

*На правах рукописи*



**Ли Чжи**

**Индивидуально-типологические особенности морфологических и  
биомеханических свойств сонных артерий в аспекте  
реконструктивной хирургии**

3.1.15. Сердечно-сосудистая хирургия

3.3.1. Анатомия и антропология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата медицинских наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)

**Научный руководитель:**

академик РАН, доктор медицинских наук,  
профессор

Гавриленко Александр Васильевич

доктор медицинских наук, профессор

Николенко Владимир Николаевич

**Официальные оппоненты:**

**Амбатьелло Сергей Георгиевич** – доктор медицинских наук, профессор Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева» Министерства здравоохранения Российской Федерации, клинично-диагностический отдел, ведущий научный сотрудник, отдел хирургии артериальной патологии, заведующий отделом; кардиохирургического отделения №12 (КДО), врач сердечно - сосудистый хирург

**Павлов Артем Владимирович** – доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, кафедра анатомии, заведующий кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «22» января 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета ДСУ 208.001.30 при ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет) по адресу 101000, г. Москва, Сверчков переулок, д. 5, Научно-практический центр интервенционной кардиоангиологии

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной учебной библиотеки ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (119034, г. Москва, Зубовский бульвар, д. 37/1) и на сайте организации [www.sechenov.ru](http://www.sechenov.ru)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДСУ 208.001.30  
кандидат медицинских наук, доцент



**Церетели Нино Владимировна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК), в частности ишемический инсульт занимает одну из ведущих причин смертности и инвалидизации во всем мире. На сегодняшний день актуальность лечения и профилактики возникновения ишемического инсульта имеет огромное медицинское и социально-экономическое значение (Naghypour M. et al., 2010). Согласно последним данным в России, количество людей, у которых возник инсульт составило 450 000 человек в год, из которых в 35% наблюдались летальные случаи в остром периоде заболевания, а частота ишемического инсульта доходила до 80–85% от общего количества (Бокерия Л. А. и соавт., 2014; Покровский А.В., 2004). Заболеваемость пациентов, страдающих ишемическим инсультом на 1000 населения в год, составляет 2,5–3,0 случая (Гавриленко А.В. и соавт., 2017). Главной причиной от 30% до 50% случаев ишемического инсульта является атеросклеротическое поражение сонных артерий (Мошкин А.С. и соавт., 2024; Концевая А.В. и соавт., 2018; Jusufovic M. et al., 2019). Патофизиология развитие атеросклероза включает в себя ряд последовательных процессов влияющих на стенку сосудов. В начале из интимы сосуда происходит поступления и выход липопротеидов и лейкоцитов, затем пролиферации и гибель клеток, что приводит к перестройке межклеточного вещества и заканчивается «обызвествлением» сосуда с формированием отложений в виде атероматозных (холестериновых) бляшек. Последующее разрастание в них соединительной ткани (склероз) и кальциноз приводят к деформации и сужению просвета сосуда вплоть до окклюзии (закупорки сосуда) (Гавриленко А.В. и соавт., 2022). Известно, что зона каротидной бифуркации самое частое место для возникновения холестериновых бляшек. По сравнению с артериями других бассейнов, сонные артерии имеют уникальную анатомо-топографические, геометрические, морфомеханические и гемодинамические характеристики, которые в значительной степени влияют на возникновение атеросклероза (Белов Ю.В. и соавт., 2018; Комаров Р.Н и соавт., 2019; Лосев Р.З. и соавт., 2012; Гавриленко А.В. и соавт., 2022 ; Николенко В.Н. и соавт., 2013; Bressloff N.W. et al., 2007).

Хирургическое лечение сонных артерий является важным инструментом в предупреждение и лечении ишемического инсульта, и их применение может существенно улучшить качество жизни пациентов с этой патологией. Данное утверждение согласуется с современными рекомендациями (Halliday A. et al., 2021; Lindström D. et al., 2012).

Было установлено, что каротидная эндартерэктомия является самым универсальным подходом при выборе тактики хирургического лечения (Белов Ю.В. и соавт., 2018). Глобально на сегодняшний день используются три вариации каротидной эндартерэктомии: с использованием заплаты (синтетическая/аутовена), эверсия сонной артерии и первичный шов

(Kolodgie F.D. et al., 2017). Реконструктивные операции на сонных артериях становятся все более распространенными, поэтому важно иметь детальное представление о нормальной морфологии этих артерий (Комаров Р.Н. и соавт., 2019).

Знание топографии и локальной гемодинамики и их корреляции с атеросклеротическим процессом крайне важно для повышения эффективности диагностики и терапии стеноза сонных артерий. Это, в свою очередь, способствует снижению риска цереброваскулярных заболеваний (Morbiducci U. et al., 2017). Изучение топографически нервов и кровеносных сосудов в области каротидной бифуркации может способствовать улучшению результатов каротидной эндартерэктомии. Измерение анатомических параметров нервов и кровеносных сосудов в области сонной артерии играют ключевую роль в уменьшении риска повреждения сосудов и нервов во время операции, что может привести к серьезным осложнениям.

Таким образом, возникла необходимость на основании анализа свойств сонных артерий обосновать выбор оптимального метода хирургического лечения и проанализировать ближайшие и отдаленные результаты хирургических лечений больных с атеросклеротическим поражением сонных артерий. Интегрированный клиническо-анатомический подход лежит в основе данного исследования, которое имеет важное значение в медицине, так как дает возможность значительно улучшить и оптимизировать результаты хирургического лечения патологий сонных артерий.

### **Степень разработанности темы исследования**

Представленная на защиту научно-квалификационная работа (диссертация) выполнена с соблюдением этических норм и принципов доказательной медицины. Необходимая степень достоверности представленных результатов (анализ анатомических характеристик, морфометрических и биомеханических свойств сонных артерий, результатов персонализированного подхода к выполнению хирургических вмешательств по поводу атеросклероза сонных артерий с учетом прогнозирования отдаленных результатов) обусловлена достаточным объемом выборки пациентов. Для репрезентативности диссертационной работы проводился подбор математических и программных средств статистической обработки (методами описательной, параметрической и непараметрической статистики). В исследовании для обработки данных одноосного растяжения была проведена стандартная обработка данных по растяжению (кривых напряжение деформация) с определением модуля Юнга (по участку с максимально длинным постоянным наклоном), также выбрана нелинейная модель (модель Yeoh) для описания гиперупругости. Используемые методы научного анализа отвечают поставленной цели и задачам. Научные положения, выводы и рекомендации четко обоснованы и логично вытекают из данных, полученных автором. Все результаты соответствуют

имеющемуся и полученному аспирантом первичному материалу, достоверны. В работе использован достаточный набор литературных источников.

### **Цель и задачи исследования**

Улучшить результаты и повысить эффективность хирургического лечения больных с атеросклеротическим поражением сонных артерий, путем анализа индивидуальных типологических особенностей и биомеханических характеристик.

