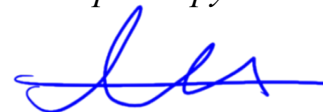


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВЫЙ МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
И.М. СЕЧЕНОВА МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (СЕЧЕНОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*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

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

**Научные руководители:**

доктор медицинских наук, профессор,

академик РАН

Гавриленко Александр Васильевич

доктор медицинских наук, профессор

Николенко Владимир Николаевич

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	13
1.1 Анатомические и морфологические особенности сонных артерий.....	13
1.2 Морфологические и биомеханические основы сонной артерии.....	15
1.3 Патогенез заболеваний сонных артерий.....	17
1.4 Методы реваскуляризации сонных артерий .....	20
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	26
2.1 Дизайн исследования.....	26
2.2 Материал и методы кадаверной группы исследования.....	27
2.2.1 Метод извлечения анатомического препарата для исследования.....	28
2.2.2 Анатомоморфологические характеристики сонных артерий и методы их определения.....	29
2.2.3 Показатели биомеханических свойств сонных артерий и методы их определения.....	31
2.3 Материал и методы исследования клинической группы.....	35
2.4 Статистический анализ данных исследования.....	38
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	42
3.1 Результаты и анализ анатомических и морфометрических характеристик сонной артерии кадаверной группы.....	42
3.1.1 Обсуждение морфологических характеристик при восстановительной хирургии сонной артерии.....	46
3.2 Анализ биомеханических данных сонной артерии.....	49
3.2.1 Биомеханические характеристики сонной артерии.....	49
3.2.2 Обсуждение биомеханического моделирования.....	55
3.3 Клинические данные пациентов и их анализ.....	59
3.3.1 Сравнение данных в группах .....	59
3.3.2 Обсуждение морфологии сонных артерий клинической группы.....	63

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОННОЙ АРТЕРИИ.....	67
4.1 Моделирование стеноза сонной артерии.....	67
4.1.1 Анализ скорости кровотока.....	70
4.1.2 Анализ давления на стенку.....	71
4.2 Обсуждение математической модели.....	73
4.3 Математическое моделирование сонных артерий в каротидной эндартерэктомии .....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	76
ВЫВОДЫ.....	87
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	89
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	90
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

## ВВЕДЕНИЕ

### 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 [76].

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 [1, 19]. Заболеваемость пациентов, страдающих ишемическим инсультом на 1000 населения в год, составляет 2,5–3,0 случая [24]. Главной причиной от 30% до 50% случаев ишемического инсульта является атеросклеротическое поражение сонных артерий [21, 27, 64].

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) [12].

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 [10-14, 46].

Хирургическое лечение сонных артерий является важным инструментом в предупреждении и лечении ишемического инсульта, и их применение может существенно улучшить качество жизни пациентов с этой патологией. Данное утверждение согласуется с современными рекомендациями [30, 102].

Было установлено, что каротидная эндартерэктомия является самым универсальным подходом при выборе тактики хирургического лечения [10]. Глобально на сегодняшний день используются три вариации каротидной эндартерэктомии: с использованием заплаты (синтетическая/аутовена), эверсия сонной артерии и первичный шов [80].

Реконструктивные операции на сонных артериях становятся все более распространенными, поэтому важно иметь детальное представление о нормальной морфологии этих артерий [11].

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 [41].

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 чётко 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 и практическая значимость работы**

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 позволит более глубоко изучить влияние бляшки на кровотоки 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 диссертации**

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 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.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 Анатомические и морфологические особенности сонных артерий

Анатомия сонных артерий является важной частью изучения системы кровообращения человека, поскольку эти артерии обеспечивают кровоснабжение мозга, шеи, и лица. Сонные артерии подразделяются на три основные группы: общая сонная артерия (ОСА), внутренняя сонная артерия (ВСА), и наружная сонная артерия (НСА) [20, 22].

Общая сонная артерия (ОСА) делится на правую и левую. Правая общая сонная артерия начинается от плечеголового ствола, а левая – непосредственно от аортального дуги. Обе ОСА поднимаются вверх по шее в направлении головы.

У здоровых людей общие сонные артерии с обеих сторон проходят сзади через грудинно-ключичный сустав и поднимаются латерально вдоль пищевода, трахеи и гортани, раздваиваясь на ВСА и НСА, когда достигают уровня плоской подъязычной кости (т.е. плоских 5 и 6 шейных позвонков)[19-23, 38].

Экстракраниальный отдел ВСА не имеет ветвей в шейной области, минуя каротидный синус интракраниальный отдел ВСА делится на несколько ветвей (2 основные артерии, питающие переднюю и среднюю часть головного мозга). Основные ветви включают переднюю мозговую артерию и среднюю мозговую артерию, снабжающие кровью переднюю и среднюю части мозга соответственно.

Наружная сонная артерия (НСА) отходит от ОСА и направляется к поверхности лица и шеи, давая множество ветвей, которые обеспечивают кровоснабжение кожи, мышц лица, височной области, и др. Основные ветви включают лицевую артерию, височную артерию, и затылочную артерию. НСА отвечает за кровоснабжение внешних структур головы и лица [14,15] (рисунок 1).

Каротидный синус представляет собой расширение на начальном участке внутренней сонной артерии (ВСА) в месте её отхождения от общей сонной артерии (ОСА). Это барорецепторная зона, чувствительная к изменениям артериального давления, которые реагируют на изменение давления в артерии, отправляя

сигналы в мозг для поддержания стабильного кровяного давления. При повышении давления в синусе рецепторы активируют рефлексы, приводящие к снижению частоты сердечных сокращений и расширению кровеносных сосудов, что способствует нормализации артериального давления [15,16].

Баро-хеморецепторная зона сонных артерий – гломус, находится в зоне бифуркации сонных артерий/ у основания ВСА [1,16]. Каротидные тельца/гломус являются хеморецепторами, которые чувствительны к изменениям уровня кислорода ( $O_2$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ) и pH крови. При снижении уровня кислорода в крови каротидные тельца стимулируют дыхательный центр в мозге для увеличения глубины и частоты дыхания, а также могут влиять на увеличение сердечного выброса и перераспределение кровотока для улучшения насыщения тканей кислородом.

С анатомической точки зрения основное кровоснабжение мозговой ткани в основном осуществляется двумя артериями (ВСА и базилярной артерией). ВСА входит в череп, образуя переднее и среднее мозговое кровообращение, а левая и правая внутренние сонные артерии отвечают за кровоснабжение некоторых мезенцефалических тканей и кровоснабжение первых 3/5 мозговых тканей полушарий головного мозга билатерально для обеспечения тканей мозга этих областей кислородом и другими питательными веществами [23]. Это означает, что гемодинамические изменения во внутренних сонных артериях напрямую влияют на ткани мозга, поэтому стеноз просвета внутренних сонных артерий и любые другие поражения, способные вызвать гемодинамические изменения во внутренних сонных артериях, могут привести к нарушениям функции мозга [15,43-45, 129].

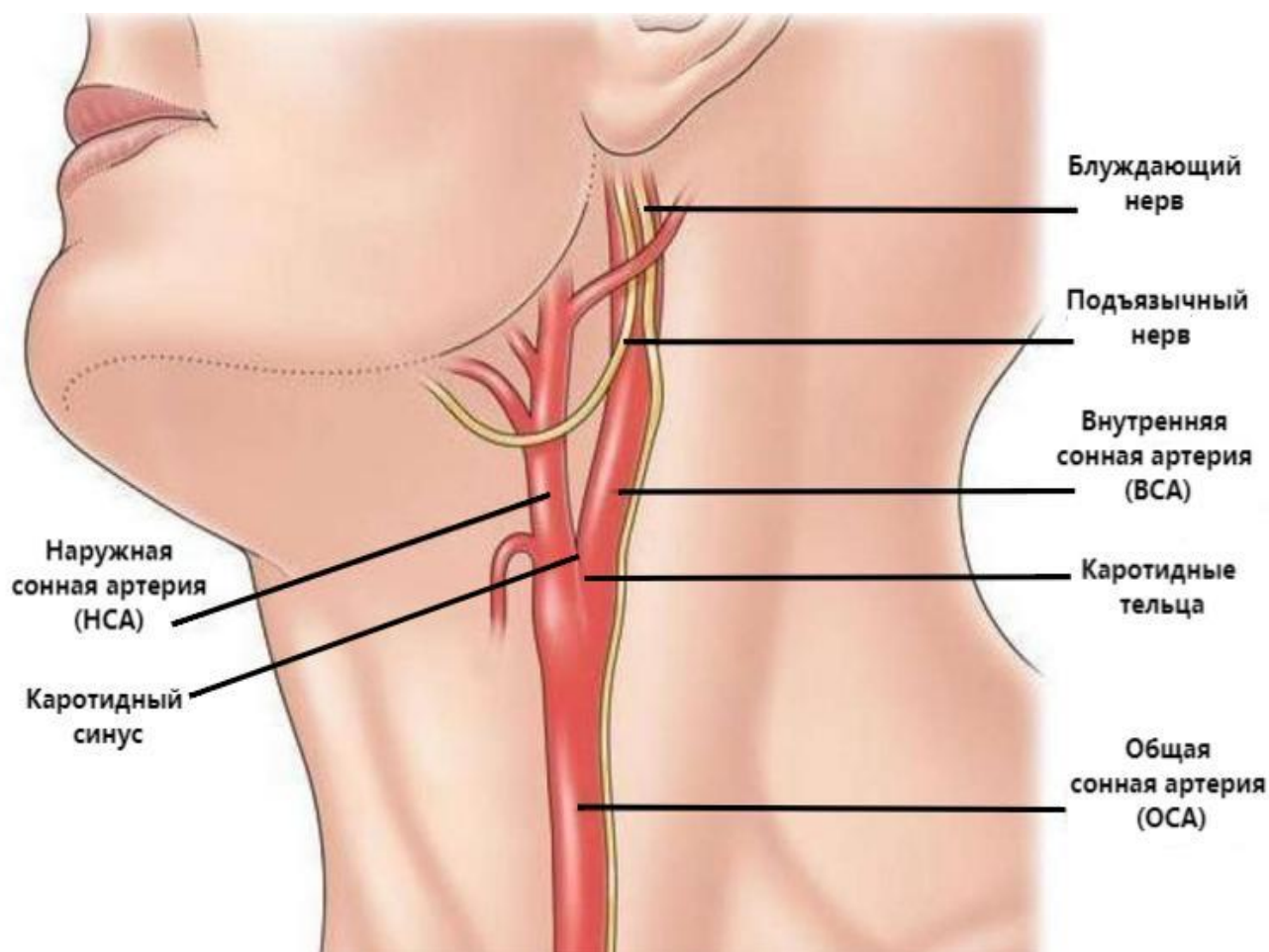


Рисунок 1 – Схематическая диаграмма анатомии сонной артерии от СЦРБ

## 1.2 Морфологические и биомеханические основы сонных артерий

Важными аспектами в изучении сосудистой системы, является оценка качественных и количественных характеристик сонных артерий, а также определение биомеханических параметров с учетом их индивидуально-типологические особенностей. Эти характеристики не только варьируются между разными людьми, но и меняются с возрастом, что может влиять на риск развития сосудистых заболеваний и стратегии их лечения [42-47].

Морфологические и биомеханические основы сонных артерий характеризуются индивидуально-типологическими особенностями морфометрических параметров, которые включают:

- Длину сонных артерий

- Наружный и внутренний диаметры сонных артерий
- Толщину стенки и ее оболочек
- Угол бифуркации сонных артерий

Кроме того, исследование [12, 31] показало, что проходимость сонных артерий изменяется с возрастом. Это имеет важное значение для понимания возрастных изменений в сосудистой системе и разработки эффективных методов лечения пораженных сонных артерий.

Длина сонных артерий может различаться в зависимости от анатомии человека, что имеет значение при хирургических вмешательствах.

Наружный и внутренний диаметры сонных артерий определяются генетически и могут меняться под влиянием факторов риска, таких как артериальное давление и атеросклероз.

Толщина стенки и ее оболочек указывает на структурные изменения, которые могут быть связаны с возрастом, гипертонией и другими заболеваниями.

Угол бифуркации сонных артерий варьируется индивидуально и может влиять на гемодинамику кровотока, а также на склонность к атеросклеротическим изменениям в области разветвления артерий [88-90].

Адаптация к гемодинамическим нагрузкам: Морфологические особенности сонных артерий, такие как толщина стенок и их структурная композиция, адаптируются к долговременным изменениям в гемодинамике.

Оценка биомеханических свойств сонных артерий возможна с учетом таких параметров как:

- Общая прочность
- предел прочности
- абсолютную и относительную деформации
- модуль Юнга

Все они имеют большое значение для создания математической модели сонной артерии [43,99-101].

Общая прочность сонной артерии отражает ее способность выдерживать внутреннее давление без разрыва. Это важный параметр для создания

математической модели сонной артерии, так как он влияет на ее поведение при различных нагрузках.

Предел прочности – это максимальное напряжение, которое сосуд может выдержать перед разрушением. Он является важным показателем прочности артерии и помогает предсказать ее поведение в различных ситуациях.

Абсолютная и относительная деформация характеризуют степень изменения формы артерии под воздействием нагрузки. Абсолютная деформация измеряет изменение длины или ширины артерии, а относительная деформация - изменение ее формы в процентах от исходной формы. Эти параметры важны для понимания поведения артерии при различных нагрузках и для разработки математических моделей ее функционирования.

Модуль Юнга – это величина, которая характеризует жесткость сосуда, то есть его способность противостоять деформации при растяжении. Он описывает, насколько сосуд может сопротивляться изменению своей формы под воздействием механических нагрузок.

Исследование этих параметров при одноосном продольном и поперечном растяжении образцов позволяет оценить механические свойства артерий и их изменения под влиянием различных факторов, включая возраст, артериальное давление, и наличие сосудистых заболеваний.

Реакция на сдвиговое напряжение: эндотелий сонных артерий чувствителен к сдвиговому напряжению, вызванному кровотоком. Изменения в сдвиговом напряжении могут стимулировать ремоделирование сосудов и выработку вазоактивных веществ, регулирующих сосудистый тонус [51,52].

### **1.3 Патогенез заболеваний сонных артерий**

Заболевания сонных артерий, в частности стеноз сонных артерий, в первую очередь вызваны атеросклерозом. Атеросклероз – это хроническое заболевание, поражающее средние и крупные артерии и характеризующееся отложением липидов в интимае, воспалительными реакциями и структурным ремоделированием

стенки сосуда. Этот процесс влияет не только на структуру, но и на функцию кровеносных сосудов и в конечном итоге может привести к стенозу или окклюзии, что в тяжелых случаях может привести к инсульту [67,68].

Согласно многочисленным исследованиям, основным гемодинамическим фактором риска развития атеросклероза сонных артерий является низкое напряжение сдвига кровотока (что способствует оседанию липидов и других веществ на стенках артерий), в противовес ему высокое напряжение сдвига играет ключевую роль в защите сонных артерий от атеросклеротических поражений (активирует механизмы, которые ингибируют пролиферацию гладкомышечных клеток сосудистой стенки и уменьшают воспалительные реакции, что способствует поддержанию нормальной структуры и функции сосудов [64, 66, 74, 82, 115-117, 132]).

Потоковые характеристики включают в себя два основных параметра: потоковое напряжение и напряжение сдвига кровотока. Место формирования атеросклеротических бляшек в просвете артерий напрямую зависит от этих двух параметров. Потоковые показатели зависят от насосной функции сердца (потоковое напряжение кровотока) и вязкости крови (напряжение сдвига кровотока) [41-43, 48]. Внутренний слой артерии, а именно интима, состоящая из слоя эндотелиальных клеток, которые вовлекаются в различные процессы (пролиферации, воспаления и др.) под влиянием потоковых параметров, участвуют в регулировании диаметра сосудов. Зона утолщения внутреннего слоя сосудов является зоной с низким напряжением сдвига кровотока, а зона истончения, наоборот обладает высоким напряжением сдвига кровотока, что характерно для внутренней сонной артерии [34, 60, 77, 123].

