

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Айзиковича Сергея Михайловича на диссертационную работу Доля Александра Викторовича на тему: «Биомеханика артерий шеи и головы», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.10. Биомеханика и биоинженерия.

Заболевания сердечно-сосудистой системы являются одной из основных причин смертности среди взрослого населения планеты, при этом инсульты занимают среди этих болезней второе место. Ишемический инсульт может возникать при отрыве атеросклеротических бляшек, а геморрагический – при разрыве аневризм артерий головы, поэтому обе этих патологии являются крайне опасными и требуют детального изучения. Как правило, последствия инсульта, ишемического или геморрагического, являются крайне тяжелыми для пациента, зачастую приводят если не к летальному исходу, то к инвалидизации, и требуют длительной реабилитации.

Сочетание патологических изменений артериальной системы может существенно усложнять как диагностику, так и процесс планирования лечения пациентов, в связи с чем существует необходимость разработки методологий и систем поддержки принятия врачебных решений с использованием методов биомеханики и биомедицинского инжиниринга. Именно этому и посвящена данная работа. При этом предлагаемые в диссертации биомеханические подходы к оценке рисков развития аневризм и отрыва атеросклеротических бляшек являются универсальными и могут применяться для оценки рисков развития критических состояний на любых участках артериальной системы.

Актуальность темы исследования Александра Викторовича определяется приоритетными направлениями развития науки и техники «Науки о жизни», критическими технологиями «Технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний», а также «Биомедицинские и ветеринарные технологии» из перечней, утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011.

Объектом исследования данной работы являлись кровеносные сосуды шеи (общая сонная (ОСА), внутренняя сонная (ВСА) и наружная сонная (НСА) артерии) и головы (сосуды виллизиева круга, включающие передние, средние и задние

мозговые артерии, а также задние (ЗСА) и переднюю соединительные (ПСА), а также базилярную (БА) артерии).

Предметом исследования являлась гемодинамика артерий шеи и головного мозга при типовых граничных условиях на входе и выходе из сосудистого русла, а также биомеханические модели системы «стенка-кровь» комплекса артерий шеи и головы.

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.

Научная новизна работы состоит в том, что автором были получены следующие ключевые результаты:

1. Разработана концепция и создан прототип мобильного испытательного стенда для проведения одноосных испытаний на растяжение и сжатие с целью определения модуля Юнга и предела прочности образца непосредственно в медицинском учреждении.
2. Впервые проведены эксперименты по определению механических свойств артериальных стенок, покрышек атеросклеротических бляшек и самих бляшек непосредственно после хирургического вмешательства в рамках клиники.
3. Выявлен ряд показателей, по которым может проводиться сравнение нормального строения артериальной системы сосудов шеи и головы с вариантами, содержащими патологии.
4. 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.
5. Впервые предложены теоретические основы и методы практической реализации для 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.

Практическая значимость определяется тем, что 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. Были получены соответствующие патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Апробация работы проходила в ходе ее представления на всероссийских и международных симпозиумах, научных школах и конференциях. Также результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, докладывались на научных семинарах: на кафедре математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»; на кафедре вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»; в ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова» Минздрава России.

Краткий обзор работы. Диссертация Доля А.В. включает список использованных сокращений, введение, семь глав, заключение, одиннадцать приложений и список литературы. Работа представлена на 294 страницах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 34 таблицы, 38 страниц списка литературы, содержащего 306 ссылок.

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 содержит обзор литературы по теме диссертации. Обзор литературы в основном посвящен вопросам патологических изменений, возникающих в системе артериальных сосудов шеи и головы, их диагностике, лечению и взаимосвязи. Рассмотрены механические факторы, которые, по мнению научного сообщества, являются ключевыми в вопросах прогнозирования возникновения

патологических состояний кровеносных сосудов. Проанализированы основные методы создания геометрических моделей участков сосудистого русла. Описаны работы с различными типами граничных условий, применяющихся при моделировании гемодинамики. Рассмотрены вопросы создания экспериментальных стендов, исследования механических свойств биологических тканей и численного моделирования участков артериального русла. Показаны варианты применения систем поддержки принятия врачебных решений в области сердечно-сосудистой хирургии.