Задачи исследования

1. Определить количественные (длина, диаметр наружный и внутренний) и качественные (эластичность, проходимость, состояния стенок артерий и толщина, угол бифуркации сонных артерий) анатомические характеристики сонных артерий на основании индивидуальных и типологических особенностей.

2. Изучить биомеханические свойства сонных артерий при различных типах механической нагрузки для понимания механизмов повреждения сосудов.

3. Выявить корреляцию морфометрических и биомеханических параметров сонных артерий.

4. Разработать универсальную математическую модель прогнозирования результатов реконструктивных операций на сонных артериях на основании вариабельности морфометрических и биомеханических характеристик.

5. Определить наиболее эффективную тактику хирургического лечения пациентов с атеросклеротическим поражением сонных артерий с учетом биомеханические и морфологические характеристик.

6. Изучить результаты оперативных вмешательств больных с атеросклеротическим поражением сонных артерий принимая во внимание анатомические и биомеханические характеристики.

### **Научная новизна**

Изучены биомеханические свойства сонных артерий, с помощью которых были определены базовые диапазоны и установлены различия (билатеральные, возрастные, половые). Кроме того, был проведен анализ корреляций морфометрических и биомеханических параметров сонных артерий для определения возможных статистически значимых взаимоотношений между морфобиомеханическими параметрами ее структурных компонентов. На основе полученных результатов была разработана универсальная математическая модель для персонализированного выбора оптимального метода хирургического лечения и прогнозирования результатов реконструктивных операций на сонных артериях, учитывая

вариабельность их морфобиомеханических характеристик. Эта модель может помочь в разработке персонализированных подходов к хирургическому лечению атеросклеротического поражения сонных артерий, учитывая уникальные морфометрические и биомеханические свойства каждого пациента, что может привести к улучшению результатов лечения и качеству жизни пациентов.

### **Теоретическая, практическая значимость исследования**

Проведенное исследование имеет важное значение для лечения пациентов с атеросклеротическим поражением сонных артерий. Оно расширяет научные представления о морфобиомеханических характеристиках сонных артерий, что обогащает теоретическую базу анатомии, физиологии и патофизиологии сосудистой системы.

Анализ корреляций между морфометрическими и биомеханическими параметрами сонных артерий привел к новым открытиям в области сосудистой системы. Оно позволяет установить новые взаимосвязи между структурными и функциональными аспектами сонных артерий, что способствует развитию интегративных подходов в изучении сосудистой системы.

В клиническом плане, исследование имеет важное значение, так как позволяет хирургам более точно планировать операции, учитывая индивидуальные особенности каждого пациента. Это снижает риск осложнений и повышает шансы на успешное восстановление.

### **Методология и методы исследования**

В рамках исследования проводилось наблюдение, сравнение и измерение данных при помощи клинических, инструментальных и лабораторных методов исследования, соответствующих этическим стандартам Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации. Обработка и анализ полученных данных проведен с использованием современных методов статистического анализа.

### **Положения, выносимые на защиту**

Изучены морфологические характеристики сонных артерий, а также их взаимосвязь с атеросклерозом. Отмечены статистически значимые различия внутреннего диаметра (ОСА, НСА и ВСА) и угла бифуркации в зависимости от пола. В зависимости от сторон (правая и левая) при анализе внутреннего диаметра различий не выявлено, но выявлены различия при анализе угла бифуркации. Эта информация является важной для хирургов, так как знание анатомических различий может помочь в более точном и безопасном выполнении операции, а также в индивидуализации подхода к каждому пациенту.

Так же в исследовании были изучены биомеханические свойства ОСА, НСА и ВСА. В результате было установлено, что растяжимость ВСА артерии в поперечном направлении выше, чем у НСА и ОСА, а растяжимость в продольном направлении оказалось выше у НСА и ОСА, чем у ВСА. Использование математической модели, на основании морфологических характеристик сонных артерий, позволяет повысить прогностическую ценность после хирургических вмешательств. Определены индивидуально-топологические особенности сонных артерий, которые позволили создать трехмерную модель с характеристиками кровотока и потоковым напряжением стенки сосуда, что позволяет более глубоко изучить влияние бляшки на кровоток и оценить риски, связанные с развитием сердечно-сосудистых заболеваний, а также смоделировать операцию каротидной эндартерэктомии с последующим анализом его исходов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 3.1.15. Сердечно-сосудистая хирургия, в частности п. 5 (клиническая, инструментальная, лабораторная диагностика заболеваний сердца, артериальной, венозной и лимфатической систем), п. 7 (хирургическое, включая эндоваскулярное, лечение заболеваний сердца, артериальной, венозной и лимфатической систем), п. 8 (профилактика, диагностика и лечение осложнений хирургических, включая эндоваскулярные, методов лечения заболеваний сердца, артериальной, венозной и лимфатической систем).

Также диссертация соответствует паспорту научной специальности 3.3.1. Анатомия и антропология, в частности п. 7 (выявление анатомо-антропометрических маркеров вероятности развития различных нозологических форм, эффективности их лечения, определение анатомо-клинических параллелей), п. 8 (анатомо-топографическое обоснование новых и усовершенствование существующих диагностических и оперативных вмешательств с учетом анатомической изменчивости и компьютерного моделирования).

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Результаты диссертационной работы и практические рекомендации, основанные на результатах исследования, с целью выбора оптимального метода хирургического лечения используются в клинической практике Отделения сосудистой хирургии Государственного научного центра Российской Федерации ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского». Материалы и результаты диссертационного исследования внедрены и используются в учебном процессе ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М.

Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет) при изучении дисциплин «Сердечно-сосудистая хирургия», «Анатомия и антопология» по направлениям подготовки 31.05.01 Лечебное дело, в виде практических занятий и лекций (для студентов, ординаторов, врачей).

### **Личный вклад автора**

Вклад автора диссертации заключается в выборе исследовательской темы, разработке методологического подхода, систематизации существующих литературных источников, а также в формулировании и обосновании целей, задач и плана исследования. Диссертант принимал непосредственное участие в реализации поставленных задач, включая выбор пациенток по критериям исследования, (осуществлялся отбор пациенток в соответствии с дизайном исследования, изучение индивидуально-типологических особенностей строения сонных артерий). Автор самостоятельно подготовил доклады и презентации, которые были представлены на научно-практических конференциях. Автор занимал ведущую позицию в написании и публикации результатов исследования, что составляет 90% от всей работы.

### **Публикации по теме работы**

По результатам исследования автором опубликовано 6 работ, в том числе 4 научные статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий Сеченовского Университета/ Перечень ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 1 статья в изданиях, индексируемых в международных базах (Scopus, PubMed), 1 иная публикация.