В экспериментальном опыте проведенном J.J. Chiu на домашних свиньях было доказано, что именно низкое сдвиговое потоковое напряжение запускает процесс атеросклероз и вызывает стеноз просвета [60].

Ряд ученых утверждает, что липидные компоненты крови легко накапливаются под интимой сосудов за счет вихревых токов крови, а низкое напряжение сдвига кровотока легко приводит к апоптозу эндотелия сосудов, что

индуцирует формирование атеросклеротической бляшки [113-115].

Низкое напряжение сдвига кровотока приводит к снижению эластичности стенки артерий и вызывает очаговую эндотелиальную дисфункцию, локальный воспалительный ответ, что влияет на процессы воспалительной активации эндотелиальных клеток.

Липопротеиды низкой плотности влияют на биомеханические факторы и гемодинамические факторы, так как способствуют развитию атеросклероза.

Напряжение сдвига кровотока играет важную роль в проницаемости стенки артерии и за счет активации механизмов воспаления и накоплению липидов стенки способствует формированию атеросклеротических бляшек. Высокое содержание холестерина может снижать экспрессию молекул адгезии сосудистых клеток I и E-селектина, влияя на воспалительные процессы в сосудах при опосредованном участии факторов некроза опухоли. Снижение экспрессии молекул адгезии может временно уменьшать воспаление, высокие уровни холестерина также способствуют другим процессам, таким как окисление липопротеидов низкой плотности и образование пенных клеток, что в конечном итоге может усугубить атеросклероз. Это подчеркивает сложность механизмов, связанных с атеросклерозом, где различные факторы могут иметь как защитные, так и вредные эффекты. Низкое сдвиговое напряжения кровотока увеличивает экспрессию адгезии-A, а именно вызывает адгезию моноцитов и сформирует локальную воспалительную реакцию.

Размер бляшки напрямую может влиять на кровоснабжение сосудистой стенки, то есть чем больше бляшка, тем выше степень гипоксия в ядре самой бляшки и стенки сосуда – это и есть механизм формирования нестабильной атеросклеротической бляшки [73,74].

Низкое сдвиговое потоковое напряжение в сосудах не способно непосредственно инициировать патофизиологические процессы, ведущие к образованию атеросклеротических бляшек. Тем не менее, оно может вызывать локализованную эндотелиальную дисфункцию и провоцировать воспалительный ответ, а также оказывать влияние на активацию эндотелиальных клеток.

## 1.4 Методы реваскуляризации сонных артерий

Хирургическое лечение пораженных сонных артерий является важнейшим вмешательством для пациентов, страдающих гемодинамически значимым стенозом сонной артерии, который может привести к нарушениям мозгового кровообращения. Стеноз внутренней сонной артерии является ведущим фактором риска ишемического инсульта, поскольку сужение артерии может привести к ограничению кровотока к мозгу, что может вызвать инсульт. Таким образом, эффективная терапия стеноза ВСА является ключевым направлением в профилактике ишемического инсульта и ОНМК [2-8, 124, 126].

Основным доказанным эффективным способом лечения гемодинамически значимого стеноза >70% сонной артерии является хирургическое лечение [2,6,9]. Операции на сонных артериях выполняются в области экстракраниальных отделов, риск послеоперационных осложнений при этом не превышает 7 % [5,8,15]. Каротидная эндартерэктомия в течение двух недель после ишемического инсульта значительно снижает риск повторного инсульта на стороне поражения (17% за два года против 27% без операции) [1-8]. При стенозе внутренней сонной артерии до 69% важно оценить вероятность возникновения осложнений; операция оправдана при нестабильной атеросклеротической бляшке. В других ситуациях предпочтительна консервативная терапия [2-16].

Два основных и популярных метода реваскуляризации сонной артерии являются разные вариации каротидной эндартерэктомии (КЭАЭ) и стентирование сонной артерии. Основные вариации метода КЭАЭ: первичный шов, синтетическая заплатка и эверсионная КЭ [18, 19].

Каждый метод имеет свои показания, преимущества и противопоказания, которые были подробно изучены в современной литературе. Каротидная эндартерэктомия долгое время считалась золотым стандартом лечения стеноза сонной артерии, особенно у симптомных пациентов. Это связано с низким уровнем периоперационного инсульта и смертности, обычно менее 2% у бессимптомных пациентов [24, 39, 65].

Каротидная эндартерэктомия (КЭАЭ) – это хирургическое вмешательство направленная на снижение риска инсульта путем коррекции стеноза общей сонной артерии. Эта методика развивалась с момента ее создания доктором Майклом Дебейки в 1953 году и остается краеугольным камнем в лечении заболеваний сонных артерий. Эта операция может проводиться под различными методами анестезии, включая общую, местную и регионарную анестезию, в зависимости от индивидуальных особенностей пациента и предпочтений хирурга [18,33,26, 19, 29].

Хирургическая техника включает в себя несколько важных этапов. Сначала делается разрез вдоль передней границы грудино-ключично-сосцевидной мышцы для доступа к сонной артерии. Затем обнажается общая сонная артерия и выполняется тщательное рассечение для выделения внутренней и наружной сонных артерий. В некоторых случаях может быть установлен шунт для поддержания церебральной перфузии во время пережатия сонной артерии, особенно у пациентов, которые могут плохо переносить пережатие сонной артерии [26, 33, 45, 46, 56, 63].

Техника эверсии сонной артерии включает в себя косой разрез на луковице сонной артерии, который позволяет полностью освободить внутреннюю сонную артерию от ее бифуркации с наружной сонной артерией. Этот метод облегчает удаление атеросклеротических бляшек вдоль проксимального отдела внутренней сонной артерии, сводя к минимуму риск осложнений, связанных с традиционными методами эндартерэктомии. Выбор между традиционными и эверсионными техниками зависит от анатомических особенностей пациента и характеристики бляшки. Послеоперационное ведение пациентов имеет решающее значение для предотвращения таких осложнений, как паралич подъязычного нерва, который может возникнуть из-за ретракции нерва во время операции [28, 35, 87].

Доказано, что использование регионарной анестезии под контролем ультразвука повышает безопасность и эффективность процедуры за счет снижения риска пункции сосудов и обеспечения адекватной анестезии. Кроме того, применение местных гемостатических средств во время операции было связано с

уменьшением числа осложнений, связанных с кровотечением, что является серьезной проблемой при КЭАЭ [25, 58].

Стентирование сонной артерии – метод, который приобрел популярность как менее инвазивная альтернатива КЭАЭ особенно для пациентов с высоким риском хирургических осложнений из-за сопутствующих заболеваний или анатомических особенностей [94, 105].

Операция включает в себя несколько ключевых этапов, которые обеспечивают как эффективность, так и безопасность. Первым этапом является подготовка пациента, которая включает проведение предоперационных визуализационных исследований, таких как дуплексное ультразвуковое исследование или ангиография, для оценки степени стеноза и анатомии сонных артерий [25, 39]. Пациентам назначают двойную антиагрегантную терапию, состоящую из аспирина и клопидогреля, чтобы снизить риск тромбоэмболических осложнений во время и после процедуры [98]. Как только пациент подготовлен, операция начинается с введения местной анестезии, хотя также может быть использована общая анестезия в зависимости от состояния и предпочтений пациента.

Место сосудистого доступа обычно выбирается в бедренной артерии-трансфеморальный доступ, хотя в некоторых случаях также используется лучевой доступ. Затем в артерию вставляется оболочка, позволяющая ввести проводник и катетер к сонной артерии. После получения доступа к сонной артерии баллонный катетер продвигается к месту стеноза. Баллон надувается для расширения суженного сегмента артерии, что помогает восстановить кровоток [91-102]. После баллонной ангиопластики на месте стеноза устанавливается стент. Стент, обычно изготовленный из сетчатого материала, предназначен для обеспечения структурной поддержки артерии и предотвращения повторного сужения (рестеноза) [13].

Выбор типа и размера стента имеет решающее значение и часто определяется специфической анатомией сонной артерии пациента [40]. В некоторых случаях во

время стентирования рекомендуется использовать устройство для защиты от эмболии.

Стентирование сонной артерии – это малоинвазивное хирургическое вмешательство, которое является эффективной альтернативой каротидной эндартерэктомии для лечения стеноза сонной артерии. Тщательный отбор пациентов, тщательная техника проведения процедур и надлежащее использование дополнительных устройств, таких как устройство для защиты от эмболии., имеют решающее значение для оптимизации результатов и минимизации осложнений.

Развитие хирургических технологий, анестезиологического обеспечения и послеоперационного ухода способствовало улучшению результатов и снижению частоты осложнений. Поскольку понимание анатомии пациента и хирургических подходов продолжает улучшаться, КЭА, вероятно, останется стандартным методом профилактики инсультов у пациентов со значительными поражениями сонных артерий [126, 127].

КЭАЭ может подойти не всем пациентам, особенно тем, у кого имеются значительные сопутствующие заболевания или анатомические особенности. В таких случаях стентирование сонной артерии стало жизнеспособной альтернативой, особенно для пациентов с высоким риском хирургического вмешательства. Исследование проведенное, M.L. Schermerhorn et al. показало, что стентирование может быть выполнено с относительно низким уровнем осложнений, и это особенно полезно для пациентов, которые не являются кандидатами на проведение КЭАЭ из-за их истории болезни или анатомических особенностей [39].

Сравнительная эффективность этих двух методов была предметом многочисленных исследований. Например, недавний анализ показал, что реваскуляризация более новая форма стентирования сонных артерий через цервикальный доступ, связана с более низким риском инсульта или смерти по сравнению с традиционным трансфеморальным стентированием сонной артерии [39]. Это говорит о том, что цервикальный доступ стентирования СА может стать более безопасной альтернативой для определенных групп пациентов. Более того,

отдаленные результаты стентирования были благоприятными: в исследованиях сообщалось об эффективном лечении стеноза сонной артерии и значительном снижении частоты инсульта [39].

Помимо выбора метода, важным аспектом стентирования сонной артерии является устранение рестеноза в стенке. У пациентов, перенесших стентирование, может возникнуть "интрастенозный рестеноз" (in-stent restenosis), что требует дальнейшего вмешательства. Варианты лечения "интрастенозного рестеноза" включают повторное стентирование или хирургические методы, такие как КЭАЭ (рисунок 2).

Например, в случаях рестеноза после КЭАЭ риски, связанные с повторной операцией, могут быть выше из-за образования рубцовой ткани, что в некоторых случаях делает стентирование предпочтительным вариантом [39].

Таким образом, реваскуляризация сонной артерии может быть эффективно достигнута либо с помощью каротидной эндартерэктомии, либо со стентированием сонной артерии, причем выбор метода зависит от индивидуальных особенностей пациента и клинических показаний. Будущие исследования, вероятно, будут направлены на совершенствование этих методов и понимание долгосрочных последствий каждого метода.

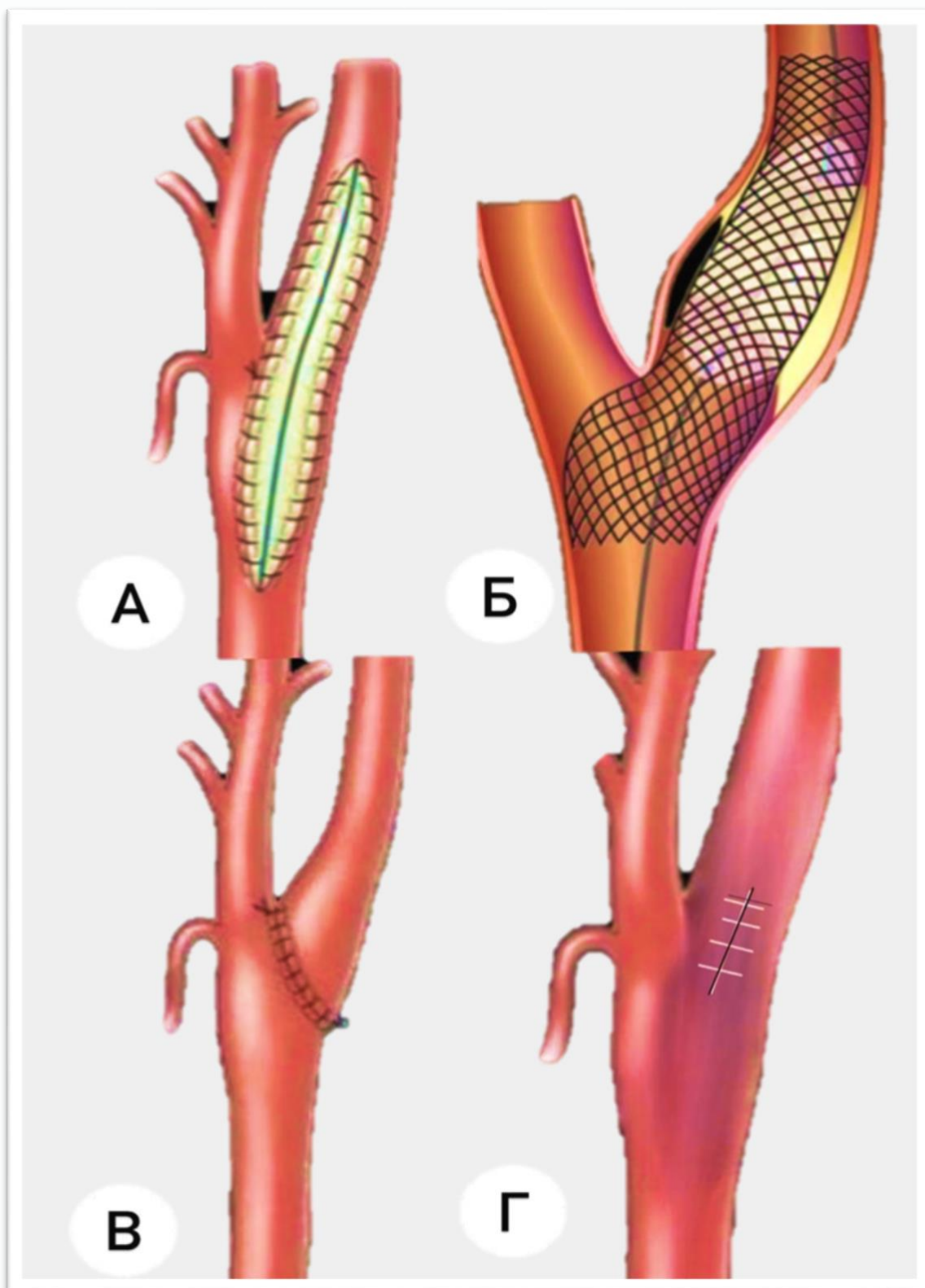


Рисунок 2 – Виды хирургического вмешательства на СА: А-классическая КЭАЭ с синтетической заплатой, Б-стентирование, В- эверсионная КЭАЭ, Г-КЭАЭ с первичным швом

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Дизайн исследования

В этом 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.

В этом исследовании используются два типа данных (рисунок 3):

- Кадаверная группа: морфометрия сонных артерий на препаратах, взятых от 20 трупов взрослых людей (кадаверный материал).
- 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).

