимости для решаемых в диссертации задач биомеханики, а также представлены все программные продукты, примененные при реализации диссертационного исследования. Указаны научные и исследовательские проекты, а также инициативные научные тематики и совместные научные исследования, часть результатов реализации которых легла в основу диссертационной работы, а также необходимые методы и подходы, использованные при ее реализации.

Глава 3 посвящена изучению механических свойств губчатой костной ткани. Диссертантом были решены задачи по иллюстрации работы матриц свертки (конволюционного ядра) на примере изображений КТ позвоночника; оценке влияния различных конволюционных ядер, эффекта усиления жесткости рентгеновского излучения («beam-hardening»), а также других параметров настройки компьютерного томографа на единицы Хаунсфилда губчатой костной ткани головок бедра и калиброванных образцов водного раствора гидроортофосфата калия с известной минеральной плотностью; проведению натуральных экспериментов на одноосной испытательной машине Instron 5944 по одноосному сжатию образцов губчатой костной ткани головок бедренной кости; определению зависимости между единицами Хаунсфилда и значениями модуля Юнга губчатой ткани головок бедренных костей человека при различных заболеваниях тазобедренного сустава; проектированию базы данных «Механическая» для хранения механических свойств элементов ПТК и имплантатов. Разработанный подход позволяет получать механические свойства тканей конкретного пациента, что крайне важно при персонализированном подходе к планированию лечения. При этом для обобщения полученных формул и возможности их применения с другими компьютерными томографами необходимо провести серию экспериментов по их адаптации на КТ исследованиях, полученных с помощью томографов различных производителей и модификаций.

В главе 4 представлены результаты оценки напряженно-деформированное состояние сегмента позвоночника для обоснования оптимального варианта корригирующей операции на позвоночнике, позволяющего минимизировать напряжения и деформации за счет выбора рациональной величины коррекции

сагиттальных позвоночно-тазовых параметров и компоновки транспедикулярной системы; разработки оригинальных обобщающих формул, позволяющих вычислять для конкретного пациента оптимальные параметры сагиттального баланса на основе данных рентгенографии; исследования напряженно-деформированное состояние элементов позвоночника при патологических изменениях наклона крестца, а также апробации разработанных оригинальных обобщающих формул на примере работы мобильного приложения «СпиноМетр» и программы для настольного компьютера Surgimar с использованием данных конкретных пациентов НИИТОН СГМУ.

Глава 5 содержит результаты разработки и апробации количественных геометрических, биомеханических и клинических критериев, которые могут быть использованы при предоперационном планировании хирургического лечения последствий заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса с биомеханической поддержкой решения врача. Были разработаны геометрические критерии оценки успешности лечения для оценки деформации и необходимой коррекции на позвоночнике и тазобедренном суставе, биомеханические критерии оценки успешности лечения для оценки механической прочности, стабильности фиксации, срока службы имплантатов, клинические критерии оценки успешности лечения для оценки качества жизни и уровня боли до и после лечения, а также была выполнена апробация критериев оценки успешности на основе моделирования вариантов лечения спондилолистеза позвоночника конкретного пациента.

В **главе 6** продемонстрировано применение методики биомеханического моделирования при типовых случаях предоперационного планирования с биомеханической поддержкой решения врача: при выборе успешного варианта лечения последствий спондилолистеза поясничного отдела позвоночника, при выборе наиболее рационального шейно-диафизарного угла ножки имплантата при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава и при доклинической апробации интрамедуллярных фиксаторов нового типа для остеосинтеза диафизарных переломов бедренных костей.

В **главе 7** представлены результаты разработки и биомеханического обоснования предикторов разрыва аневризм сосудов головного мозга. Также

представлены результаты биомеханического моделирования результатов операций по исключению аневризм из потока крови. Проанализирована научная литература и выполнена оценка пороговых значений предикторов разрыва аневризм сосудов головного мозга, проведено биомеханическое моделирование двух моделей аневризм на основе данных конкретного пациента, выполнено биомеханическое моделирование течения крови по моделям аневризм, характеризуемых разными значения предиктора разрыва, проведена оценка течения крови по сосудам с аневризмами после их различных вариантов лечения.

Глава 8 содержит результаты внедрения биомеханического моделирования в процесс предоперационного планирования. Разработаны принципы внедрения биомеханического моделирования в процесс предоперационного планирования, разработаны режимы работы программной платформы Аккорд для систем поддержки принятия врачебных решений в хирургии позвоночно-тазового комплекса, обоснована эффективность платформы Аккорд при предоперационном планировании с биомеханической поддержкой, выполнена апробация разработанной платформы, а также разработана концепция системы поддержки принятия врачебных решений с биомеханической поддержкой решения врача в хирургии.

Заключение диссертации содержит основные результаты исследования и выводы.