### **Структура и объем и диссертации**

Диссертация изложена на 106 страницах печатного текста и состоит из введения, обзора литературы, глав «Материалы и методы исследования», «Анализ морфологических и биомеханических результатов», «Математическое моделирование сонной артерии», «Заключение», выводов, практических рекомендаций, списка сокращений, списка литературы. Список литературы содержит 137 источника, из которых 27 отечественных и 110 зарубежных. Диссертация иллюстрирована 8 таблицами и 30 рисунками.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Материалы и методы исследования**

В исследовании используется корреляционный дизайн исследования (Correlational Research Design) и модель смешанного исследования (Mixed Methods Model). Целью

исследования является выявление корреляции между морфометрическими и биомеханическими параметрами сонных артерий, что предполагает изучение взаимосвязи между двумя или более переменными. Исследование включает две группы: кадаверная группа: морфометрия сонных артерий на препаратах, взятых от 20 трупов взрослых людей (кадаверный материал) и клиническая группа – 60 пациентов (с атеросклеротическим поражением сонных артерий), которые прошли открытое хирургическое вмешательство (клинические данные) в “Российском Научном Центре Хирургии имени академика Б.В. Петровского”.

Корреляционный дизайн исследования позволяет изучать взаимосвязь между переменными, не изменяя их значения. В этом исследовании корреляционный анализ будет использоваться для определения статистически значимых связей между морфометрическими и биомеханическими параметрами сонных артерий. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом Первого МГМУ имени И.М. Сеченова (выписка из протокола № 04-22 от 16.02.2022). Материал и методы исследования кадаверной группы: всего было выполнено 20 вскрытий и получено 40 латеральных сосудов. В группе было мужчин – 11(55%), женщин – 9 (45%). В группе критериями включения были следующие: пациенты > 40 лет; отсутствие выраженных патологических изменений структур сонных артерий, требующих хирургического лечения. К критериям исключения в исследование отнесли: онкологические заболевания и перенесенную химиотерапию в анамнезе.

До извлечения анатомического препарата образцы не подвергались разложению, промывались обильным количеством воды или искусственно отжимались; перед вскрытием они полностью перфузировались и замачивались в формалине. В экспериментальных инструментах использовалось обычное нейрохирургическое оборудование для вскрытия, и в то же время использовался специальный анатомический локатор человеческого мозга для фиксации человеческого мозга во время процесса вскрытия, а также использовалось измерительное оборудование для измерения после вскрытия. Подготовка трупных образцов сонных артерий является важнейшим процессом в анатомических исследованиях и хирургической подготовке, позволяющим получить представление об анатомии сосудов. В рамках диссертационной работы нами был предложен алгоритм, с помощью которого оценивались анатомоморфологических характеристик: определение высоты бифуркации общей сонной артерии, типа хода ВСА, сопровождающих нервов и связь между ними; с помощью гониометра измеряли  $\alpha$ -угол бифуркации сонной артерии ( $\alpha$ , угол между средней линией внутренней сонной артерии и наружной сонной артерией); расчёт расстояние от плоскости бифуркации сонной артерии до верхнего края щитовидного хряща выполнялся с помощью штангенциркуля; расчет  $d$  (внутренних диаметров) общей сонной артерии (ОСА) (примерно на 1,5 см ниже уровня бифуркации сонной артерии);, внутренней сонной артерии (ВСА) (примерно на 1,5 см

выше бифуркации сонной артерии) и наружной сонной артерии (НСА) с помощью нониуса и штангенциркуля.

После выделения сонных артерий в подготовленном образце определяли внутреннюю и наружную сонные артерии, а также общую сонную артерию. Затем, определенные участки сонной артерии нарезались кольцами или прямыми полосками в соответствии с морфологией образца сонной артерии. Прямыми полосками нарезались образцы для определения биомеханических свойств сонной артерии при одноосном продольном растяжении. Кольцевые образцы нарезались для определения биомеханических свойств сонной артерии при поперечном растяжении. Также были проведены тестовые измерения свойств стенки артерии с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). АСМ – это инструмент, который позволяет получать высокоразрешающие изображения поверхности материалов на атомном уровне. Целью данного исследования было получение данных о морфобиометрических свойствах стенки артерии, включая её структуру и механические характеристики. Эти сведения могут быть использованы для изучения механизмов цереброваскулярных заболеваний и разработки новых методов лечения. Среди достоинств атомно-силовой микроскопии можно выделить высокую точность: она обеспечивает получение изображений поверхности материалов с высокой степенью детализации, что позволяет исследовать их свойства на атомном уровне. Также стоит отметить высокую разрешающую способность АСМ, которая дает возможность получать детализированные изображения. Кроме того, метод не наносит вреда образцу, что позволяет изучать материалы в их естественном состоянии.

В итоге использование АСМ для измерения свойств стенки артерии является важным методом в исследовании цереброваскулярных заболеваний и разработке новых методов лечения. Материалы и методы исследования клинической группы: в "Научном Центре Хирургии имени академика Б.В. Петровского" в период с ноября 2021 года по январь 2023 года было проведено исследование, в рамках которого были собраны данные о 60 пациентах. Критериями включения в исследование являлось: возраст > 40 лет; ангиография сосудов БЦА-артерий; удовлетворительное общее состояние пациента; отсутствие в анамнезе онкологических заболеваний. Критериями исключения в исследование являлось: лучевая и химиотерапия в анамнезе и злокачественные онкологические заболевания.

Ангиография сонных артерий была проведена у всех пациентов, что позволило исследовать 120 артерий. Методом ангиографии определялись положение бифуркации и схема ветвления. Все сосуды анализировались на морфологические особенности, структуру просвета и анатомические характеристики бифуркации, а также на наличие атеросклеротических бляшек во внутренних сонных артериях. С помощью измерительного инструмента, который идет в комплекте с программой, производили измерение угла бифуркации общей сонной артерии,

измерение диаметра общей сонной артерии, самого широкого диаметра внутренней сонной артерии, диаметра начала внутренней сонной артерии и диаметра наружной сонной артерии. Для некоторых сонных артерий с бляшками, которые не поддавались точному измерению через ангиографию, была использована интраоперационная фотограмметрия. В дополнение была оценена морфология двусторонних сонных артерий пациентов, и все сосуды (120 боковых ветвей) были разделены на две категории в зависимости от наличия бляшек: I группа – с атеросклеротическими бляшками и II группа – без атеросклеротических бляшек.

Статистический анализ приведенных данных сосудистой морфологии показателей анатомических измерений был проведен с использованием – I. Количественные данные определяли –  $\bar{x} \pm s$  (среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение). Для сравнения информации по количественным показателям сравнивали с использовали t-критерий Стьюдента и критерий Хи-квадрат. ( $p < 0,05$ ) – различия показателей считались статистически значимыми. Обработка данных одноосного растяжения – проведена стандартная обработка данных по растяжению (кривых напряжение-деформация) с определением модуль Юнга (по участку с максимально длинным постоянным наклоном) (рисунок 13), максимальное напряжение и максимальное удлинение (в точке разрыва, где наблюдалось первое большое падение напряжений). Также была выбрана нелинейная модель (модель (Yeoh) Йео) для описания гиперупругости. Модель достаточно близко описывает экспериментальные данные в диапазоне напряжений  $0 - \approx 0.5$ , описывается уравнением с тремя независимыми параметрами ( $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$ ):

$$\sigma = 2 \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) (C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2)$$

Обработка данных АСМ были получены в режиме картирования областей 20x20 мкм, 32x32 силовые кривые.