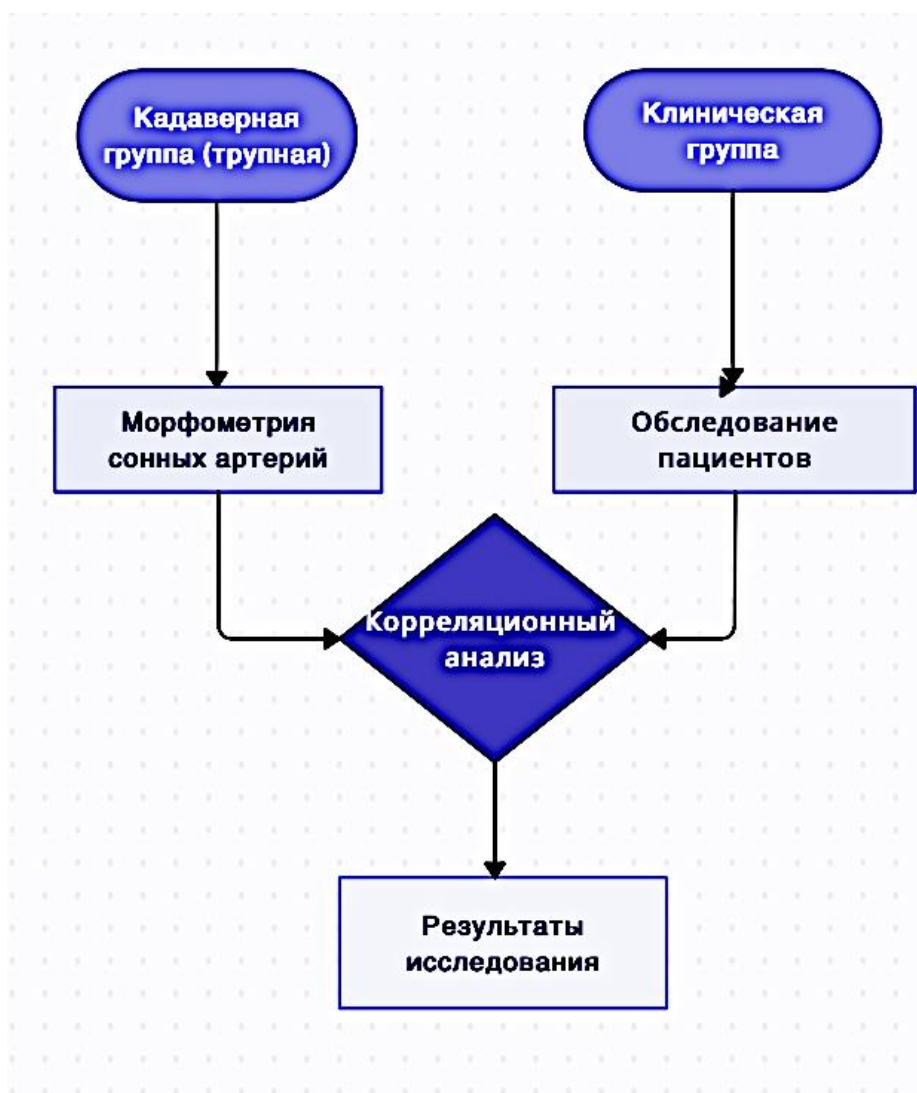


Рисунок 3 – Схема дизайна исследования

## 2.2 Материал и методы кадаверной группы исследования

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;
- мужской и женский пол
- отсутствие выпяченных 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 локализатор человеческого мозга для фиксации человеческого мозга во время процесса вскрытия, а также использовалось измерительное оборудование для измерения после вскрытия.

### **2.2.1 Метод извлечения анатомического препарата для исследования**

Подготовка трупных образцов сонных артерий является важнейшим процессом в анатомических исследованиях и хирургической подготовке, позволяющим получить представление об анатомии сосудов.

Методология выполнения каротидной эндартерэктомии (КЭАЭ) на образце трупа, особенно в контексте анатомических исследований, предполагает системный подход, обеспечивающий сохранение анатомических структур. Она состоит из последовательных действий:

Голова трупа устанавливается на анатомический фиксатор для обеспечения стабильности и оптимального доступа к месту оперативного вмешательства. Такое расположение имеет решающее значение для имитации реальной хирургической обстановки и позволяет проводить точное анатомическое вскрытие.

Первоначально сонные артерии канюлируются с помощью пластиковых трубок, что позволяет проводить инфузию жидкости. Этот процесс имеет решающее значение для обеспечения надлежащего заполнения и сохранности сосудистых структур, при котором катетеризируются как сонная, так и позвоночная артерии с последующей промывкой водой для удаления остатков крови перед фиксацией в формальдегиде на длительный период. Этот метод помогает

сохранить структурную целостность артерий и позволяет проводить детальные анатомические исследования

Кожа, обрабатывается и дезинфицируется, чтобы свести к минимуму загрязнение во время хирургического вмешательства. Вдоль переднего края грудино-ключично-сосцевидной мышцы делается продольный разрез размером приблизительно 7-8 см. Этот разрез расположен таким образом, чтобы обеспечить достаточный доступ к сонным артериям и свести к минимуму травматизацию окружающих тканей. - Разрез углубляется через кожу, подкожную клетчатку и фасции с последующим тщательным рассечением мышечных слоев. Грудино-ключично-сосцевидная мышца отводится вбок, чтобы получить доступ к нижележащим сосудистым структурам.

После выполнения разреза выделяются общая сонная артерия (ОСА), внутренняя сонная артерия (ВСА), наружная сонная артерия (НСА), и другие кровеносные сосуды шеи, которые тщательно очищаются от окружающих соединительных тканей и структур.

### **2.2.2 Анатомоморфологические характеристики сонных артерий и методы их определения**

В рамках диссертационной работы нами был предложен алгоритм, с помощью которого оценивались анатомоморфологических характеристик:

1. определение высоты бифуркации общей сонной артерии, типа хода ВСА, сопровождающих нервов и связь между ними;
2. с помощью гониометра измеряли  $\alpha$  -угол бифуркации сонной артерии ( $\alpha$ , угол между средней линией внутренней сонной артерии и наружной сонной артерией);
3. расчёт расстояние от плоскости бифуркации сонной артерии до верхнего края щитовидного хряща выполнялся с помощью штангенциркуля;
4. 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 (рисунок 4) [5].

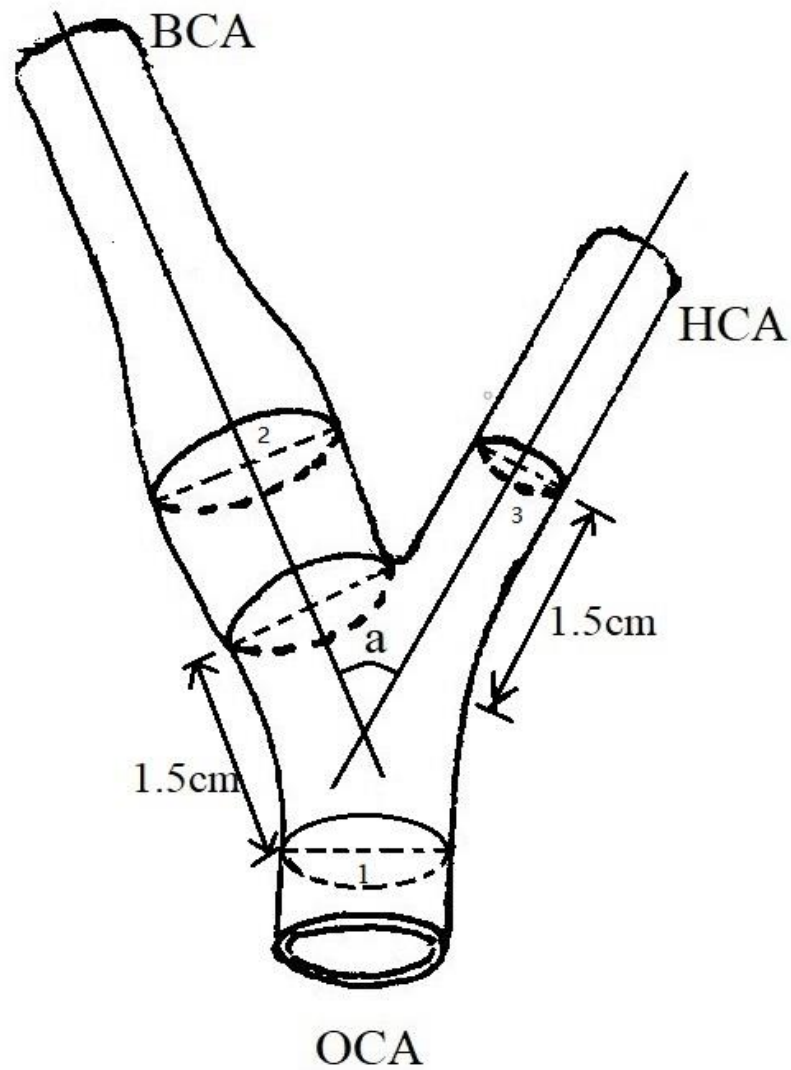


Рисунок 4 – Анатомотопографические ориентиры на сонных артериях:

- $\alpha$  – угол между центральной линией наружной и внутренней сонных артерий;
- 1 – d (внутренний диаметр) ОСА;
- 2 – d ВСА;
- 3 – d НСА.

### 2.2.3 Показатели биомеханических свойств сонных артерий и методы их определения

После выделения сонных артерий в подготовленном образце определяли внутреннюю и наружную сонные артерии, а также общую сонную артерию (рисунок 5).

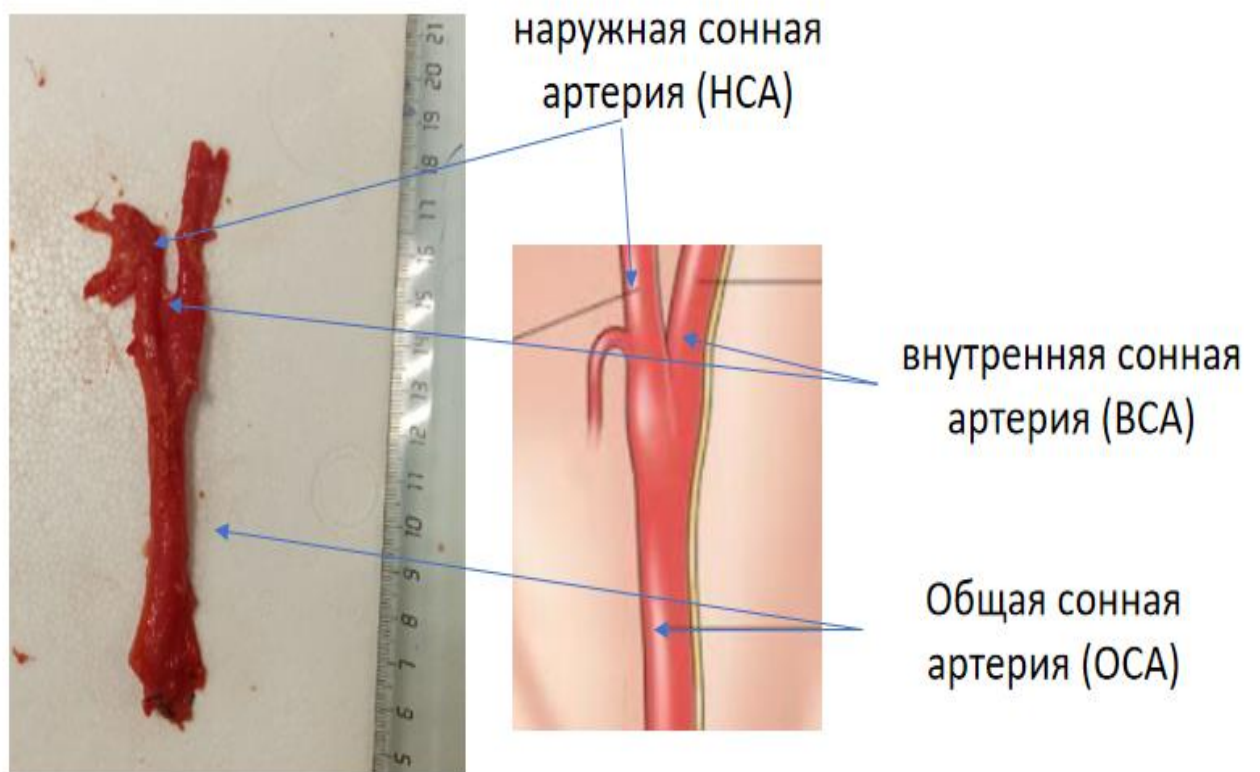


Рисунок 5 – Образец сонной артерии

Затем определенные участки сонной артерии нарезались кольцами или прямыми полосками в соответствии с морфологией образца сонной артерии (рисунок 6,7).

Прямыми полосками нарезались образцы для определения биомеханических свойств сонной артерии при одноосном продольном растяжении (рисунок 8). Кольцевые образцы нарезались для определения биомеханических свойств сонной артерии при поперечном растяжении (рисунок 9).

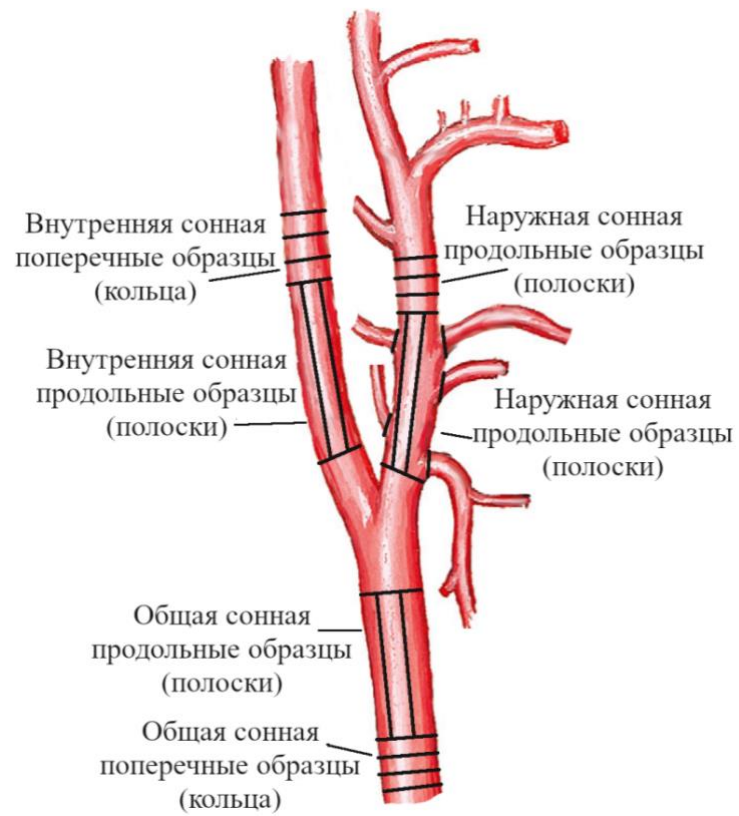


Рисунок 6 – Подготовка образцов (положение полосок и колец варьировалось в зависимости от состояния конкретного сосуда)



Рисунок 7 – Вид нативных образцов, подготовленных для исследования (пример)

