

УТВЕРЖДАЮ

первый проректор – проректор по научной
деятельности ФГАОУ ВО "Казанский
(Приволжский) федеральный
университет", д.ф.-м.н., проф.



Д.А. Таюрский

2 сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации
на диссертацию Доля Александра Викторовича «Биомеханика артерий шеи и головы»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.1.10 – Биомеханика и биоинженерия.

Актуальность темы диссертации

Согласно указу Президента РФ от 7 мая 2024 года №309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», одна из основных целей в сфере здравоохранения — «Сохранение населения, укрепление здоровья и повышение благополучия людей, поддержка семьи». Для достижения этой цели, помимо прочего, планируется до 2030 года внедрить в сфере здравоохранения новые информационные технологии, в том числе нейротехнологии и искусственный интеллект, работу с большими данными. Диссертация Доля А.В. направлена на разработку методологии персонализированного биомеханического моделирования и внедрения их в предоперационное планирование лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы в виде программной системы, использующей технологии искусственного интеллекта и обработки данных. В соответствии с этим актуальность исследования Александра Викторовича не вызывает сомнений, так как существенно развивает направление прикладной биомеханики и предлагает конкретные результаты, пригодные для внедрения в клиническую практику.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объем работы составляет 294 страницы, включая 95 рисунков, 34 таблицы, 38 страниц списка литературы, содержащего 306 ссылок.

Во введении автор показывает актуальность темы, четко формулирует цель и задачи исследования, приводит положения, выносимые на защиту, а также раскрывает научную новизну и практическую значимость работы.

В первой главе, посвященной обзору литературы, подробно рассмотрены анатомические особенности системы артерий шеи и головы, методы создания геометрических моделей участков артериального русла, приведены данные о существующих на сегодняшний день подходах к натурным испытаниям биологических тканей. Также изучены вопросы создания экспериментальных стендов и численного моделирования участков артерий. Показаны варианты применения систем поддержки принятия врачебных решений в области сердечно-сосудистой хирургии.

Во второй главе «Материалы и методы» представлено описание методов создания геометрических моделей, приведены подробные протоколы проведения механических испытаний мягких тканей, описана методология проведения численных расчетов и оценки сеточной сходимости, а также дана основная система уравнений для постановки задачи о движении крови по сосудам с упругими стенками.

В третьей главе дана подробная математическая постановка задачи гемодинамики участка артериального русла и описан процесс выбора и верификации граничных условий на входах и выходах из артериальной системы на основе анализа данных полученных на медицинском диагностическом оборудовании, а также на основе анализа результатов проведенных численных и натурных экспериментов.

Четвертая глава содержит описание методики ручного создания моделей артерий на основе КТ. Также описан вариант частичной автоматизации моделирования участков артерий и показаны основные функциональные возможности разработанного приложения для обработки томограмм. В завершении главы приведено описание процесса создания итоговых моделей артерий шеи и головы на основе комбинированного подхода к моделированию.

В пятой главе приведены результаты задач, связанных с механическими характеристиками рассматриваемых в диссертации объектов. Был обоснован выбор моделей материалов для артерий и атеросклеротических бляшек. Проведена проверка возможности применения методики сдвиговой эластографии для определения механических характеристик артериальных стенок и компонентов атеросклеротических бляшек. Описан процесс разработки мобильного стенда для исследования механических характеристик, его апробация и верификация результатов на универсальной испытательной машине, проверка межэкспертной надежности. Проведена серия экспериментов по исследованию механических характеристик атеросклеротических

бляшек, покрышек бляшек, патологически измененных и здоровых сосудистых стенок. Построена зависимость модуля Юнга атеросклеротических бляшек от чисел Хаунсфилда на КТ.

Шестая глава посвящена численному моделированию движения крови по участку артерий шеи и головы. В главе приведена постановка задачи, описание процесса ее численного решения в системе конечно-элементного моделирования Ansys, а также анализ полученных результатов. Показаны выявленные комбинации патологических состояний с повышенным риском образования аневризм и отрыва атеросклеротических бляшек.

В заключительной седьмой главе описан процесс разработки теоретических основ и методов практической реализации для системы поддержки принятия решений при сочетанной патологии участка сосудистого русла «сонные артерии-базилярная артерия-виллизиев круг». Была сформулирована методология оценки рисков образования аневризм в сосудах виллизиева круга и отрыва атеросклеротических бляшек, на основе которой создано программное обеспечение. Далее описан процесс обучения нейросети для оценки степени риска образования аневризм в сосудах виллизиева круга и отрыва атеросклеротических бляшек и ее апробация. В завершении показано практическое применение системы на конкретном клиническом примере.

Каждая глава содержит описание собственных исследований, а также обобщающие выводы и заключения. Информация представляется в логической последовательности, а раздел «Заключение» систематизирует и обобщает все полученные результаты.