Индивидуальные кривые обрабатывали контактной моделью Герца:

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{1 - \nu^2} \delta^{\frac{3}{2}} \sqrt{R}$$

Данные по карте и между картами (5-6 на образец) усредняли для получения финального значения.

Информация, полученная при биомеханическом исследовании, послужила материалом для создания компьютерной базы данных. Геометрическая модель и расчетная сетка были созданы с помощью Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 для моделирования стенотических сонных артерий с физиологической геометрической конусностью и кривизной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В кадаверной группе было исследовано 40 сонных артерий, которые мы классифицировали на три группы, в зависимости от морфологии бифуркации сонной артерии. Важно отметить, что в этих 40 случаях патологическая извитость сонных артерий не наблюдалась (рисунок 1).

**Тип А:** В эту группу вошли 5 (12,50%) случаев, при данном типе внутренняя сонная артерия сохраняет прямолинейную форму от своего начала и до удвоенной длины каротидного синуса, что свидетельствует о нормальном анатомическом строении.

**Тип В:** В эту группу вошли 19 (47,50%) случаев – начало изгиба внутренней сонной артерии в конце каротидного синуса, при этом сам каротидный синус остается прямым. Это указывает на наличие умеренной искривленности, которая начинается на уровне каротидного синуса.

**Тип С:** В эту группу входит 16 (40,00%) случаев. Пациенты с типом С демонстрируют искривление внутренней сонной артерии, которое начинается непосредственно от корня каротидного синуса. Это может указывать на более выраженные изменения в анатомии сосудов.

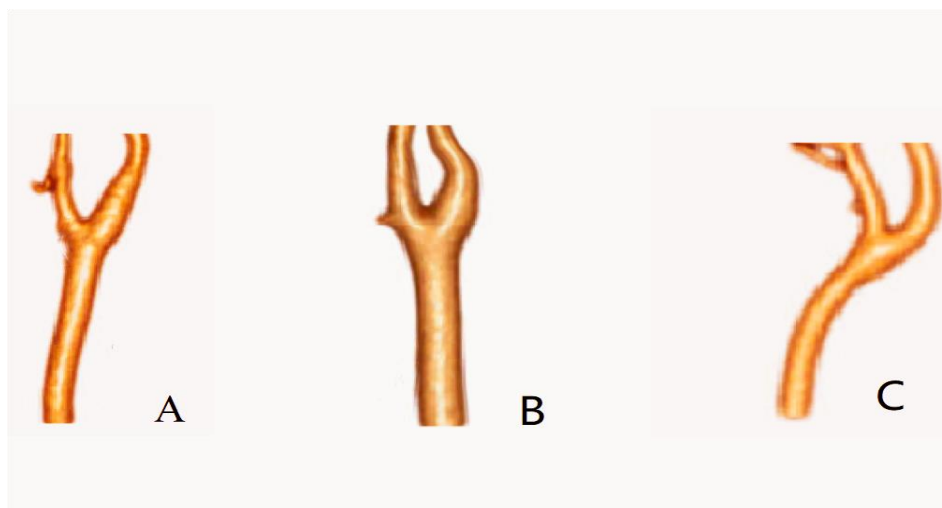


Рисунок 1 – Схема типов бифуркации сонной артерии

В данном исследовании мы проанализировали расположение бифуркации левой сонной артерии относительно верхнего рога щитовидного хряща. Выяснили, что в 55% случаев бифуркация находилась выше уровня этого рога, в 35% случаев – на одном уровне с ним, и только в 10% случаев – ниже. В случае правой сонной артерии результаты оказались иными: 65% пациентов имели бифуркацию выше верхнего рога щитовидного хряща, 30% – на одном уровне, и лишь 5% – ниже.

Статистически значимые различия внутреннего диаметра ОСА, ВСА и НСА и угла бифуркации были обнаружены между женским и мужским полом составил соответственно ( $p < 0.05$ ): среднее значение внутреннего диаметра ОСА у мужчин  $7.21 \pm 0.35$  см, а у женщин  $6.73 \pm 0.40$  см; среднее значение внутреннего диаметра ВСА у мужчин  $6.09 \pm 0.44$  см, а у женщин  $5.52 \pm 0.39$  см; среднее значение внутреннего диаметра НСА у мужчин  $5.21 \pm 0.54$  см, а у женщин  $4.32 \pm 0.50$  см; угол бифуркации у мужчин  $-39.75 \pm 7.26^\circ$ , у женщин  $30.62 \pm 6.60^\circ$ .

В результате исследования анатомии кровеносных сосудов в области бифуркации сонной артерии на 20 препаратах черепа (всего проанализировано 40 сонных артерий) были замечены некоторые незначительные различия в анатомических измерениях между левой и правой сторонами. Тем не менее, статистический анализ показал отсутствие значимых различий во внутреннем диаметре общей сонной артерии, а также внутренней и наружной сонной артерий ( $p > 0,05$ ).

Однако угол бифуркации сонной артерии продемонстрировал значительное различие: для левой стороны он составил  $38.66 \pm 7.64^\circ$ , тогда как для правой стороны –  $32.63 \pm 7.94^\circ$ . Это различие оказалось статистически значимым ( $p < 0,05$ ), что подчеркивает важность угла бифуркации как анатомического параметра, отличающего левую и правую стороны. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Различия внутренних диаметров и угла общей, внутренней и наружной сонных артерий между левой и правой сторонами (Среднее  $\pm$  Стандартное отклонение, мм)

Группы в зависимости от стороны СА	Кол-во	Внутренний диаметр ОСА	Внутренний диаметр ВСА	Внутренний диаметр НСА	Угол бифуркации СА
Левая	20	$7.08 \pm 0.45$	$5.78 \pm 0.50$	$4.78 \pm 0.77$	$38.66 \pm 7.64$
Правая	20	$6.91 \pm 0.42$	$5.89 \pm 0.51$	$4.84 \pm 0.60$	$32.63 \pm 7.94$
t		1.17	0.65	0.27	2.44
P		$> 0.05$	$> 0.05$	$> 0.05$	$< 0.05$

Структура артериальной стенки характеризуется высокой степенью сложности, обусловленной её трехслойным строением. Каждый из этих слоёв отличается уникальным строением и составом компонентов, что придает артериальной стенке особые механические свойства. Эта комплексность структуры и функциональности обеспечивает артериям способность адаптироваться к различным физиологическим условиям, обеспечивая тем самым эффективное кровоснабжение организма.

Обработка данных анатомической структуры сосудов включал в себя анализ характеристик трех основных слоев: интима, медиа и адвентиция. Каждый из этих слоев был исследован с обеих сторон, обращенных внутрь сосуда (интима и медиа) и наружу (экстериор).

Однако для адвентиции ситуация оказалась несколько иной: измерения с внешней стороны этого слоя провести не удалось. Это связано с тем, что поверхность адвентиции оказалась слишком мягкой, что затрудняло получение точных данных.