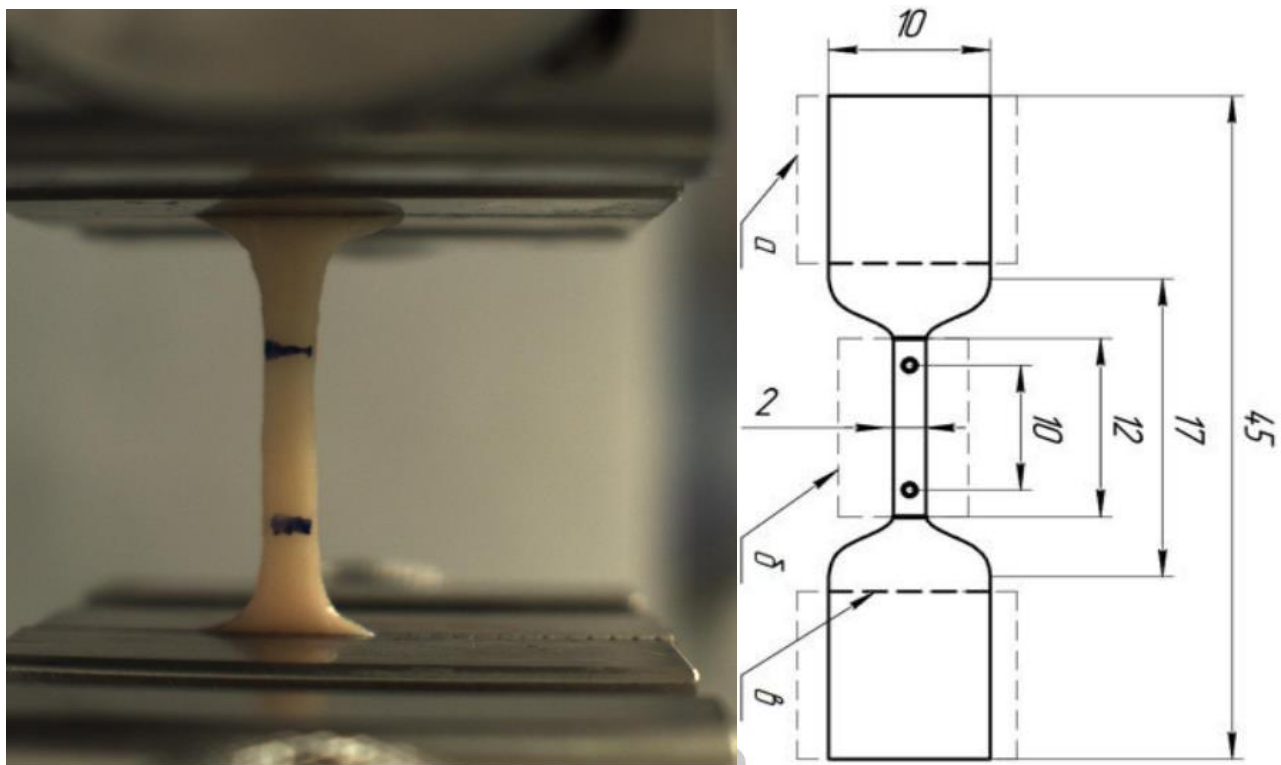


Рисунок 8 – Положение стандартизированного продольного образца артерий между траверсами разрывной машины

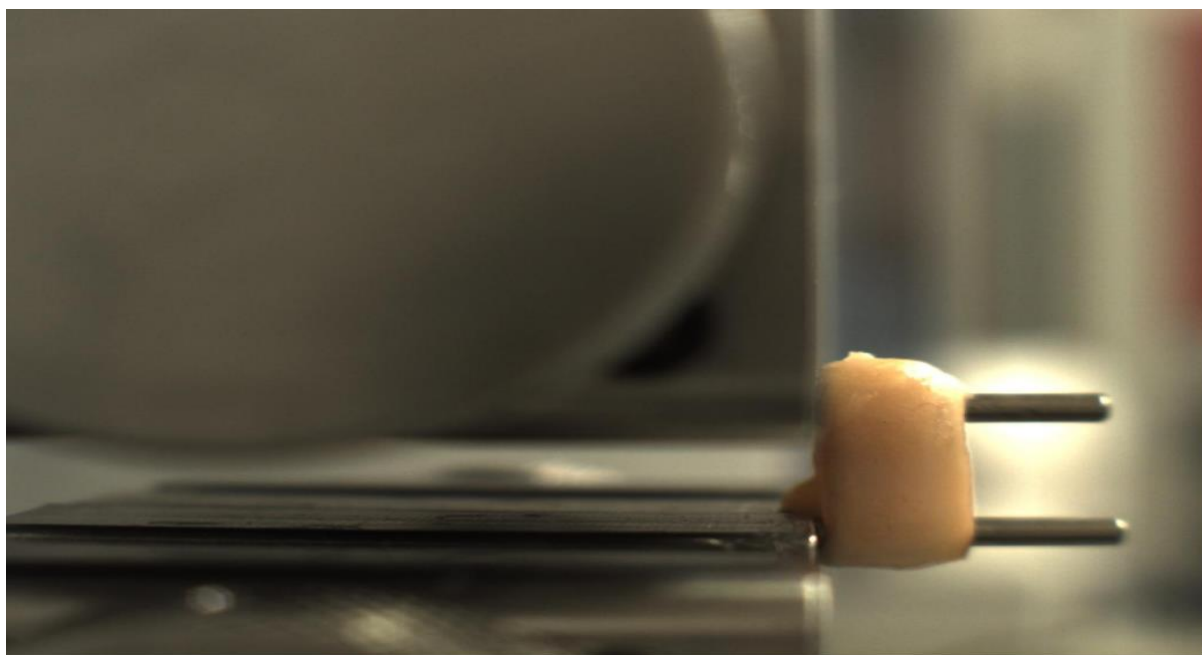


Рисунок 9 – Положение поперечного образца артерий и способ его фиксации между траверсами разрывной машины

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.

Процесс измерения свойств стенки артерии включал следующие шаги:

1. Подготовка образца: с помощью скальпеля и пинцета небольшой участок стенки общей сонной артерии расслоили на три слоя: интима, медиа и адвентиция.
2. Разделение слоев: Каждый слой делили на две части.
3. Приклеивание на чашку Петри: Обе части каждого слоя фиксировали на чашке Петри так, чтобы обе стороны слоя смотрели вверх.
4. Использование кантилевера: применяли кантилевер с радиусом острия 70 нм для сканирования поверхности слоев.

В атомно-силовой микроскопии используется кантилевер – инструмент для сканирования материалов на поверхности. Радиус его острия составляет 70 нм, что обеспечивает высокую точность исследований. 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 (АСМ) 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.

### **2.3 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, мужской и женский пол
- ангиография сосудов БЦА-артерий
- удовлетворительное общее состояние пациента;
- отсутствие в анамнезе онкологических заболеваний;

***Критериями исключения в исследование являлось:***

- Лучевая и химиотерапия в анамнезе.
- 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, как указано на рисунках 10 и 11.

Для некоторых сонных артерий с бляшками, которые не поддавались точному измерению через ангиографию, была использована интраоперационная фотограмметрия, как показано на рисунке 12.

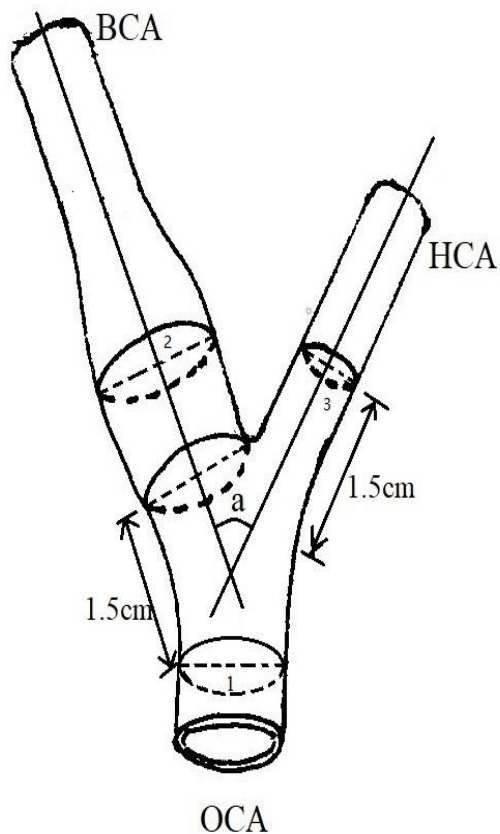


Рисунок 10 – Схема измерения параметров сонных артерии и ее проекция на ангиограмме

НСА, наружная сонная артерия; ВСА, внутренняя сонная артерия; ОСА, общая сонная артерия;

$\alpha$  - угол между центральной линией наружной и внутренней сонных артерий;

1. Внутренний диаметр общей сонной артерии;
2. Внутренний диаметр внутренней сонной артерии;
3. Внутренний диаметр наружной сонной артерии.

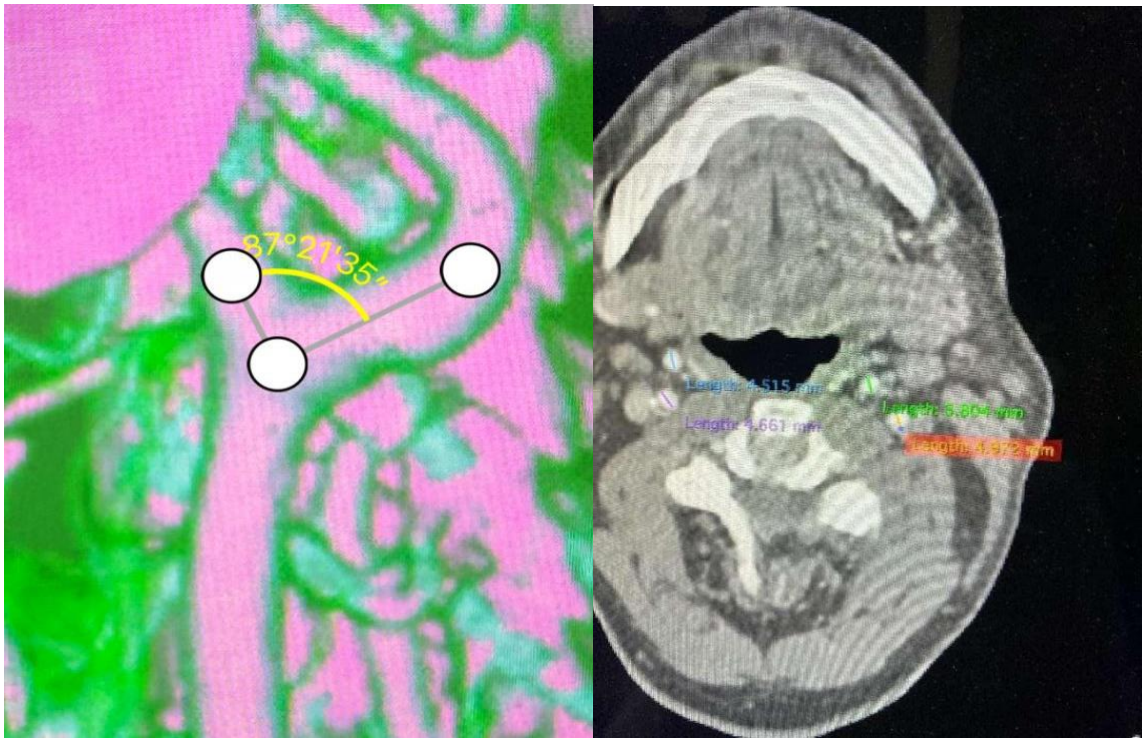


Рисунок 11 – Схема измерений параметров сонных артерий на МРТ ангиограммах

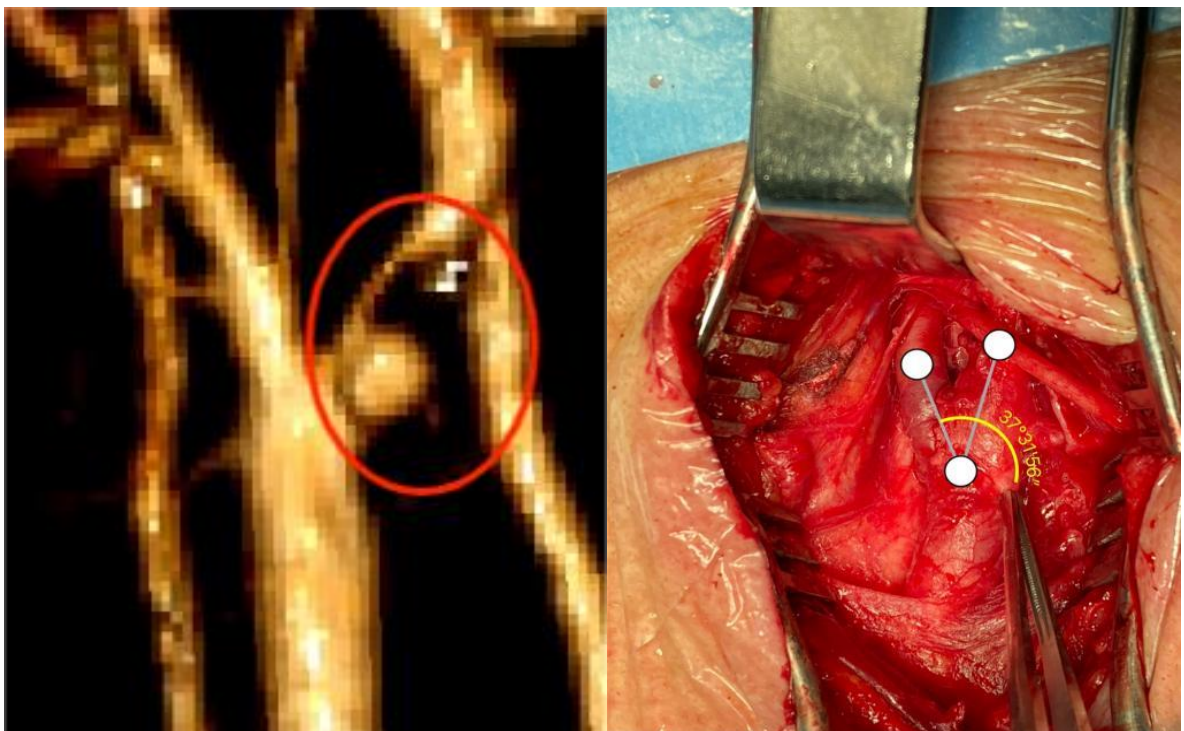


Рисунок 12 – Интраоперационное измерение изображения

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.

## 2.4 Статистический анализ данных исследования

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).

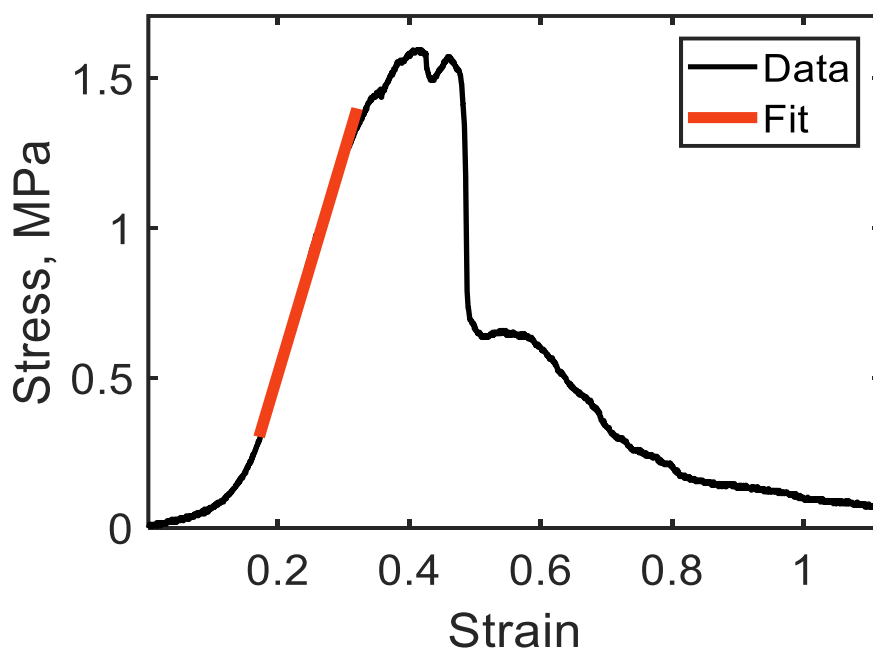


Рисунок 13 – Поиск модуля Юнга

Также была выбрана нелинейная модель (модель (Yeoh) Йео) для описания гиперупругости (рисунок 14). Модель достаточно близко описывает экспериментальные данные в диапазоне напряжений  $0 - \approx 0.5$ , описывается уравнением с тремя независимыми параметрами ( $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$ ):

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

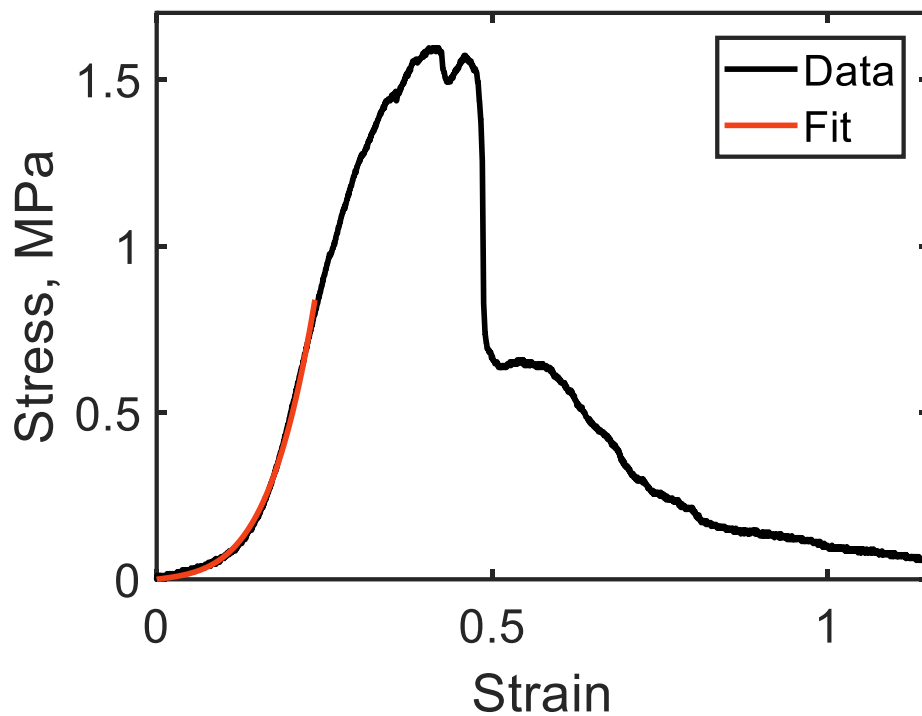


Рисунок 14 – Модуль Йео

Обработка данных АСМ были получены в режиме картирования областей 20x20 мкм, 32x32 силовые кривые (рисунок 15, 16, 17).