Связь с планами соответствующих отраслей наук

Исследования, которые легли в основу данной работы, выполнялись в рамках проектов Российского научного фонда «Уточнение и верификация биомеханической задачи о кровотоке в крупных артериях человека» (проект 20-71-00131, выполнялся с 2020 по 2022 г.), Фонда Владимира Потанина «Академический десант» (2021, 2022 гг.) и «Профессиональное развитие» (2023, 2024 гг.), а также в рамках инициативных тематик совместных научных исследований с Российским научным центром радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова.

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

Диссертация Доля А.В. выполнена с использованием современных методов и инструментов биомедицинского инжиниринга: методов конечных элементов и конечных объемов для решения связанных задач гидродинамики и теории упругости; методов геометрического моделирования с использованием современной системы трехмерного

проектирования SolidWorks; проведения натурных экспериментов с использованием современного испытательного оборудования (испытательные машины Instron), а также с помощью самостоятельно спроектированных и собранных стендов; методов обработки данных медицинского диагностического оборудования; методов создания прикладного программного обеспечения с использованием языков программирования Delphi и Python, а также сред разработки Embarcadero Delphi, PyCharm, ArduinoIDE, инструмента QT Designer и открытых библиотек TensorFlow и Keras.

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, обусловлена корректностью постановок задач и применения численных методов решения. Полученные в исследовании результаты согласуются с данными, опубликованными в литературе: совпадают как качественные, так и количественные показатели. Кроме того, достоверность результатов подтверждается соответствием численных расчетов натурным экспериментам на испытательных стендах и разрывных машинах. Также достоверность подтверждается апробацией результатов на реальном клиническом случае.

Все вышеперечисленное позволяет считать выносимые на защиту положения, а также выводы, сформулированные в диссертационном исследовании Доля А.В., достоверными и обоснованными.

Научная новизна исследования

В ходе работы Долею Александром Викторовичем:

1. Впервые проведена модификация метода фронтального роста с использованием рекурсивной реализации алгоритма. Модифицированный метод был использован в рамках методики полуавтоматического построения пациент-ориентированных геометрических моделей артерий человека (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

2. Разработана концепция и создан прототип мобильного испытательного стенда для проведения одноосных испытаний на растяжение и сжатие. Разработанное устройство было использовано в диссертационной работе для определения модуля Юнга и предела прочности образцов непосредственно в медицинском учреждении. Проведена верификация и апробация мобильного стенда в рамках медицинской организации (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

3. Были проведены эксперименты по определению механических свойств артериальных стенок, покрышек атеросклеротических бляшек и самих бляшек непосредственно после хирургического вмешательства. Полученные механические свойства были использованы при численном моделировании гемодинамики артериальной системы шеи и головы (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

4. Построены регрессионные зависимости, связывающие модули Юнга атеросклеротических бляшек и значения чисел Хаунсфилда. Данные зависимости позволяют определять пациент-ориентированные свойства бляшек в целом и их отдельных участков в случае неоднородной структуры (п. 8 паспорта специальности 1.1.10).

5. Показано, что наиболее приближенным к физиологическим условиям является тип граничных условий типа Windkessel. Впервые проведена верификация численной модели артерии с данным типом граничных условий на реальном испытательном стенде, показано хорошее соответствие результатов расчета гемодинамики и натурного эксперимента (п. 2 паспорта специальности 1.1.10).

6. Проведено исследование механических свойств стенок сонных артерий и отдельных компонентов атеросклеротических бляшек методом сдвиговой эластографии. Показано, что предложенная методика исследования оказалась недостаточно точной и в ряде случаев (для твердых бляшек) неприменимой (п. 1 паспорта специальности 1.1.10).

7. Выявлен ряд показателей, по которым может проводиться сравнение нормального строения артериальной системы сосудов шеи и головы с вариантами, содержащими патологии. Были выявлены основные характеристики сравнения, а именно: касательные и эквивалентные напряжения в стенке и атеросклеротических бляшках (при их наличии), объемные кровотоки на различных участках системы, а также параметры OSI и TAWSS, представляющие собой интегральные характеристики касательных напряжений (п. 2 паспорта специальности 1.1.10).

8. Впервые выполнено численное моделирование гемодинамики участка артериальной системы шеи и головы с различными вариантами сочетанных патологий, включающих поражение сонных артерий атеросклерозом, наиболее часто встречающиеся аномалии строения виллизиева круга и нарушенный кровоток в базилярной артерии. В ходе расчетов выявлены варианты сочетаний патологий, существенно отличающиеся от нормы и, как следствие, отнесенные к случаям с повышенным риском отрыва бляшек и образования аневризм (п. 2 паспорта специальности 1.1.10).