Средние значения и стандартные отклонения модуля Юнга для трехслойной структуры стенки артерий: интима (внешняя сторона) –  $6,2 \pm 1,9$ ; интима (внутренняя сторона) –  $4,0 \pm 1,2$ ; адвентиция –  $3,9 \pm 2,2$ ; медиа (внешняя сторона) –  $2,5 \pm 1,7$ ; медиа (внутренняя сторона) –  $2,9 \pm 1,7$ .

Проведена стандартная обработка данных по растяжению. Были определены: модуль Юнга на линейном участке ( $E$ ), максимальное напряжение ( $\sigma_{max}$ ), максимальная деформация ( $\epsilon_{max}$ ). В данных о растяжении артерий полоски могут демонстрировать продольные характеристики, тогда как кольца – поперечные.

Модуль Юнга, также известный как модуль упругости – это физическая величина, измеряющая способность материала сопротивляться деформации при воздействии внешней силы. Он определяется, как отношение напряжения к деформации в диапазоне упругости (т.е. в диапазоне, в котором не происходит постоянной деформации) материала. Если материал имеет высокий модуль Юнга, это означает, что он более устойчив к деформации при воздействии внешних сил. Разница в модуле Юнга при поперечном и продольном растяжении может считаться анизотропной.

По результатам обработки кривых одноосного растяжения можно сделать вывод, что общая сонная артерия, наружная сонная артерия и внутренняя сонная артерия имеют различные максимальные давления на растяжение, коэффициенты максимальной деформации и модули Юнга в продольном и поперечном направлениях (таблица 2).

Таблица 2 – Данные кривых одноосного растяжения (медиана [25 и 75 перцентиль])

Сосуд	Модуль Юнга, МПа	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация, доли единицы
Общая сонная, полоски	2.77 [1.47;5.21]	0.93 [0.69;1.68]	0.72 [0.54;0.80]
Общая сонная, кольца	1.97 [0.77;2.95]	0.51 [0.32;0.99]	0.71 [0.63;0.89]
Внутренняя сонная, полоски	3.54 [2.46;5.47]	0.94 [0.63;1.22]	0.46 [0.38;0.65]
Внутренняя сонная, кольца	4.16 [2.82;7.75]	1.41 [0.71;1.91]	0.70 [0.49;0.87]
Наружная сонная, полоски	4.58 [2.80;7.42]	1.23 [0.82;2.30]	0.52 [0.42;0.72]
Наружная сонная, кольца	4.08 [2.32;5.73]	1.19 [0.85;2.44]	0.74 [0.53;0.96]

По результатам обработки кривых одноосного растяжения можно сделать вывод, что общая сонная артерия, наружная сонная артерия и внутренняя сонная артерия имеют различные максимальные давления на растяжение, коэффициенты максимальной деформации и модули Юнга в продольном и поперечном направлениях.

Продольные показатели деформации общей сонной артерии и наружной сонной артерии превышали поперечные, а поперечные показатели внутренней сонной артерии превышали продольные. Из полученных данных видно, что, в отличие от других сосудов, внутренняя сонная артерия имеет большую максимальную деформацию и максимальное растягивающее усилие при поперечном растяжении и модуле Юнга, чем при продольном растяжении. Это означает, что внутренняя сонная артерия обладает большей податливостью и структурной прочностью в поперечном направлении. Это имеет значение для выбора подхода к каротидной эндартерэктомии (КЭА).

В клиническую группу исследования включили 60 пациентов, которым была выполнена ангиография сосудов головы и шеи. Из них 22 пациента были старше 70 лет, что составляет 36,67% от общего числа. Наименьшее количество пациентов в возрасте до 60 лет – 6 человек (10%). Число пациентов в возрасте от 60 до 65 лет равно количеству пациентов в возрасте от 65 до 70 лет, и в каждой группе по 16 человек (26,67%). Общая информация о возрастном распределении представлена. По данным возрастной статистики, все пациенты с атеросклерозом находились в возрасте от 60 до 75 лет, что составило 89,99% от общего числа участников исследования. Это свидетельствует о том, что атеросклероз чаще встречается у пожилых людей, причем наибольшее представительство наблюдается в группе 70-75 лет, составляющей 36,67% от всей выборки, что указывает на высокий риск в данной категории. В то же время среди лиц среднего возраста (45-60 лет) количество пациентов оказалось значительно меньше – всего 10,00% от общей выборки. Что касается бифуркации сонных артерий, все сосуды (120 коллатеральных сосудов) были разделены на три типа, соответствующих анатомическим структурам. Наиболее распространенной схемой бифуркации была тип В, которая составила 42% и 50% в I и II группах соответственно. Следующий по распространенности был тип С с долями 40% и 35% в группах I и II. Тип А имел наименьшее представление – 18% и 15% в группах I и II соответственно.

Тип В был выявлен у 42% пациентов с атеросклерозом, в то время как среди здоровых людей этот показатель возрос до 50%. Это может свидетельствовать о том, что тип В относительно чаще встречается в здоровой популяции или же он может быть связан с меньшим риском развития патологий. С другой стороны, тип С был обнаружен у 40% пациентов и снизился до 35% в группе здоровых. Это наблюдение может указывать на то, что тип С более распространен среди пациентов с атеросклерозом и может быть связан с повышенным риском поражения. Что касается углов бифуркации сонной артерии, в первой группе наибольшее

количество случаев наблюдалось в диапазоне углов от 30° до 40°, где было зафиксировано 28 случаев (46,67%). Следующим по частоте был угол от 40° до 50° – 17 случаев (28,33%), затем угол от 20° до 30° – 12 случаев (20,00%). Углы выше 50° встречались реже, всего в 3 случаях. В группе II наибольшее количество случаев также наблюдалось при угле от 40° до 50°, составив 28 случаев (46,67%), за которым следовал диапазон от 30° до 40° с 20 случаями (33,33%). Угол от 20° до 30° был представлен 9 случаями (15,00%), в то время как наименьшее количество случаев зафиксировано для угла ниже 20°, всего 2 случая. Анализ показал значительную корреляцию между углом бифуркации сонной артерии и наличием бляшек, однако статистическая значимость не достигла уровня  $p > 0,05$ . Это может указывать на то, что хотя и существует связь между этими параметрами, она не является достаточно сильной для того, чтобы делать однозначные выводы о влиянии угла бифуркации на риск развития атеросклероза.

Статистический анализ показал наличие значимой разницы в распределении углов бифуркации между двумя группами, что указывает на различия в анатомических характеристиках. Внутренний диаметр общей сонной артерии, в первой группе составил 7,40 мм со стандартным отклонением 0,63 мм, что превышает среднее значение 6,87 мм ( $\pm 0,44$  мм) во второй группе. Это также подтверждает наличие статистически значимой разницы в размерах общей сонной артерии между двумя группами. Анализ внутреннего диаметра внутренней сонной артерии показал, что в первой группе он составил 6,89 мм ( $\pm 0,76$  мм), что значительно больше среднего значения 5,62 мм ( $\pm 0,42$  мм) во второй группе. Разница в этих показателях также оказалась статистически значимой. Среднее значение внутреннего диаметра наружной сонной артерии в первой группе составило  $5,37 \pm 0,66$ , что было больше, чем среднее значение  $4,83 \pm 0,65$  во второй группе, и имелась статистически значимая разница между внутренними диаметрами наружной сонной артерии в двух группах (таблица 3).