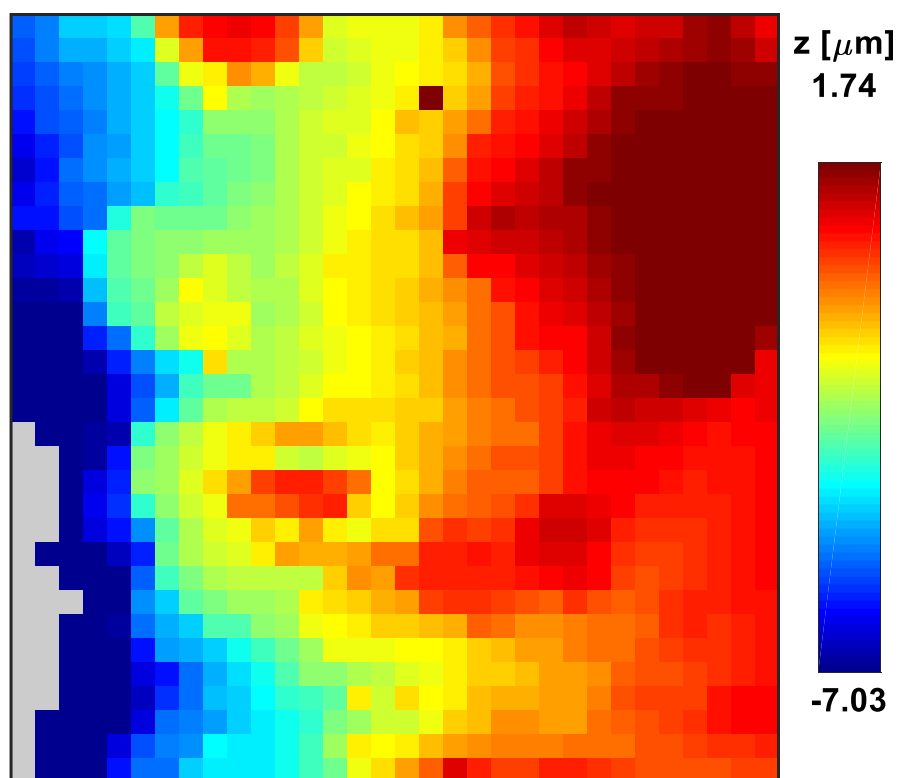


Рисунок 15 – Пример силового картирования (топография)

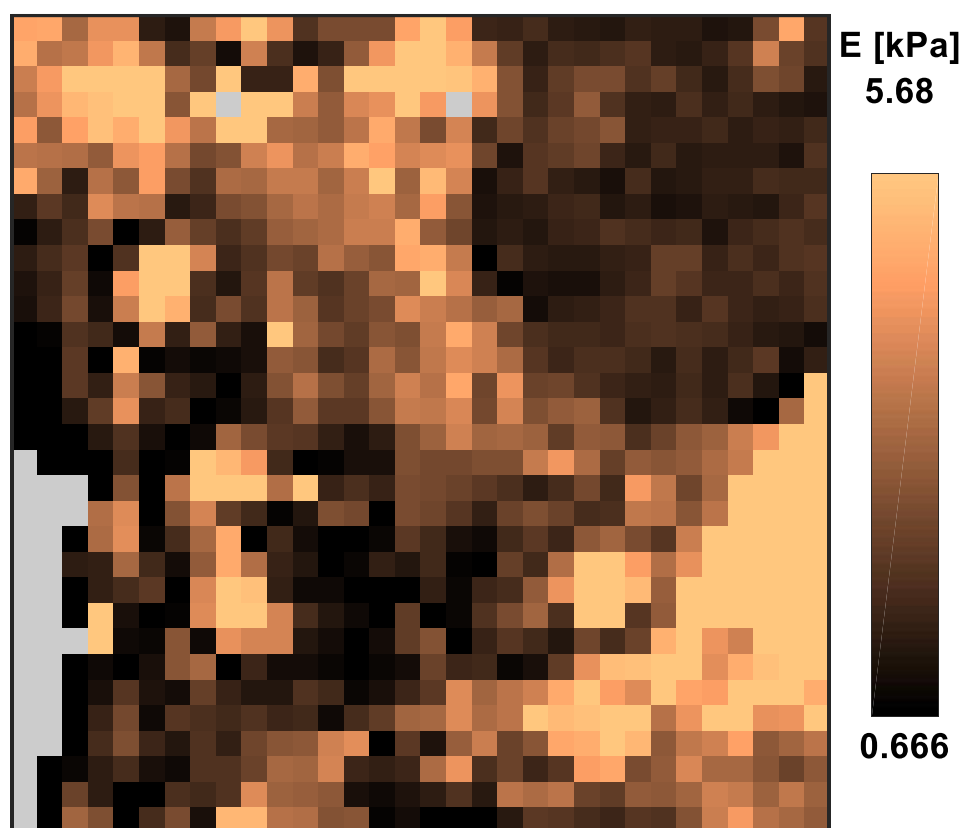


Рисунок 16 – Пример силового картирования (модуль Юнга)

Индивидуальные кривые обрабатывали контактной моделью Герца:

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

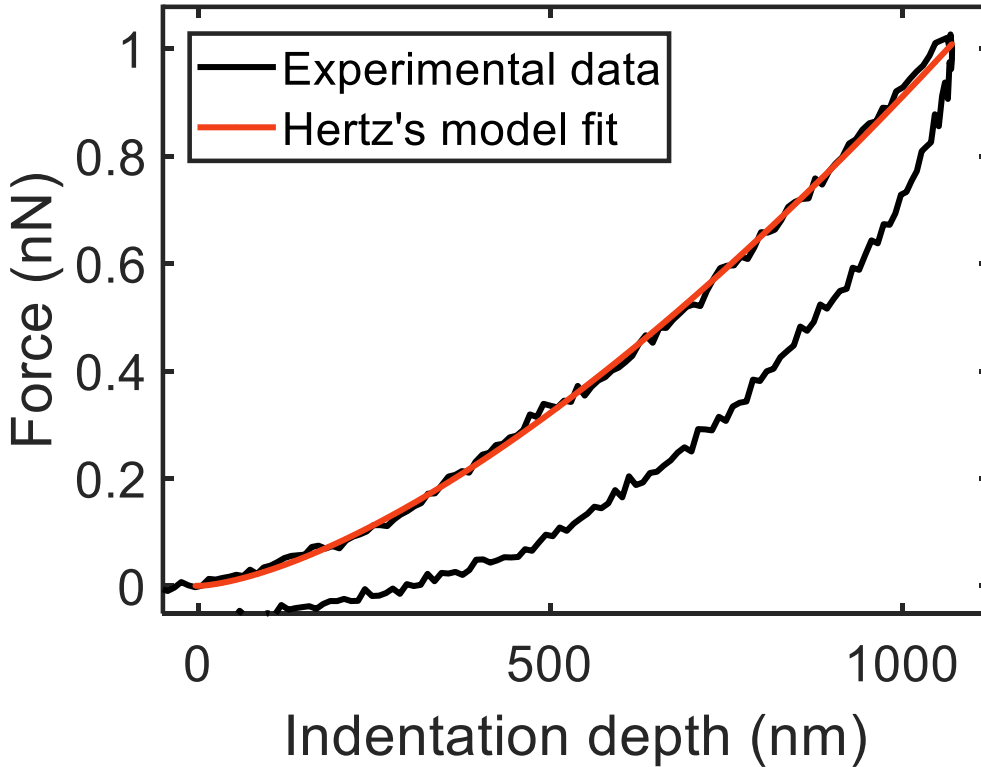


Рисунок 17 – Индивидуальные кривые

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.

## ГЛАВА 3. АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 3.1 Результаты и анализ анатомических и морфометрических характеристик сонной артерии кадаверной группы

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 18).

**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 [5].

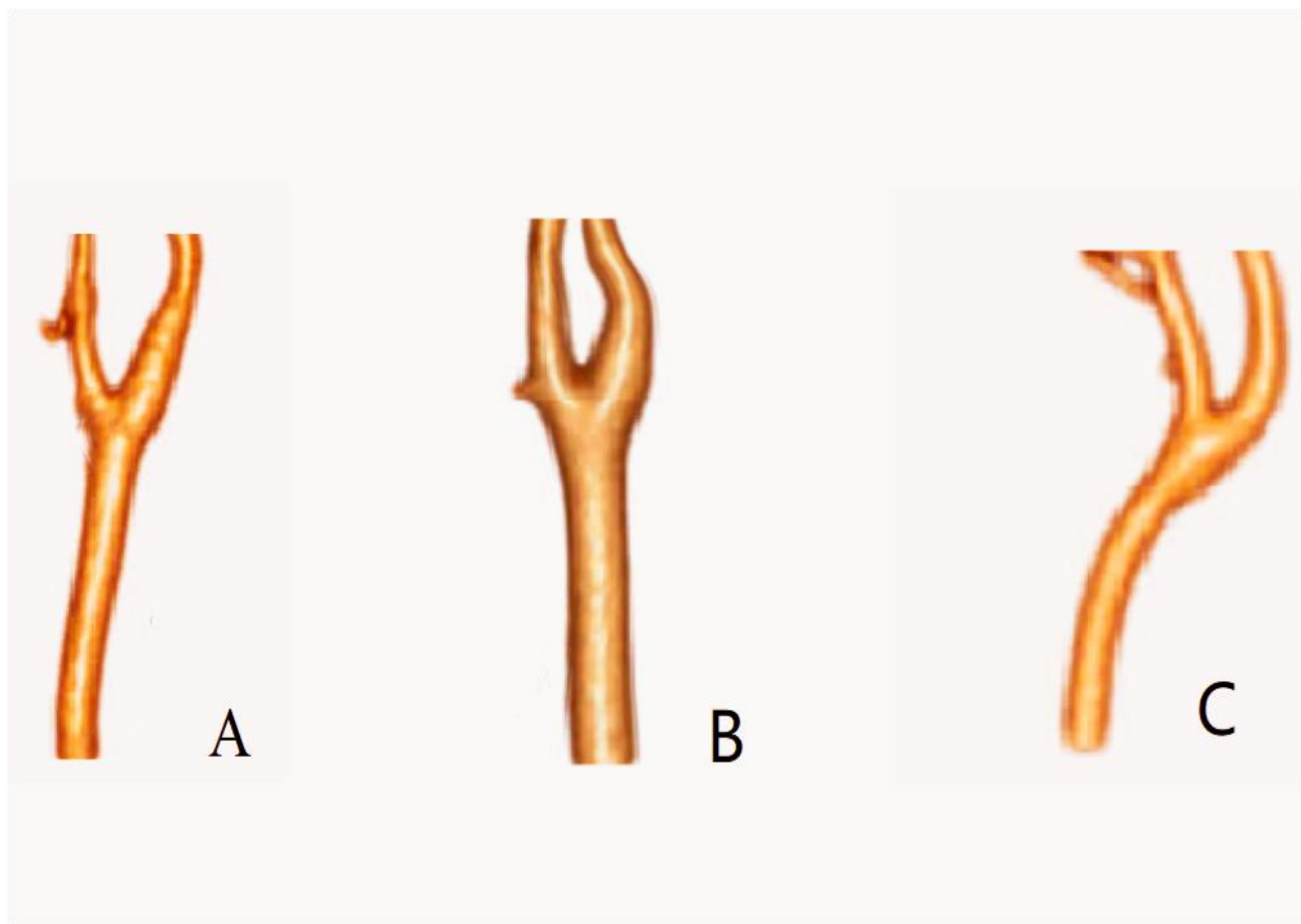


Рисунок 18 – Схема типов бифуркации сонной артерии

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  $30.62 \pm 6.60^\circ$  (таблица 1).

Таблица 1 – Различия во внутренних диаметрах и угле общей, внутренней и наружной сонных артерий между мужчинами и женщинами (Среднее  $\pm$  Стандартное отклонение, мм)

Группы в зависимости от пола	Кол-во	Внутренний диаметр ОСА	Внутренний диаметр ВСА	Внутренний диаметр НСА	Угол бифуркации СА
Мужской	22	7.21 $\pm$ 0.35	6.09 $\pm$ 0.44	5.21 $\pm$ 0.54	39.75 $\pm$ 7.26
Женский	18	6.73 $\pm$ 0.40	5.52 $\pm$ 0.39	4.32 $\pm$ 0.50	30.62 $\pm$ 6.60
<i>t</i>		4.0	4.2	5.3	4.1
P		< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

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 2.

Таблица 2 – Различия внутренних диаметров и угла общей, внутренней и наружной сонных артерий между левой и правой сторонами (Среднее±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±0.45	5.78±0.50	4.78±0.77	38.66±7.64
Правая	20	6.91±0.42	5.89±0.51	4.84±0.60	32.63±7.94
t		1.17	0.65	0.27	2.44
P		>0.05	>0.05	>0.05	<0.05

Больший угол бифуркации левой сонной артерии по сравнению с правой может быть объяснен адаптацией к физиологическим требованиям кровотока. Это морфологическое различие, вероятно, связано с анатомическим расположением сердца и направлением оттока артерий. Левосторонняя сонная артерия начинается непосредственно от дуги аорты, тогда как правая сонная артерия обычно берет начало от подключичной артерии. Это анатомическое различие может служить объяснением разницы в угле бифуркации между двумя сторонами.

В процессе эмбрионального развития морфология сердца и главных сосудов формируется под воздействием различных генетических и экологических факторов. Угол бифуркации сонных артерий может отражать необходимость сосудов адаптироваться к изменяющимся условиям кровотока в ходе эмбрионального развития, что может влиять на их морфологию.