Глава 2 содержит описание основных методов и инструментов, использованных в ходе работы над диссертацией. Описана основная система уравнений, представляющая собой математическую постановку задачи о движении крови по сосудам с упругими стенками, описаны методы построения геометрических моделей, проведения натурных экспериментов, исследования сеточной сходимости, статистической обработки данных, а также создания программных приложений.

В **глава 3** более подробно рассмотрена математическая постановка задачи о гемодинамике артерий шеи и головы. Значительная часть главы посвящена исследованию различных вариантов постановки граничных условий, а также экспериментальному исследованию течения жидкости в системе разветвляющихся сосудов на испытательном стенде. Было показано, что наиболее близкими к физиологическим являются граничные условия типа Windkessel, в связи с чем именно они использовались в работе в дальнейшем.

Глава 4 содержит результаты проработки вопросов создания геометрических моделей исследуемых объектов. Описана методология моделирования в ручном режиме. Показаны результаты разработки программных продуктов для частичной автоматизации процесса создания моделей. Описаны созданные модели участка артериального русла шеи и головы.

Глава 5 посвящена исследованию механических свойств артерий шеи и головы. В данной главе были решены следующие задачи: выбор моделей материалов для артерий и атеросклеротических бляшек; проверка возможности применения методики сдвиговой эластографии для определения модуля Юнга артериальных стенок и компонентов атеросклеротических бляшек; разработка мобильного стенда для исследования механических характеристик атеросклеротических бляшек, а также участков сосудистых стенок; апробация мобильного стенда и верификация результатов на универсальной испытательной машине; проверка межэкспертной надежности разработанного мобильного стенда; проведение серии экспериментов по исследованию механических характеристик

атеросклеротических бляшек, покрышек бляшек, патологически измененных и здоровых сосудистых стенок; построение зависимости модуля Юнга атеросклеротических бляшек от чисел Хаунсфилда на КТ.

Глава 6 посвящена численному моделированию гемодинамики рассматриваемой артериальной системы. Была описана постановка задачи о движении крови в системе сосудов шеи и головы и проведен численный расчет в системе Ansys вариантов сочетанных патологий сосудов шеи и головы. Анализ результатов расчетов позволил выявить комбинации патологических состояний с повышенным риском образования аневризм и отрыва атеросклеротических бляшек.

Глава 7 посвящена разработке теоретических основ и методов практической реализации для системы поддержки принятия решений при сочетанной патологии участка сосудистого русла «сонные артерии-базилярная артерия-виллизиев круг». Была разработана методология оценки рисков образования аневризм в сосудах виллизиева круга и отрыва атеросклеротических бляшек. На основе методологии была создана система поддержки принятия врачебных решений, а также обучена нейросеть и внедрена в систему для более качественной оценки рисков. Также в главе описан процесс апробации системы.

В **заключении** приведены основные результаты исследования и выводы.

Содержание диссертационной работы говорит **об обоснованности и новизне научных положений и результатов**, выносимых на защиту.

В качестве **замечаний** следует отметить:

1. Автор показал, что допустимо для исследования стенок использовать модель изотропного однородного материала. Но, вероятно, для атеросклеротических бляшек следует использовать более сложные модели материалов, так как эти структуры являются неоднородными.
2. В главе 5 показаны результаты исследования механических характеристик в том числе и бедренных артерий, которые не использовались в расчетах. Возможно, следовало опустить демонстрацию этих результатов.

Указанные замечания не снижают качество представленного диссертационного исследования Доля А.В.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, тема, цель и задачи исследования соответствуют паспорту специальности 1.1.10 – Биомеханика и биоинженерия в части пунктов 1, 2 и 8, касающихся изучения физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем

(физико-математические науки); изучения закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах (физико-математические науки); изучения механических основ и проявлений процессов роста, развития и адаптации биологических объектов (физико-математические науки).

Подтверждаю, что диссертационное исследование Доля Александра Викторовича может по праву считаться 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 1.1.10. Биомеханика и биоинженерия, а ее автор Доля Александр Викторович заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Я, Айзикович Сергей Михайлович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Доля Александра Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

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»

С. Айзикович
04.09.2025

Сергей Михайлович Айзикович

Контактная информация:

344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, корп. 2, ауд. 308

Тел.: +7 863 238 15 58

E-mail: saizikovich@gmail.com

Подпись С.М. Айзиковича удостоверяю
Ученый секретарь Ученого совета ДГТУ



Владимир Николаевич Анисимов