Таблица 3. – Морфологические параметры сонной артерии и взаимосвязь с бляшками

Параметры	I группа с атеросклеротической бляшкой	II группа без бляшек	t	p
Угол бифуркации СА	$42.53 \pm 7.61$	$37.15 \pm 7.79$	3.825	< 0.01
Внутренний диаметр ОСА	$7.40 \pm 0.63$	$6.87 \pm 0.44$	5.165	< 0.01
Внутренний диаметр ВСА	$6.89 \pm 0.76$	$5.62 \pm 0.42$	11.25	< 0.01
Внутренний диаметр НСА	$5.37 \pm 0.66$	$4.83 \pm 0.65$	4.44	< 0.01

Внутренние диаметры общей сонной, внутренней сонной и наружной сонной артерий в группе I были больше, чем в группе II. Внутренняя сонная артерия имела наибольшую вариабельность в I и II группах, что согласуется с соответствующими сообщениями о бляшках в основном внутренней сонной артерии.

В Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 была создана геометрическая модель и расчетная сетка для анализа стенозированных сонных артерий с учетом их физиологической конусности и кривизны, что иллюстрируется на рисунке 24. Модель включает общую, внутреннюю и наружную сонные артерии с диаметрами: общей – 7.4 мм, наружной – 4.83 мм, а стенозированной внутренней – 5.62 мм на уровне бифуркации. Эти смоделированные размеры согласуются с нашими измерениями морфологии сонных артерий у пациентов со стенозом (рисунок 2).

Коэффициент стеноза сонной артерии рассчитывалась следующим образом:

$$\delta = (D - d) / D \times 100\%.$$

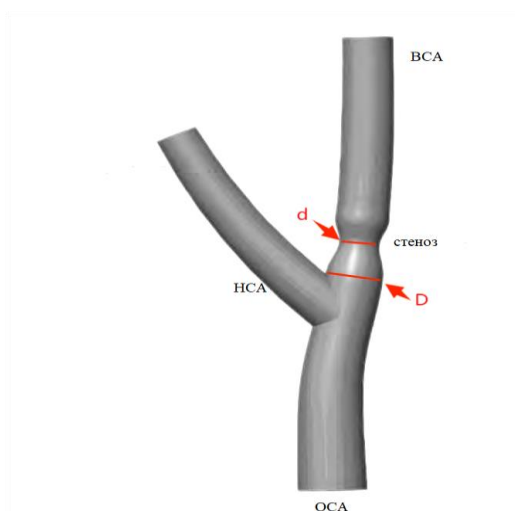


Рисунок 2 – Модель стеноза сонной артерии

D - внутренний диаметр у бифуркации внутренней сонной артерии (ед. изм -мм),  
d - внутренний диаметр в самой толстой части бляшки в месте стеноза (ед. изм -мм)

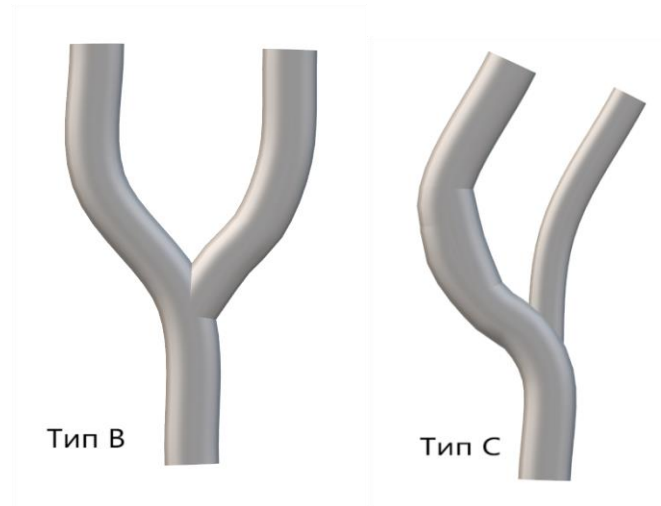


Рисунок 3 – Модели сонных артерий типа С и В

В то же время бифуркация сонной артерии моделировалась отдельно для типа В и типа С в соответствии с ее морфологической категорией (рисунок 3).

В этой модели общая сонная артерия выполняет функцию входа для кровотока, тогда как наружная и внутренняя артерии выступают в качестве выходов. Плотность крови обычно колеблется в пределах 1,050-1,060 кг/м<sup>3</sup>; в нашем численном моделировании было принято среднее значение плотности  $\rho=1,055$  кг/м<sup>3</sup> и физиологическое давление  $P$  равно 13,3 кПа [30].

(1) Условие скорости на входе: предполагается, что скорость на входе в сонную артерию изменяется во времени (рисунок 4).

(2) Условие давления на выходе: по истечении одного сердечного цикла поток крови на выходе пришел в стабильное состояние, и давление в сонной артерии установилось на уровне 0 Па.

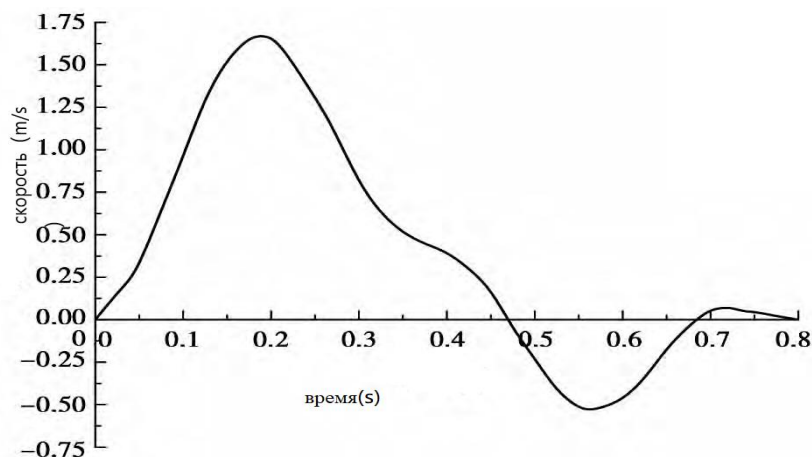


Рисунок 4 – График зависимости скорости от времени

Управляющие уравнения: Сердечный цикл  $T$  составляет 0.8 с, а шаг по времени расчета нестационарного состояния установлен на 10 мс. Предполагается, что поток крови в жестком артериальном сосуде представляет собой несжимаемую однородную ньютоновскую жидкость;

Управляющими уравнениями для потока являются уравнения Навье-Стокса для трехмерного нестационарного потока:

$$\begin{aligned}\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) &= \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + Su \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) &= \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + Sv \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) &= \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + Sw\end{aligned}$$

$u$ ,  $v$  и  $w$  - векторы скорости в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.  $\rho$  - плотность крови,  $p$  - давление в поле кровотока,  $\mu$  - коэффициент вязкости крови.  $S_u$ ,  $S_v$  и  $S_w$  - обобщенные исходные члены уравнения сохранения импульса. Для несжимаемых жидкостей  $S_u$ ,  $S_v$  и  $S_w$  равны 0.

$$\text{Уравнение непрерывности: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Степень стеноза сонной артерии линейно зависит от максимальной скорости кровотока. При коэффициентах стеноза 0.1 и 0.5 скорость кровотока увеличивалась с 2.818 м/с до 4.467 м/с с наклоном 4.122.