В процессе извлечения анатомического препарата для исследования, которой проводился, согласно протоколу, было установлено, что синтопия черепно-мозговых нервов (ЧМН) и шейного сплетения была следующая [5, 136]:

- ЧМН:
- VII пара ЧМН (шейная и нижнечелюстная ветвь) проходили вдоль переднего края грудино-ключично-сосцевидной мышцы;

- X пара ЧМН (блуждающий) проходит рядом с яремной веной, в основном находится на заднелатеральной стороне общей и внутренней сонных артерий, а небольшая часть этого нерва проходит на переднемедиальной стороне;
- X пара ЧМН (ветвь -верхний гортанный нерв), проходит по задней части сонной артерии, большая часть его расположена выше уровня бифуркации самой сонной артерии;
- XII пара ЧМН расположен под задним брюшком двубрюшной мышцы.
- *Шейное сплетение:*
  - Большой ушной нерв-ветвь шейного сплетения проходит медиально по отношению к переднему краю грудино-ключично-сосцевидной мышцы и располагается в непосредственной близости к этой мышце;
  - Поперечный шейный нерв, располагается спереди и медиально к тому же краю грудино-ключично-сосцевидной мышцы.

Результаты анатомического наблюдения за образцами в этом исследовании соответствуют данным многих авторитетных источников по анатомии шеи. Согласно этим исследованиям, специфических аномальных сосудов не было выявлено, что подтверждает нормальную анатомическую вариативность этих структур.

### **3.1.1 Обсуждение морфологических характеристик при восстановительной хирургии сонной артерии**

Тщательное и полное понимание анатомии кровеносных сосудов и нервов играет критически важную роль в предоперационном планировании, особенно в контексте каротидной эндартерэктомии. Этот хирургический метод, направленный на удаление атеросклеротических бляшек из бифуркации сонной артерии, требует высокой точности в позиционировании разреза, так как именно эта область является центральной для проведения операции [45, 55, 62, 84, 86].

Во время операции существует значительный риск повреждения периферических нервов, которые имеют сложное анатомическое расположение и множество ветвей. Например, краевые нижнечелюстные и шейные ветви лицевого нерва, проходящие в непосредственной близости от операционного поля, могут быть случайно травмированы, что может привести к функциональным нарушениям. Кроме того, блуждающий нерв, который располагается рядом с общей сонной артерией, может подвергаться растяжению или даже разрыву в ходе манипуляций [29, 44, 62, 86, 111, 120].

Поражение ветви шейного сплетения, а именно большого ушного нерва может привести к шуму в ушах и снижению слуха, что негативно сказывается на качестве жизни.

Исследования установило, что интраоперационное повреждение ветви блуждающего верхнего гортанного нерва составляет 4,5% и подъязычного нервов составляет 3,7%. Эти данные подчеркивают важность знания анатомии для минимизации рисков во время каротидной эндартерэктомии.

Бифуркация общей сонной артерии чаще всего имеет прямую изогнутую форму тип В (47,5%), а ее высота обычно выше верхнего края щитовидного хряща [5, 49].

Также выявлены различия во внутренних диаметрах артерий между мужчинами и женщинами ( $p < 0,05$ ), что важно для индивидуализации хирургического подхода. Учитывая анатомические особенности, необходимо тщательно планировать место разреза для предотвращения повреждений сосудов и нервов.

В ходе исследования бифуркации сонных артерий у одного пациента было установлено, что размеры общей, внутренней и наружной сонных артерий на обеих сторонах (левой и правой) не имеют значительных различий ( $P > 0,05$ ), что указывает на отсутствие статистической значимости. Однако угол бифуркации сонной артерии показал значительные различия: угол бифуркации с левой стороны оказался больше, чем с правой, что было подтверждено статистически ( $p < 0,05$ ).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что хотя размеры артерий остаются схожими, анатомические особенности угла бифуркации могут варьироваться между сторонами. Это может иметь клиническое значение при планировании хирургических вмешательств и оценке риска осложнений [5,12].

В результате исследования было установлено, что внутренние диаметры сонных артерий (общей, внутренней и наружной) имеют статистически значимые различия в зависимости от пола ( $p < 0,05$ ). Мужчины обычно обладают большими размерами этих артерий по сравнению с женщинами, что важно для хирургов, поскольку понимание анатомических различий может способствовать более точному и безопасному выполнению операций и индивидуализированному подходу к каждому пациенту. Выводы этого исследования в основном согласуются с существующими данными в литературе [85].

Различия в анатомическом строении правой и левой сонных артерий могут быть связаны с особенностями их эмбрионального развития и расположения в организме. Сосудистая система формируется еще на стадии эмбрионального развития, и асимметрия между правой и левой сонной артериями часто объясняется этой особенностью. Поскольку сердце располагается в левом полушарии грудной клетки, это может оказывать влияние на развитие угла бифуркации сонной артерии. Левая общая сонная артерия берет свое начало непосредственно от дуги аорты, тогда как правая общая сонная артерия отходит от плечеголового ствола. Это анатомическое различие может приводить к различиям в гемодинамических условиях: левая артерия получает кровь непосредственно из аорты и, следовательно, может подвергаться более высокому кровяному давлению и большему объему кровотока по сравнению с правой стороной. Гемодинамические принципы указывают на то, что форма и угол наклона кровеносных сосудов адаптируются в ответ на направление и объем кровотока, что также может объяснять различия в углах бифуркации между правой и левой сонными артериями [67, 72-78].

Анатомическое исследование сосудов и нервов в области бифуркации сонной артерии показывает их сложное и индивидуальное расположение, что критично для

безопасности хирургических вмешательств, таких как каротидная эндартерэктомия. Цель исследования – предотвратить повреждения нервов, определяя оптимальное место разреза на основе анатомических данных. Это обеспечит более эффективное выполнение операции и уменьшит риск осложнений.

## **3.2 Анализ биомеханических данных сонной артерии**

### **3.2.1 Биомеханические характеристики сонной артерии**

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. Возможно, это произошло из-за недостаточной обработки соединительной ткани, окружающей адвентицию, что не позволило получить четкие измерения и характеристики данного слоя [50, 61, 94].

Таким образом, в процессе анализа данных мы получили полное представление о состоянии интима и медиа, в то время как для адвентиции необходимо провести дополнительные исследования или использовать другие методы, чтобы обеспечить более точные и надежные данные о ее структуре и свойствах (рисунок 19).

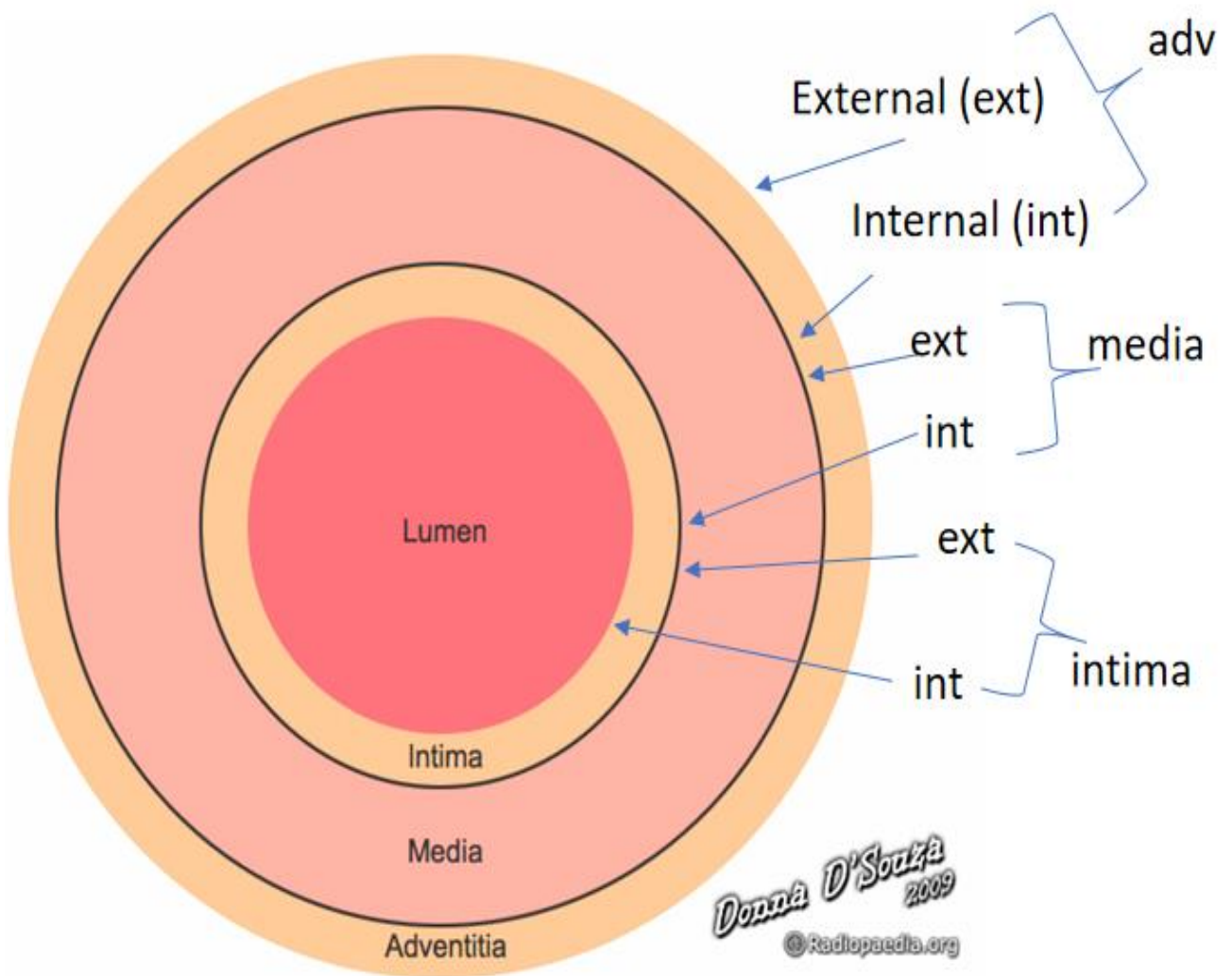


Рисунок 19 – Схема анатомических структур артерии

Таблица 3 демонстрирует 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) –  $2,9 \pm 1,7$ .

Таблица 3 – Данные анатомических структур артерии модуля Юнга (кПа)

Слой артериальной стенки	Среднее значение	Стандартное отклонение (SD)
Адвентиция	3.9	2.2
Интима (внешняя сторона)	6.2	1.9
Интима (внутренняя сторона)	4	1.2
Медия (внешняя сторона)	2.5	1.7
Медия (внутренняя сторона)	2.9	1.7

Проведена стандартная обработка данных по растяжению (рисунок 20). Были определены:

- модуль Юнга на линейном участке (E),
- максимальное напряжение ( $\sigma_{max}$ ),
- максимальная деформация ( $\epsilon_{max}$ ).

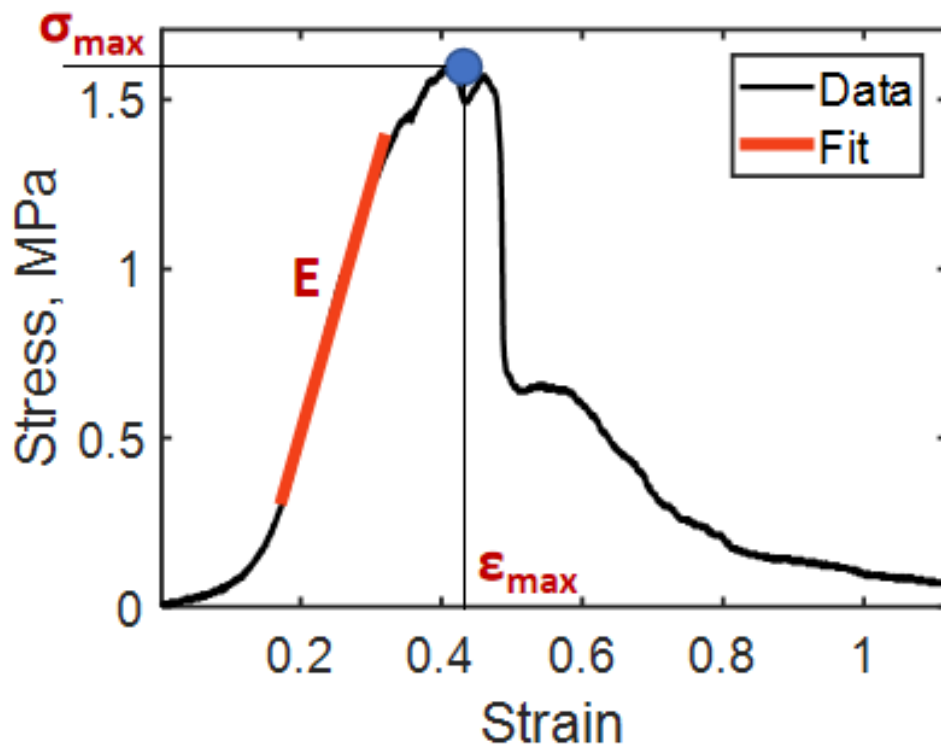


Рисунок 20 – Схема обработки данных о растяжимости

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 4).

Таблица 4 – 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 (рисунок 21,22,23).