9. Выявлены наиболее значимые факторы, существенно повышающие риск образования аневризм и отрыва атеросклеротических бляшек. Показано существенное влияние ипсилатеральных стенозов ВСА и типа кровотока в БА на риск образования аневризм в ЗСА. Выявлено существенное влияние стенозов ВСА с обеих сторон и типа кровотока в БА на риск образования аневризм в ПСА, а также существенное влияние типа ВК, типа кровотока и ипсилатерального стеноза ВСА на риск отрыва бляшек (п. 8 паспорта специальности 1.1.10).

10. Впервые предложены теоретические основы и методы практической реализации системы поддержки принятия решений при сочетанной патологии участка сосудистого русла «сонные артерии-базилярная артерия-виллизиев круг», учитывающей пациент-ориентированные особенности геометрии сосудов, а также персонифицированные особенности входных граничных условий. Разработан прототип системы и проведено обучение нейросети на предварительно сформированной выборке. На основе предложенных методов и разработанного прототипа проведена оценка рисков отрыва бляшек и образования аневризм для конкретного клинического случая с сочетанной патологией артерий шеи и головы (п. 2 паспорта специальности 1.1.10).

Практическая значимость результатов работы

Результаты исследования легли в основу разработки системы поддержки принятия врачебных решений при сочетанной патологии участка сосудистого русла «сонные артерии-базилярная артерия-виллизиев круг», программ для обработки томограмм «Контур КТ 2D» и «Контур КТ 3D», а также испытательных стендов: стенда для моделирования движения жидкости по системе сосудов и мобильного стенда для проведения экспериментов на растяжение и сжатие. Получены патенты на изобретения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных: система поддержки принятия врачебных решений при сочетанной патологии артерий шеи и головы "Виллисон" (RU 2023680959 от 07.10.2023); программа для распознавания контуров объектов на срезах компьютерной томограммы "Контур КТ 2D" (RU 2021669321 от 26.11.2021); программа для распознавания контуров объектов на срезах компьютерной томограммы "Контур КТ 3D" (RU 2021668315 от 12.11.2021); способ прогнозирования опасности эмбологенного разрыва нестабильной каротидной атеросклеротической бляшки (RU 2723741 C1 от 17.06.2020); способ прогнозирования опасности эмбологенного разрыва каротидной атеросклеротической бляшки (RU 2729733 C1 от 11.08.2020); программа для обработки сигналов испытательного стенда "Vessel Volume Flow" (RU 2022619188 от 19.05.2022); управляющий скрипт для мобильного испытательного стенда MC-3 (RU 2024661169 от 16.05.2024); база данных прочностных свойств губчатой костной ткани (RU 2024622484 от 05.06.2024).

Соответствие специальности «Биомеханика и биоинженерия»

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.10 «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1, 2, 8: Изучение физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем (физико-математические науки); изучение закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса,

напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах (физико-математические науки); изучение механических основ и проявлений процессов роста, развития и адаптации биологических объектов (физико-математические науки).

Использование результатов диссертации

Результаты диссертационной работы внедрены в учебную деятельность механико-математического факультета и факультета фундаментальной медицины и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», а также в практическую деятельность Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно провел анализ существующей литературы по теме диссертационного исследования, осуществил постановку задач, разработал методы и подходы к их решению, а также провел ряд экспериментов и выполнил анализ результатов, в том числе:

- на основе анализа описанных в литературе данных определены наиболее часто встречающиеся патологии системы артерий шеи и головы, а также их сочетания в реальной клинической практике;
- с использованием рекурсивной процедуры модифицирован метод фронтального роста, включенный в методику полуавтоматического моделирования кровеносных сосудов;
- на основе данных компьютерной томографии с контрастированием построены геометрические твердотельные модели артерий шеи и головы;
- разработана макетная схема стенда для исследования динамики жидкости по системе разветвляющихся сосудов на основе насоса, моделирующего работу искусственного сердца, а также разработано управляющее программное обеспечение для стенда;
- проведены эксперименты по проливке пластиковой модели сонной артерии, выращенной на 3D-принтере, получены графики объемных расходов на выходах их участка, на основе которых верифицированы граничные условия, необходимые для наиболее приближенного к реальности моделирования гемодинамики участков артериального русла;
- разработана схема мобильного испытательного стенда для одноосного растяжения и сжатия образцов, собран его рабочий образец и разработано программное

обеспечение для управления стендом и обработки получаемых с его помощью выходных данных;