Площадь поперечного сечения внутренней сонной артерии уменьшается из-за стеноза, и скорость кровотока в месте стеноза больше (рисунок 5).

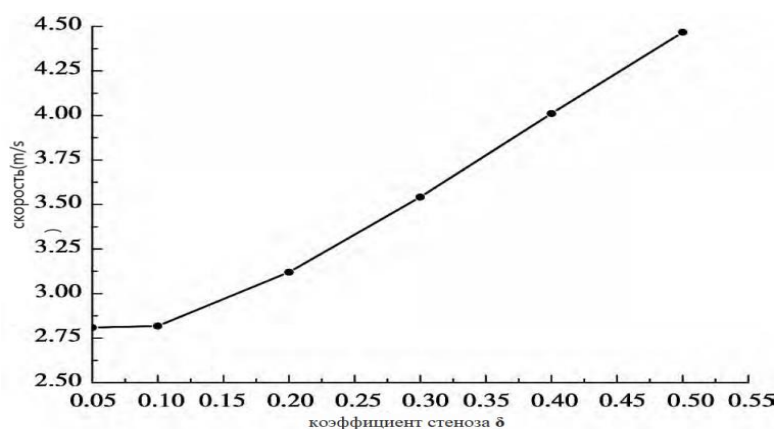


Рисунок 5 – Взаимосвязь между скоростью и коэффициентом стеноза

С увеличением степени стеноза наблюдаются все более заметные изменения в возврате крови рядом со стенозом. Распределение кровотока в сонных артериях с различной степенью стеноза отличается друг от друга, при этом стеноз внутренней сонной артерии оказывает определенное влияние на это распределение.

При равной степени стеноза моделирование линейных графиков для сонных артерий типов В и С демонстрирует, что распределение кровотока между этими типами также значительно различается (рисунок 6).

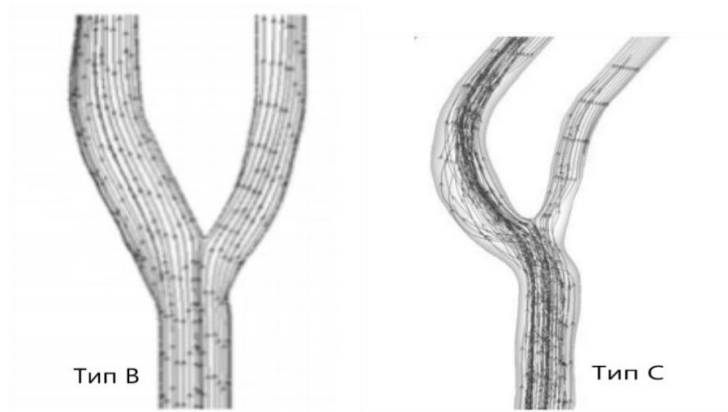


Рисунок 6 – Неньютоновское поле скоростей потоков в тип В и С бифуркациях сонных артерий

Влияние изменений в размере и направлении кровотока на формирование атеросклеротических бляшек в сонных артериях и восстановление поврежденных стенок сосудов является весьма значительным. Давление на стенку в месте каротидного стеноза с течением времени в течение сердечного цикла представлено на рисунок 7. Давление на стенку в месте стеноза уменьшалось с увеличением скорости входящего кровотока. Поскольку физиологическое давление в сонной артерии составляет 13.3 кПа. Во время систолы сердца давление на стенку в месте стеноза локально резко изменялось, в месте стеноза наблюдалось явление отрицательного давления, а значение давления на стенку в этом месте было наименьшим, когда скорость входящего потока крови достигала пикового значения. Во время диастолы сердца давление на стенку в месте стеноза существенно не изменялось, поскольку скорость входящего кровотока была небольшой.

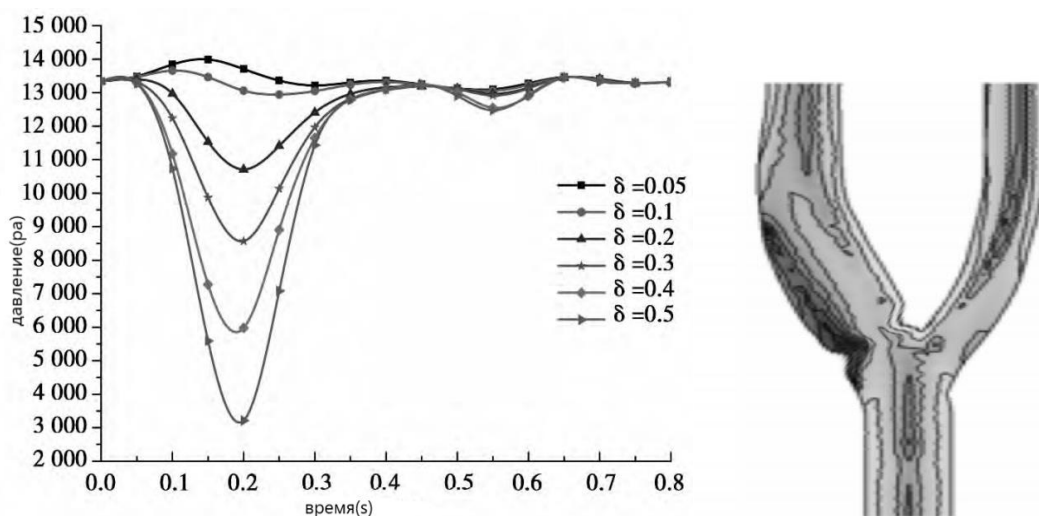


Рисунок 7 – Давление на стенку кровеносного сосуда при стенозе

Давление в стенке сосуда в месте стеноза сонной артерии значительно варьирует при различных коэффициентах стеноза, и стеноз внутренней сонной артерии влияет на динамику кровотока в сосудах дистальнее нижнего конца стенотического сегмента. Из-за пониженного давления в стенке сосуда в зоне стеноза невозможно обеспечить достаточный уровень кровотока ниже этого сужения, что приводит к феномену обратного сифона. Это уменьшает приток крови через внутреннюю сонную артерию и может вызвать недостаток кислорода в мозге, что увеличивает вероятность инсульта. Таким образом, разные уровни стенозов оказывают значительное влияние на кровоснабжение мозга и риск инсульта.