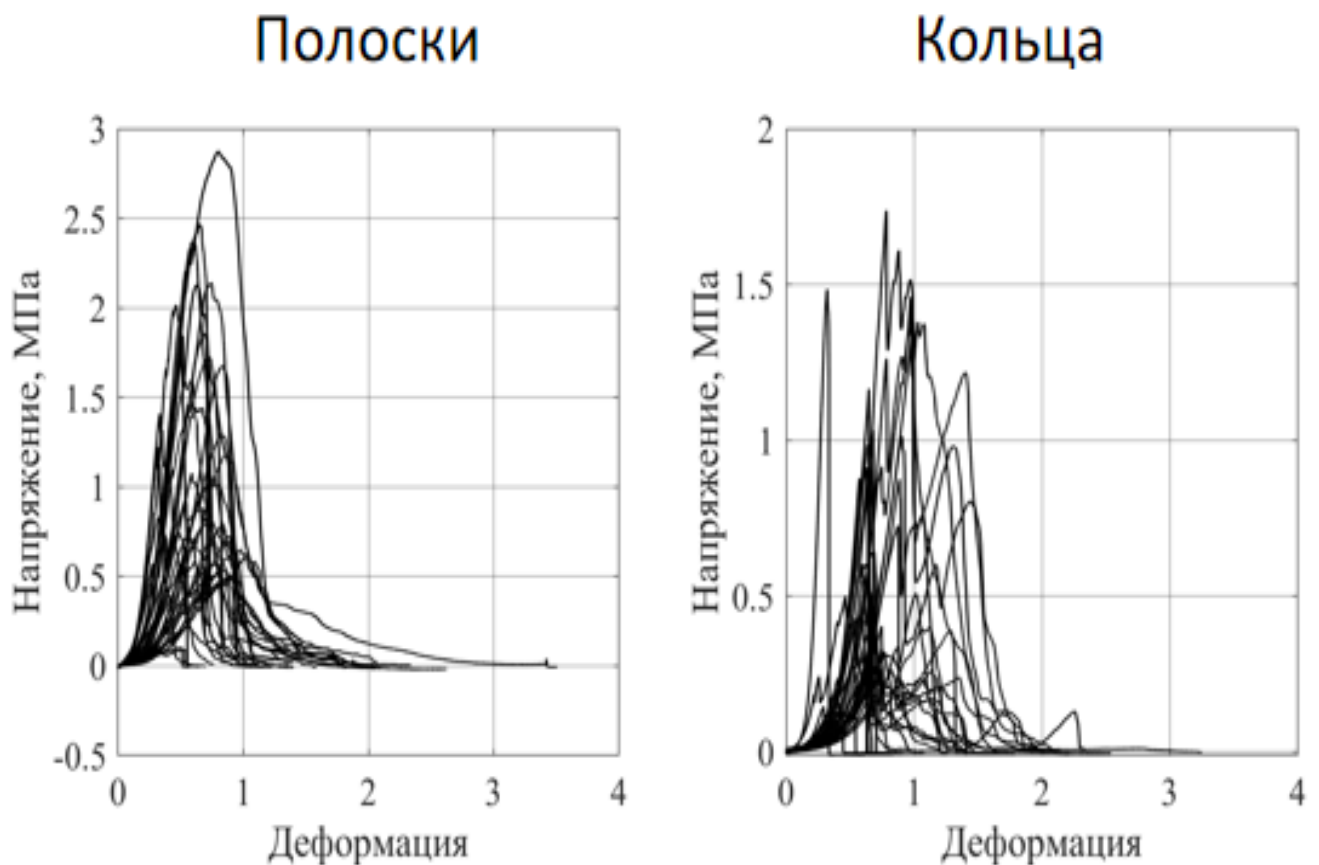


Рисунок 21 – Продольные и поперечные показатели деформации ОСА

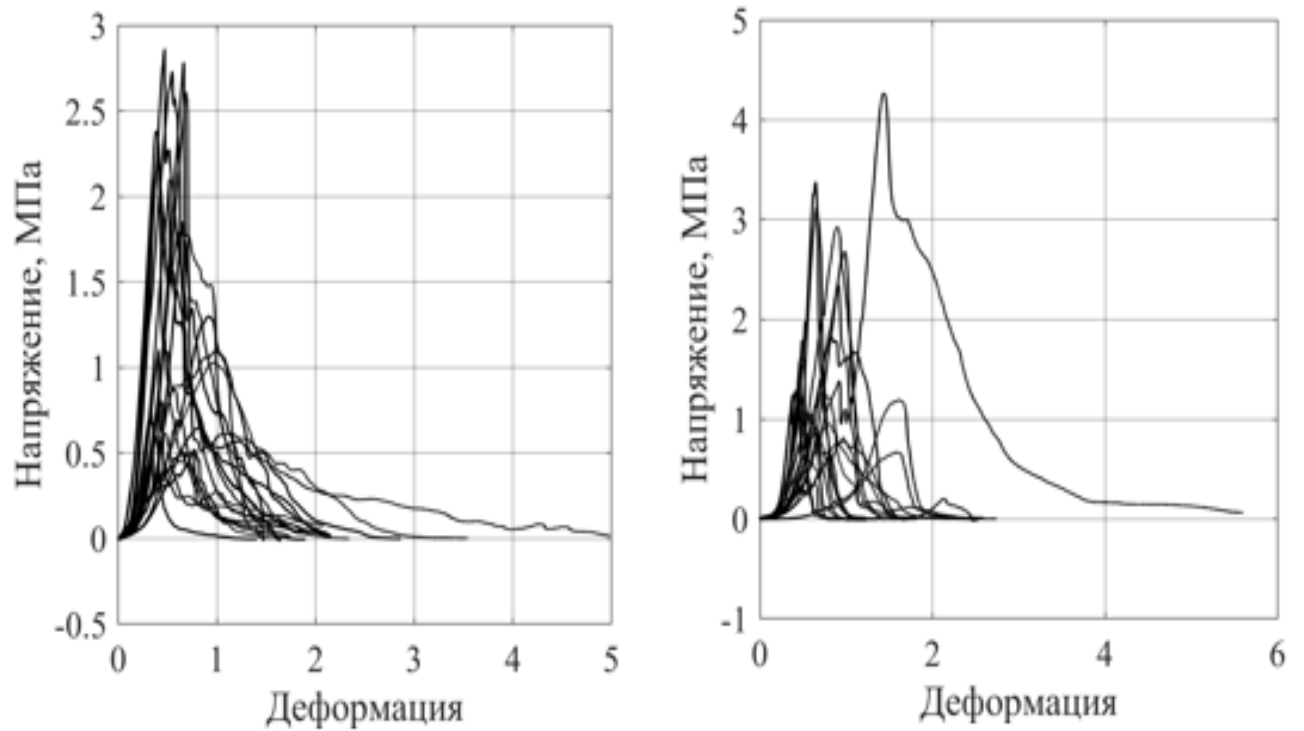


Рисунок 22 – Продольные и поперечные показатели деформации НСА

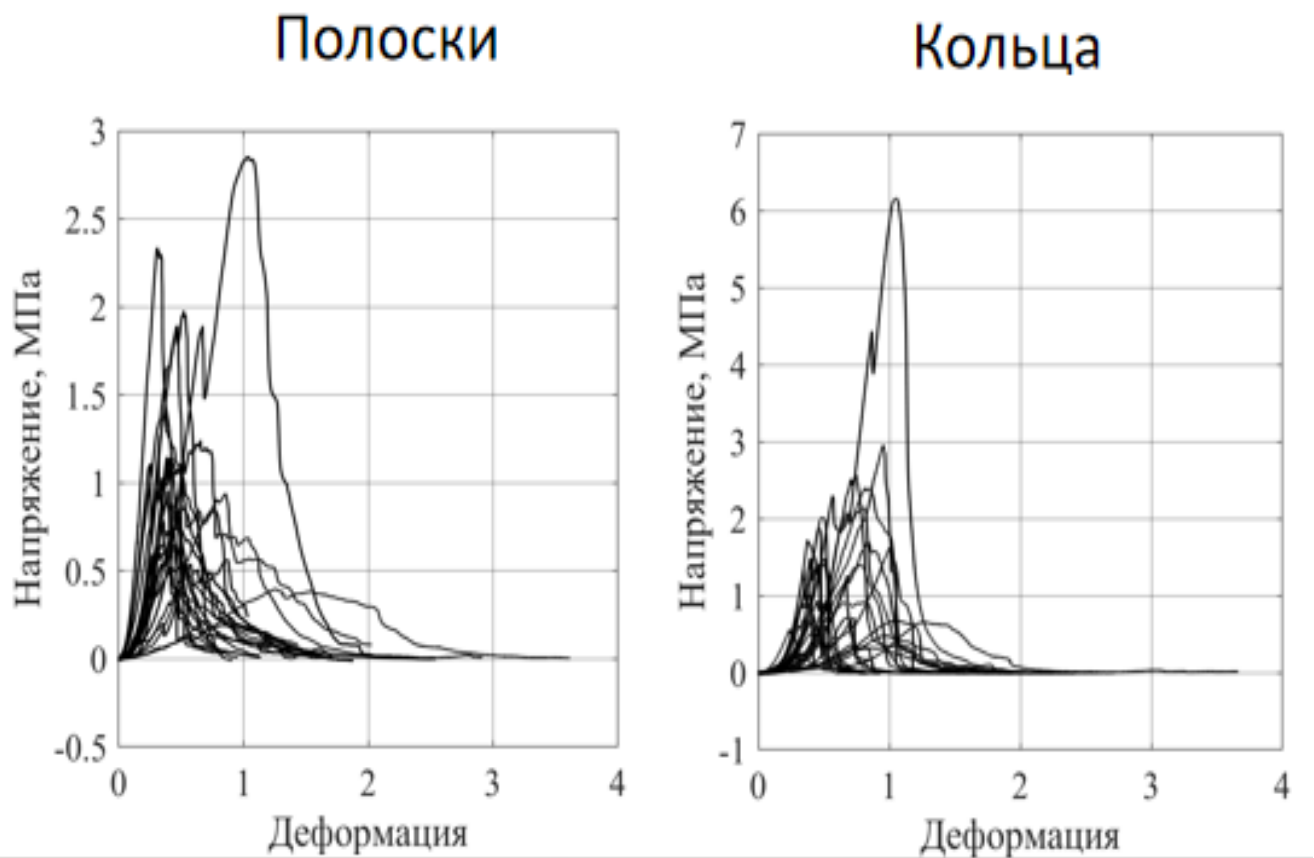


Рисунок 23 – Продольные и поперечные показатели деформации ВСА.

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).

Эверсионная каротидная эндартерэктомия – это вид оперативного вмешательства, в ходе которой часть внутренней сонной артерии аккуратно поворачивается наружу для удаления атеросклеротической бляшки. В случае, когда артерия обладает сильными поперечными механическими свойствами, это может служить индикатором ее стабильности. Такая стабильность стенки артерии обеспечивает надежную защиту от растяжения и расширения в поперечном направлении, что, в свою очередь, может существенно снизить риск повреждения артериальной стенки во время операции. Высокая эластичность и прочность артерии в поперечном направлении помогают предотвратить разрывы и чрезмерное растяжение, что делает процедуру более безопасной [17,18].

В противоположность этому, классическая каротидная эндартерэктомия обычно включает выполнение продольного разреза. Если у артерии наблюдаются слабые продольные растягивающие свойства, это может привести к повышенному риску перерастяжения или повреждения стенки артерии во время операции. Таким образом, выбор метода хирургического вмешательства может зависеть от механических характеристик артерии и их влияния на безопасность процедуры.

### **3.2.2 Обсуждение биомеханического моделирования**

Механические свойства артериальной стенки зависят от состава и пространственной организации ее компонентов, включая эластичные волокна, коллагеновые волокна и гладкомышечные клетки. Эти компоненты обладают гиперэластичными, вязкоупругими и анизотропными свойствами. Эластичные волокна демонстрируют линейную зависимость между напряжением и

деформацией, тогда как гладкая мускулатура и коллагеновые волокна проявляют нелинейные характеристики. Анизотропия стенки артерии обусловлена различиями в механических свойствах ее слоев и направленности волокон. Общая нелинейность артериальной стенки возникает из-за взаимодействия материальной и геометрической нелинейности, что влияет на ее способность переносить нагрузки в различных направлениях [36, 69-82, 134].

Артерии представляют собой мягкие ткани биологического происхождения с гиперэластичными, вязкоупругими, анизотропными, нелинейными и несжимаемыми свойствами. Тремя основными компонентами стенки сосуда являются волокна эластина, гладкомышечные клетки и коллагеновые волокна [83].

Связь между напряжением и деформацией эластичных волокон линейна и подчиняется закону Гука. Эластичные волокна имеют небольшой модуль упругости при растяжении, низкую прочность на разрыв и почти полное отсутствие релаксации напряжения; их механические свойства близки к свойствам полных эластомеров. Гладкая мускулатура обладает модулем упругости, аналогичным модулю упругости эластичных волокон, имеет низкую прочность на разрыв и может вызывать значительные деформации при малых напряжениях. В расслабленном состоянии кривая напряжения-деформации гладкой мышцы демонстрирует выраженный гистерезис, а релаксация напряжения настолько значительна, что при фиксированной деформации напряжение может быть практически полностью снято. Коллагеновые волокна выступают в роли вискоэластомеров с выраженным гистерезисом и релаксацией напряжения. Прочность коллагеновых волокон на разрыв значительно выше по сравнению с эластичными волокнами, и небольшие деформации могут приводить к высоким уровням напряжения. В нормальных условиях коллагеновые волокна находятся в свернутом состоянии в стенке артерий, что исключает нагрузку на артерии при обычном уровне растяжения. Однако при расширении артерий до определенного предела коллагеновые волокна создают значительное напряжение, предотвращая дальнейшее расширение артерий. Из анализа механических свойств трех упомянутых компонентов видно, что гиперэластичное поведение стенки артерии

обусловлено в основном эластичными волокнами и гладкой мускулатурой, тогда как вязкоупругость является отражением механических свойств гладкой мускулатуры и коллагеновых волокон [84].

Анизотропия – это свойство объекта иметь различные физико-механические свойства во всех направлениях. Анизотропия артериальной стенки является отражением неоднородности ее организации. Поскольку три слоя артериальной стенки имеют различный организационный состав, механические свойства, проявляемые этими тремя слоями, различны, т.е. существует изменчивость механических свойств в радиальном направлении [85-89]. Основными компонентами артериальной стенки являются эластичные волокна, коллагеновые волокна и гладкомышечные клетки, и эти три основные единицы по своей сути являются направленными по своим механическим свойствам. Таким образом, способность артериальной стенки переносить напряжение вдоль направления волокон отличается от способности перпендикулярно направлению волокон. Распределение матрицы в артериях также не является полностью однородным, и это неоднородное распределение также вносит свой вклад в анизотропию механических свойств [50-61]. При продольном растяжении стенки артерий более растяжимые, но менее прочные и жесткие; при поперечном растяжении они более прочные и жесткие, но менее растяжимые.

Механические свойства эластичных волокон, коллагеновых волокон и гладкомышечных клеток в артериальной стенке характеризуются нелинейностью, и эти три составляющие вносят свой вклад в нелинейный характер артериальной стенки [34, 47, 115]. Нелинейность артериальной стенки проявляется в основном в двух аспектах: материальная нелинейность и геометрическая нелинейность. Деформация коллагеновых волокон характеризуется нелинейностью, при этом их собственный модуль упругости возрастает в результате увеличения деформации при деформации. Геометрическая нелинейность, с другой стороны, в основном обусловлена эластичными волокнами в стенке сосуда, а гладкая мускулатура характеризуется большой деформацией.

Несжимаемость воды эффективно отражается на механических свойствах артериальной стенки, поскольку вода также занимает значительную часть артериальной стенки. Fuang и Chuong экспериментально нагрузили стенку артерии радиальным давлением 10 кПа и обнаружили, что максимальная скорость изменения объема составила всего 1,26 %, и благодаря этой несжимаемости стенка сосуда сохраняет прежний объем во время деформации [70].

Понимание структуры артериальной стенки с гистологической точки зрения является важной основой для разработки собственных уравнений, описывающих механические свойства артериальной стенки. На основе, состава, структуры и основных механических свойств стенки сосуда могут быть разработаны математические модели, позволяющие моделировать сосуд [137].

В состоянии покоя коллагеновые волокна артерий имеют произвольные изгибы, что приводит к наличию остаточных напряжений внутри сосуда. При увеличении внутреннего давления эти остаточные напряжения сначала уменьшаются, и диаметр сосуда практически не изменяется. Позже основная нагрузка переносится на гладкие мышечные и эластичные волокна, что связано с низким модулем упругости сосуда. С увеличением коэффициента удлинения коллагеновые волокна начинают воспринимать часть напряжения, что приводит к резкому увеличению жесткости сосуда [87-91].

Трехмерные механические свойства артерий Эксперименты показали, что изотропная нелинейная зависимость собственных структур сосудов способна более корректно описывать механические свойства кровеносных сосудов, а коэффициенты жесткости и дополнительные модули упругости собственных структурных уравнений являются важными параметрами механических моделей сосудов.

В то же время, зависимость между "давлением напряжения и диаметром деформации" артериальных сосудов нелинейна, и ее кривую можно разделить на зоны низкого и высокого напряжения, напряжение в зоне низкого напряжения увеличивается медленнее, и операция анастомоза может получить высокий процент проходимости в этом диапазоне.

### 3.3 Клинические данные пациентов и их анализ

#### 3.3.1 Сравнение данных в группах

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 в таблице 5.

Таблица 5 – Распределение больных по возрасту.

Возраст больных	Количество больных	%
45-50	1	1.67%
50-55	2	3.33%
55-60	3	5.00%
60-65	16	26.67%
65-70	16	26.67%
70-75	22	36.67%

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 (рисунок 24).