Актуальность темы диссертации

Современная стратегия развития здравоохранения в России (указ Президента № 254 от 06.06.2019 г.) формулирует основные задачи развития здравоохранения в Российской Федерации до 2025 года. В список задач включено в том числе ускоренное развитие фундаментальных и прикладных научных исследований, внедрение и использование их результатов в интересах здравоохранения и развитие персонализированной медицины, основанной на современных научных достижениях. Диссертация Иванова Д.В. направлена на разработку и внедрение в предоперационное планирование хирургического лечения теоретических основ персонализированного биомеханического моделирования в хирургии опорно-двигательного аппарата и сердечно-сосудистой системы. Таким образом,

результаты диссертационной работы Иванова Д.В. **крайне актуальны** и важны для современной прикладной биомеханики и практической медицины.

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

Достоверность результатов диссертации определяется корректностью математических постановок задач и применения численных методов. Результаты биомеханического моделирования и натурных экспериментов качественно и количественно соответствуют опубликованным результатам других авторов. Достоверность также подтверждается доклинической апробацией результатов, полученных в диссертации, их сравнением с экспериментальными данными, а также мнением независимых экспертов.

Научная новизна основных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость

Научная новизна результатов работы не вызывает сомнений. В диссертации приведена разработанная Ивановым Д.В. общая теория построения напряженно-деформированного состояния персонифицированного позвоночно-тазового комплекса и его элементов для типовых и специальных нагрузок, основанная на принципах автоматизированного построения твердотельных моделей элементов позвоночно-тазового комплекса, методике и формулах для расчета индивидуальных модулей Юнга костной ткани по компьютерной томограмме, использования геометрических и биомеханических количественных критериев оценки успешности вариантов лечения. Диссертантом также разработан и обоснован с помощью биомеханического моделирования новый обобщающий геометрический критерий количественной оценки риска разрыва аневризм сосудов головного мозга, который можно применять при их предоперационной диагностике и принятии решения о необходимости лечения.

Результаты диссертационного исследования также обладают **теоретической значимостью**, которая обосновывается тем, что автором разработаны методы неинвазивного определения модуля упругости костных тканей по данным компьютерной томографии, определены новые регрессионные зависимости, связывающие между собой основные геометрические параметры сагиттального

баланса позвоночника, а также разработкой трех групп критериев оценки успешности лечения, применимых в различных областях хирургии.

Практическая значимость результатов работы подтверждается тем, что на их базе создана и апробирована, а также пилотно внедрена в лечебный процесс первая в мире система предоперационного планирования операций на позвоночнике SmartPlanOrtho 2D, с помощью которой реализуются этапы предоперационного геометрического планирования и биомеханического моделирования вариантов хирургического лечения травм и дегенеративных заболеваний позвоночника. Система включена в клинические рекомендации по лечению дегенеративных заболеваний позвоночника, утвержденных Минздравом в 2021 году. Разработанные регрессионные зависимости, позволяющие рассчитать оптимальные параметры сагиттального баланса, использованы при создании мобильного приложения «СпиноМетр», использование которого показало межэкспертную надежность и высокую точность измерений актуальных параметров баланса в сравнении с приложением для настольного компьютера Surgimap.

Апробация результатов диссертационного исследования

Результаты диссертации опубликованы в 59 работах, среди них 27 статей в рецензируемых журналах (21 публикация в журналах из списка ВАК), получено 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, опубликована 1 коллективная монография, а также введено 16 статей в сборниках конференций и тезисов докладов. Исследование представлялось на всероссийских и международных конференциях.

В качестве **замечаний** необходимо отметить.

1. В работе не приведены подробные сведения о конечных элементах, которые были использованы при численном решении задач.
2. В работе не приведены сведения о конечно-элементном решателе и сеточном генераторе, применяемых для решения задач биомеханики в системе SmartPlanOrtho 2D и платформе Аккорд.
3. При решении задачи о течении крови в сосуде с аневризмой рассматривались жесткие стенки. Было бы уместно оценить влияние упругой стенки на решение (хотя бы по литературным данным).

4. Не совсем четко указана связь между двумя глобальными задачами, рассматриваемыми в диссертации (моделирование костной системы, гемодинамика сосудов головного мозга). Было бы уместно рассмотреть гемодинамику в костной ткани при патологии позвоночника.

Указанные замечания не являются значительными и не снижают ценности проведенного Ивановым Д.В. исследования.

Автореферат диссертации соответствует диссертации, тема, цели, задачи и содержание диссертационного исследования соответствуют паспорту специальности 01.02.08-Биомеханика 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 Иванова Д.В. 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. Автор Иванов Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Доктор физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры вычислительной математики,
механики и биомеханики

09.08.2022

ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

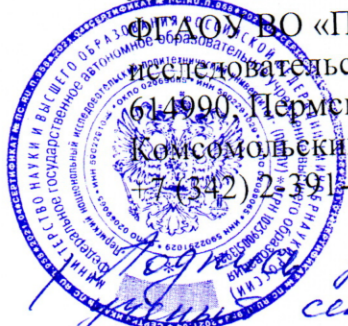
614000, Пермский край, г. Пермь,

Комсомольский проспект, д. 29

+7(342) 2-391-702, kuchumov@inbox.ru



Кучумов Алексей Геннадьевич



завещаю
секретарь
Ученого совета ФГАОУ ВО

тишу

В.И. Макаревич