## ВЫВОДЫ

1. Морфометрические характеристики сонной артерии обеспечили данные для создания математической модели, используемой при реконструктивных операциях. Средний диаметр общей сонной артерии составляет  $7,4 \pm 4,88$  мм, внутренней  $5,62 \pm 0,44$  мм, наружной –  $5,83 \pm 0,54$  мм. Угол бифуркации равен  $39,75 \pm 7,26^\circ$ , с преобладанием типа В (47,5%). Бифуркация чаще всего находится над верхним краем щитовидного хряща.

2. Биомеханические характеристики общей, наружной и внутренней сонных артерий различаются по максимальному сопротивлению на растяжение, коэффициентам деформации и модулям Юнга. У общей и наружной артерий продольные показатели деформации выше поперечных, тогда как у внутренней – наоборот. Установлено, что биомеханические характеристики сонной артерии имеют анизотропную, нелинейную сосудистую онтологическую связь, которая может корректно описывать механические свойства кровеносных сосудов. И может быть использовано для моделирования гемодинамики сонной артерии.

3. Установлена связь между морфологией сонной артерии и атеросклерозом. Изменения внутреннего диаметра и угла бифуркации влияют на локальную скорость кровотока и потоковое напряжение. Частота бляшек возрастает с увеличением угла бифуркации, особенно при угле более  $40^\circ$ . Более широкий угол снижает скорость кровотока и напряжение сдвига стенки, что способствует образованию бляшек. Формирование атеросклеротических бляшек также влияет на модуль упругости стенки сосуда, при этом снижение упругости является признаком атеросклероза.

4. Разработана обобщенная математическая модель прогнозирования исходов рестеноза после операций по реконструкции сонной артерии на основе вариабельности морфологических характеристик сосудов.

5. Используя данные об морфологии и биомеханических свойствах сонных артерий: угол бифуркации сонной артерии, общей морфологии сонных артерий и их высоты, пол, степень эластичности артериальной стенки и бляшки и т.д. спланировать хирургический доступ, и метод восстановления сосудов. Прогнозировать и предотвращать возможные интраоперационные и послеоперационные осложнения, такие как повреждение нервов и рестеноз.

6. Полученные морфологических и биомеханических характеристик сонных артерий пациентов с индивидуальными типологическими особенностями позволяют создать трехмерную модель сонной артерии с характеристики кровотока и потоковым сдвиговым напряжением стенки сосуда *in vitro*. Это позволяет смоделировать операцию КЭА и более широко проанализировать ее результаты.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

1. Необходимо учитывать анатоморфологические и биомеханические данные для планирования хирургического доступа и выбора метода реконструкции сонной артерии, что позволит минимизировать риск интраоперационных и послеоперационных осложнений, таких как повреждение нервов (10 пара ЧМН ,7 пара ЧМН и чувствительных ветвей шейного сплетения) и рестеноз.

2. Применение разработанной математической модели для прогнозирования вероятности рестеноза после реконструктивных операций на основе морфологических характеристик сосудов может помочь в выборе оптимального подхода к лечению и в информировании пациентов о возможных исходах.

3. Учитывая, что с возрастом наблюдается снижение эластичности и растяжимости стенок сонной артерии при увеличении внутреннего диаметра, важно проводить регулярный мониторинг состояния сосудов у пожилых пациентов для раннего выявления атеросклероза и других сосудистых заболеваний.

4. При планировании операций следует учитывать гемодинамические изменения, связанные с углом бифуркации и локальными изменениями кровотока. Это поможет избежать неблагоприятных последствий, связанных с образованием атеросклеротических бляшек.

5. Применение трехмерного моделирования сонной артерии для анализа кровотока и потокового напряжения стенки сосуда *in vitro* может быть полезным для подготовки к операциям, позволяя хирургу лучше понять анатомию пациента и прогнозировать результаты вмешательства.

6. Важно обучать хирургов современным методам анализа морфометрических и биомеханических данных, чтобы они могли эффективно применять эти знания в клинической практике.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Николенко, В.Н. Оценка гемодинамических показателей на основе результатов ультразвуковой доплерографии при различных вариантах положения сосудов в области бифуркации общих сонных артерий / В.Н. Николенко, А.С. Мошкин, М.А. Халилов, А.Б. Бочкарев, **Ч. Ли.** // **Регионарное кровообращение и микроциркуляция.** – 2024. – Т. 23. – № 2. – С. 15-23.

2. Гавриленко, А.В. Корреляция между морфологическими и биомеханическими особенностями и атеросклерозом сонных артерий / А.В. Гавриленко, В.Н. Николенко, Н.Н. Аль-Юсеф, Т.С. Жарикова, Л.Р. Булатова, **Ли Ч.** // **Наука и инновации в медицине.** – 2022. – Т. 7. – № 3. – С 160-163.

3. Мошкин, А.С. Распространенность проявлений атеросклероза при различных вариантах положения сосудов в области бифуркации общей сонной артерии / А.С. Мошкин, М.А. Халилов, **Чжи Ли** [и др.] // **Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки.** – 2024. – № 4. [https://izvuz\\_mn.pnzgu.ru/mn424](https://izvuz_mn.pnzgu.ru/mn424)

4. Гавриленко, А.В. Клиническое значение анатомических особенностей сонной артерии при каротидной эндартерэктомии / А.В. Гавриленко, В.Н. Николенко, Ли Ч. // **Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.** – 2024. – № 5. – С. 205-210.

5. Xiang, R.P. Effects of Different Degrees of Carotid Artery Stenosis on the Expression of XIAP and Smac in the Ischemic Penumbra of Rats with Cerebral Ischemia-Reperfusion/ R.P. Xiang, M.J. Zhou, R. Cui, H.Y. Yu, Q. Chen, Y.J. Huang, **Z. Li**, C. Yu // **J Stroke Cerebrovasc Dis.** – 2021. – Т. 30. – № 2. – e105516. [Scopus, PubMed].

6. Cao, Y. Exploring the relationship between anastasis and mitochondrial ROS-mediated ferroptosis in metastatic chemoresistant cancers: a call for investigation / Y. Cao, C. Lu, N.M. Beeraka, S. Efetov, M. Enikeev, Y. Fu, X. Yang, B. Basappa, M. He, **Z. Li** // **Front Immunol.** – 2024. – № 15. – e1428920. [Scopus, PubMed].

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- ВСА** – внутренняя сонная артерия
- ОСА** – общая сонная артерия
- НСА** – наружная сонная артерия
- АСБ** – атеросклеротическая бляшка
- КЭА** – каротидная эндартерэктомия
- ПИА** – преходящие ишемические атаки
- ЛПНП** – липопротеины низкой плотности
- ТФ** – тромбоформация
- АХС** – атеросклеротический стеноз
- ИМТ** – интима-медиа толщина
- МЮ** – модуль Юнга (параметр упругости материала)
- АБД** – абсолютная биомеханическая Деформация
- ОБД** – относительная биомеханическая Деформация
- ППС** – предел прочности сосуда
- ОСН** – общая структурная нагрузка
- УБСА** – угол бифуркации сонных артерий
- МПСА** – морфометрические параметры сонных артерий
- АСМ** – атомно-силовой микроскоп
- ОНМК** – острое нарушение мозгового кровообращения