- на мобильном стенде проведены эксперименты по растяжению сосудистых стенок и покрышек атеросклеротических бляшек, а также по сжатию атеросклеротических бляшек, определены модули Юнга исследуемых структур, составлена база данных механических характеристик;
- получена регрессионная зависимость между модулями Юнга и числами Хаунсфилда атеросклеротических бляшек;
- проведено биомеханическое моделирование 145 вариантов сочетаний патологий артериальной системы сосудов шеи и головы, получены поля касательных и нормальных напряжений на стенках и бляшках, а также посчитаны массовые кровотоки на различных участках сосудистого русла в систолическую и диастолическую фазы сердечного цикла;
- на основе анализа полученных в результате моделирования величин выявлены варианты сочетаний патологических состояний, повышающие риск образования аневризм сосудов виллизиева круга и отрыва атеросклеротических бляшек;
- на основе описанных в литературе клинических случаев сформирована база данных для обучения нейросети, определяющей риски отрыва бляшек и образования аневризм;
- посредством матриц корреляции выявлены признаки, оказывающие наибольшее влияние на повышение риска образования аневризм и отрыва атеросклеротических бляшек;
- создана система поддержки принятия врачебных решений, позволяющая определять риски образования аневризм и отрыва бляшек в артериальной системе сосудов шеи и головы.

Автор принимал непосредственное участие в формулировке и обсуждении результатов исследования, написании научных статей, подготовке текстов и презентаций докладов на семинарах, симпозиумах и конференциях. Выводы диссертационного исследования сформулированы автором лично.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, хорошо структурирован, содержит изложение наиболее важных результатов работы, положения, выносимые на защиту, описание новизны, заключение и список основных публикаций по теме диссертации. Все разделы автореферата соответствуют материалам, представленным в диссертационном исследовании.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации приводятся регрессионные зависимости между числами Хаунсфилда и модулями Юнга, но из приведенного текста, не ясно было ли разделение регрессионных кривых для кальцинированных и мягких бляшек. Насколько вообще кальцинированные и мягкие бляшки различимы в значениях чисел Хаунсфилда?

2. Из текста диссертационной работы не ясна до конца архитектура использованной нейронной сети и использованные в работе метрики качества обучения. Не ясно процентное разделение выборки для обучения, валидации и тестирования.

Данные замечания не влияют на ценность и актуальность диссертационной работы и на общее положительное впечатление о проведенном Александром Викторовичем Долевым исследовании.

Заключение

Материалы диссертационного исследования опубликованы в 50 работах, в том числе 14 из них в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук и/или индексируемых в международных базах данных. Результаты обсуждались на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах.

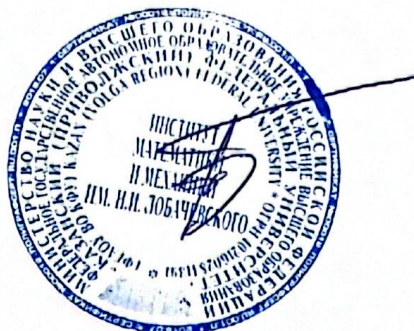
Диссертационная работа Доля Александра Викторовича «Биомеханика артерий шеи и головы», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.10 – Биомеханика и биоинженерия, является законченным квалификационным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, с изм., утв. 21.04.2016 г. № 335, 02.08.2016 г. № 748, ... ред. от 11.09.2021), предъявляемых к докторским диссертациям по специальности 1.1.10 – Биомеханика и биоинженерия, а ее автор Доля Александр Викторович заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв подготовлен доцентом, доктором физико-математических наук (01.02.04), профессором кафедры теоретической механики института математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского федерального университета Дмитрием Валерьевичем Бережным (420008, Казань, ул. Кремлевская, 35, Институт математики и механики КФУ, тел. +7(917)297-97-96, e-mail Dmitri.Berezhnoi@kpfu.ru) и доцентом, кандидатом физико-математических наук (01.02.04), заведующим кафедрой компьютерной математики и

информатики института математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского федерального университета Оскаром Александровичем Саченковым (420008, Казань, ул. Кремлевская, 35, Институт математики и механики КФУ, тел. +7(950)317-13-00, e-mail OASachenkov@kpfu.ru).

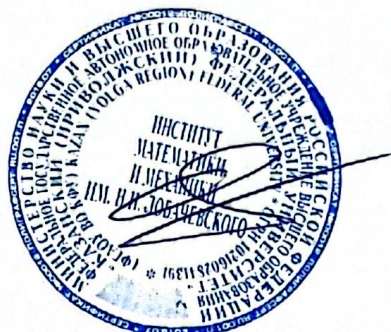
Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры компьютерной математики и информатики (голосование единогласное), протокол №1 от 29.08.2025 г.

доц., д.ф.-м.н., профессор
кафедры теоретической механики
института математики и механики
им. Н.И. Лобачевского
Казанского федерального университета



Д.В. Бережной

доц., к.ф.-м.н., заведующий кафедрой
компьютерной математики и информатики
института математики и механики
им. Н.И. Лобачевского.
Казанского федерального университета



О.А. Саченков

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" (ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет")

Адрес: 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1

Телефон: +7 (843) 233-74-00, e-mail: public.mail@kpfu.ru, сайт: kpfu.ru