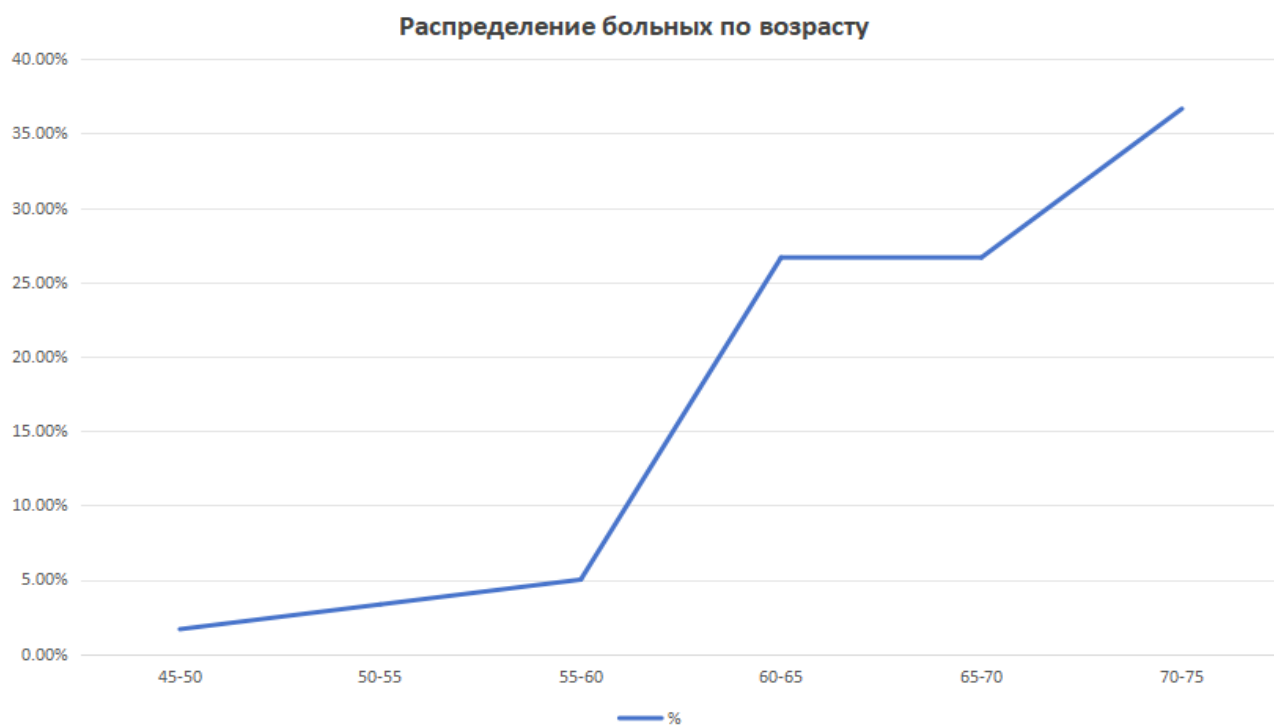


Рисунок 24 – Распределение больных по возрасту

Что касается бифуркации сонных артерий, все сосуды (120 коллатеральных сосудов) были разделены на три типа, соответствующих анатомическим структурам (рисунок 16). 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 (таблица 6).

Таблица 6 – Типы бифуркации сонной артерии и бляшки

Тип бифуркации СА	I группа (с атеросклеротической бляшкой)		II группа без бляшек	
	Число	Процент	Число	Процент
Тип А	11	18%	9	15%
Тип В	25	42%	30	50%
Тип С	24	40%	21	35%

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  $p > 0,05$  (таблица 7). 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.

Таблица 7 – Угол бифуркации сонной артерии в зависимости от наличия бляшек

Угол бифуркации СА	20-30	30-40	40-50	>50	X <sup>2</sup>	p
I группа с атеросклеротической бляшкой	2	20	29	9	12.761	0.0053
	3.33%	33.33%	48.33%	15.00%		
II группа без бляшек	12	28	17	3		
	20.00%	46.67%	28.33%	5.00%		

При анализе кривой распределения угла бифуркации сонной артерии, была выявлена тенденция к нормальному распределению этого показателя. В первой группе участников среднее значение угла бифуркации составило  $42,53^\circ$  со стандартным отклонением  $7,61^\circ$ , в то время как во второй группе наблюдалось более низкое среднее значение –  $37,15^\circ$  со стандартным отклонением  $7,79^\circ$ .

Статистический анализ показал наличие значимой разницы в распределении углов бифуркации между двумя группами, что указывает на различия в анатомических характеристиках.

Что касается внутреннего диаметра общей сонной артерии, в первой группе он 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 8).

Таблица 8 – 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 ± 7.61	37.15 ± 7.79	3.825	< 0.01
Внутренний диаметр ОСА	7.40±0.63	6.87±0.44	5.165	< 0.01
Внутренний диаметр ВСА	6.89±0.76	5.62±0.42	11.25	< 0.01
Внутренний диаметр НСА	5.37 ± 0.66	4.83±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. Многие исследования, показывая, что бифуркация сонной артерии является основным местом образования атеросклеротических бляшек сонных артерий. Около 90% поражений локализуются в пределах 2 см от места отхождения ВСА [41-46,52-54, 104].

### 3.3.2 Обсуждение морфологии сонных артерий клинической группы

Как системное заболевание, атеросклероз чаще всего проявляется в областях с изменениями геометрии кровеносных сосудов, например, на бифуркациях и изгибах артерий. По мнению некоторых ученых, местные гемодинамические факторы существенно влияют на его развитие и прогресс [47, 50, 87, 104].

Кровоток в ОСА имеет ламинарный характер, но в области бифуркации он изменяется, создавая вихревые потоки и приводя к застою крови от места бифуркации до начала внутренней сонной артерии. Морфологические особенности

бифуркации и угол разветвления оказывают влияние на формирование и прогрессирование атеросклеротических бляшек, воздействуя на кровоток [94-98].

В результате проведенного анализа было установлено, что существуют значительные различия в анатомии сонных артерий у разных пациентов. Угол бифуркации и внутренний диаметр артерий оказались значительно больше у пациентов с заболеваниями по сравнению с контрольной группой, что может указывать на возможное влияние анатомических факторов на развитие патологий.

ACC/AHA 2007 Clinical Expert Consensus Document показывают: атеросклероз сонных артерий чаще всего наблюдается в области бифуркации сонной артерии. Чем больше угол бифуркации сонной артерии, тем заметнее вихрь, создаваемый кровотоком, и сложнее форма вихря, что способствует развитию атеросклеротической бляшки [32].

Морфология сонных артерий считается важным фактором гемодинамических условий, сложная гемодинамика вызывает различия в потоковом напряжении, действующем на стенку сосуда.

Потоковое сдвиговое напряжение или напряжение сдвига (НС) можно рассматривать как эквивалент напряжения трения. При движении крови по артерии она оказывает давление на стенку сосуда. Перпендикулярная составляющая этой силы соотносится с артериальным давлением и вызывает деформацию клеток стенки сосуда. Тангенциальная составляющая, которая гораздо меньше, воспринимается эндотелием в виде напряжения сдвига. Каждая сила имеет свои величину и направление, а для поперечных сил эти характеристики изменяются в течение сердечного цикла. При нормализации вектора касательной силы по площади можно определить напряжение сдвига стенки, измеряемое в паскалях ( $1 \text{ Па} = 10 \text{ дин/см}^2$ ) [90-98].

Кровоток в общей сонной артерии, как правило, имеет ламинарный и однонаправленный характер. Однако замедление потока в области бифуркации приводит к резкому изменению направления, создавая зоны с высоким и низким напряжением сдвига. Существует мнение, что эти различия в напряжении сдвига могут быть связаны с различными стадиями развития атеросклероза. [100].

Исследование Z.Z. Li et al. [106] показало, что при углах  $40^\circ$  и  $50^\circ$  значения потокового напряжения были выше, чем при других углах. Данные исследования подтверждают, чем угол бифуркации сонной артерии больше, тем меньше значение напряжения сдвига [117-121].

В экстракраниальном сегменте бифуркация сонной артерии является первым гемодинамически значимым участком для общего кровоснабжения головного мозга, тогда как сифон внутренней сонной артерии во внутричерепном сегменте выступает вторым таким участком. Угол бифуркации влияет на распределение динамики кровотока и воздействие сдвига на эндотелий сосудов, что может оказывать влияние на развитие атеросклеротических бляшек. Согласно законам механики жидкостей, средняя сила сдвига жидкости пропорциональна ее вязкости и скорости потока и обратно пропорциональна размеру трубки, через которую она проходит [103, 125, 128].

Исследование De Weert et al., проведенное с использованием мультidetекторной КТ-ангиографии, показало, что характер атеросклеротических бляшек (сложные или язвенные) связан с гемодинамическими условиями. Сложные бляшки преимущественно встречаются в сильно стенозированных участках сонных артерий, тогда как язвенные бляшки располагаются чаще всего проксимальнее [42].

C.M. Wang et al. [83], исследовали бляшки во внутренней сонной артерии с помощью КТ-ангиографии. В дальнейшем трехмерная структура бифуркации сонной артерии была воспроизведена с помощью 3D-реконструкции. Анализ показал, что атеросклеротические бляшки сонных артерий первоначально развиваются в каротидном синусе и со временем распространяются вниз по течению. Это позволяет предположить, что различные размеры угла бифуркации сонной артерии могут влиять на гемодинамику, а затем на возникновение атеросклеротических бляшек [101-105]. Многочисленные клинические и фундаментальные исследования также показали, что атеросклероз с большей вероятностью возникает и развивается в областях с низким напряжением сдвига. А атеросклеротические бляшки с меньшей вероятностью развиваются в зонах с

высоким напряжением сдвига [34, 52, 71, 79, 106, 108, 112-119, 130, 131, 133].

На сегодняшний день морфологические характеристики шейных артерий признаны важными для развития атеросклероза и могут влиять на разрыв бляшек, их кровоизлияние и эмболию [101-105].

Гемодинамический сдвиг состоит из ламинарного и осцилляторного компонентов: ламинарный сдвиг считается защитным фактором, тогда как осцилляторный – атерогенным. Угол бифуркации сонной артерии был больше у группы с бляшками по сравнению с группой без них, что говорит о том, что больший угол бифуркации создает более мощные ламинарные силы в кровотоке. Резкие изменения гемодинамических сил могут привести к разрыву бляшек или их кровоизлиянию.

Также было показано, что высота бифуркации сонной артерии выше у пациентов с атеросклерозом, что позволяет предположить, что потоковое напряжение также связана с высотой бифуркации сонной артерии [41,42,46,52-54].

В работе De Suo и соавторов было установлено, что высота угла бифуркации сонной артерии является значимым фактором риска для атеросклероза. Исследование показало положительную корреляцию между углом и высотой: при изменении высоты на 1/3 позвонка угол изменяется на  $3,34^\circ$ . Левая бифуркация находится немного выше правой. Чем ниже расположена бифуркация, тем меньше угол, и наоборот: чем выше она расположена, тем больше угол. Нижняя бифуркация характеризуется меньшей силой сдвига, что критично для развития атеросклероза. Эти результаты были также подтверждены в нашем исследовании [54]. Эверсионная каротидная эндартерэктомия оптимально применяется при высоких значениях угла бифуркации, в то время как классическая каротидная эндартерэктомия предпочтительнее при нормальных и низких значениях. Влияние геометрических факторов риска требует дальнейшего изучения.

## ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОННОЙ АРТЕРИИ

### 4.1 Моделирование стеноза 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 25).

Коэффициент стеноза сонной артерии рассчитывалась следующим образом:

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

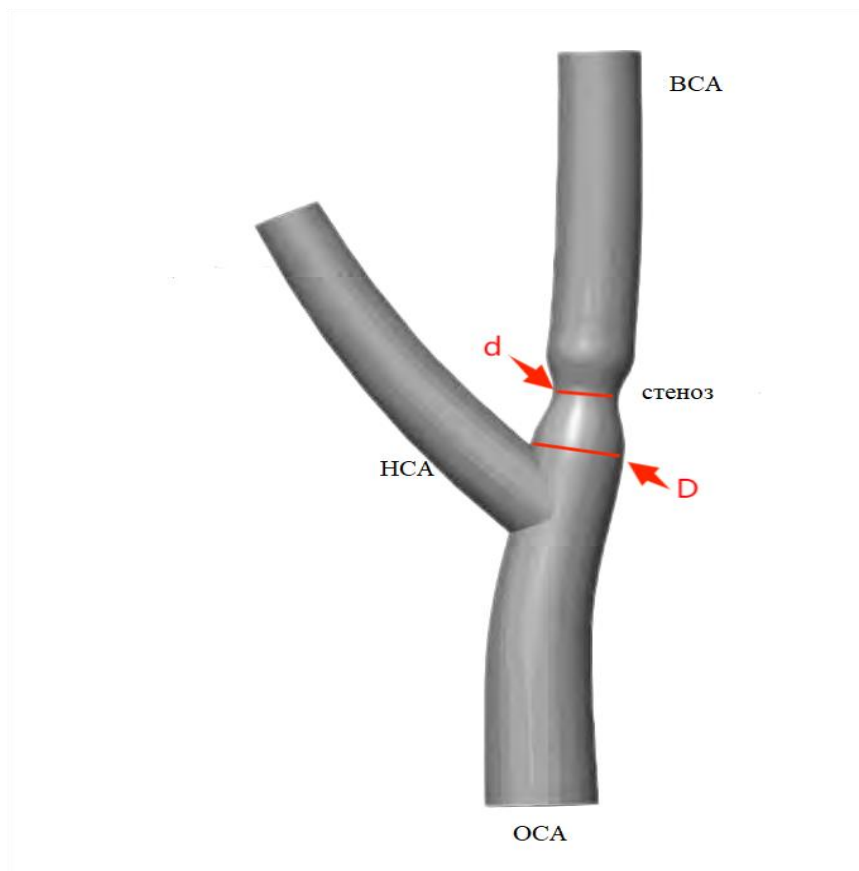


Рисунок 25 – Модель стеноза сонной артерии

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)

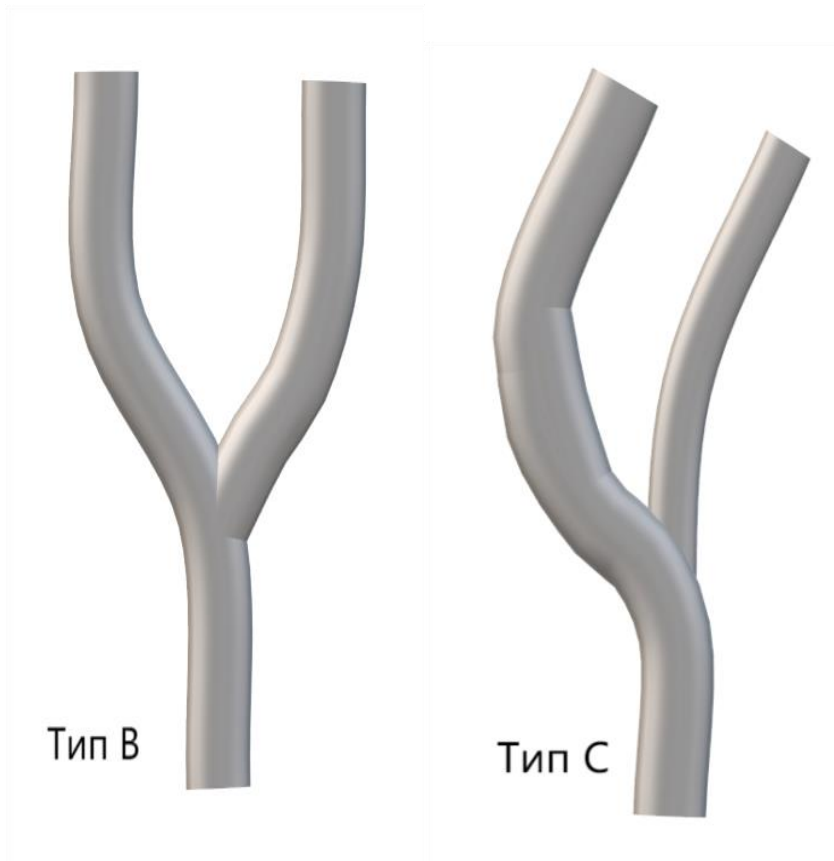


Рисунок 26 – Модели сонных артерий типа С и В

В то же время бифуркация сонной артерии моделировалась отдельно для типа В и типа С в соответствии с ее морфологической категорией (рисунок 26).

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 27)

(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.

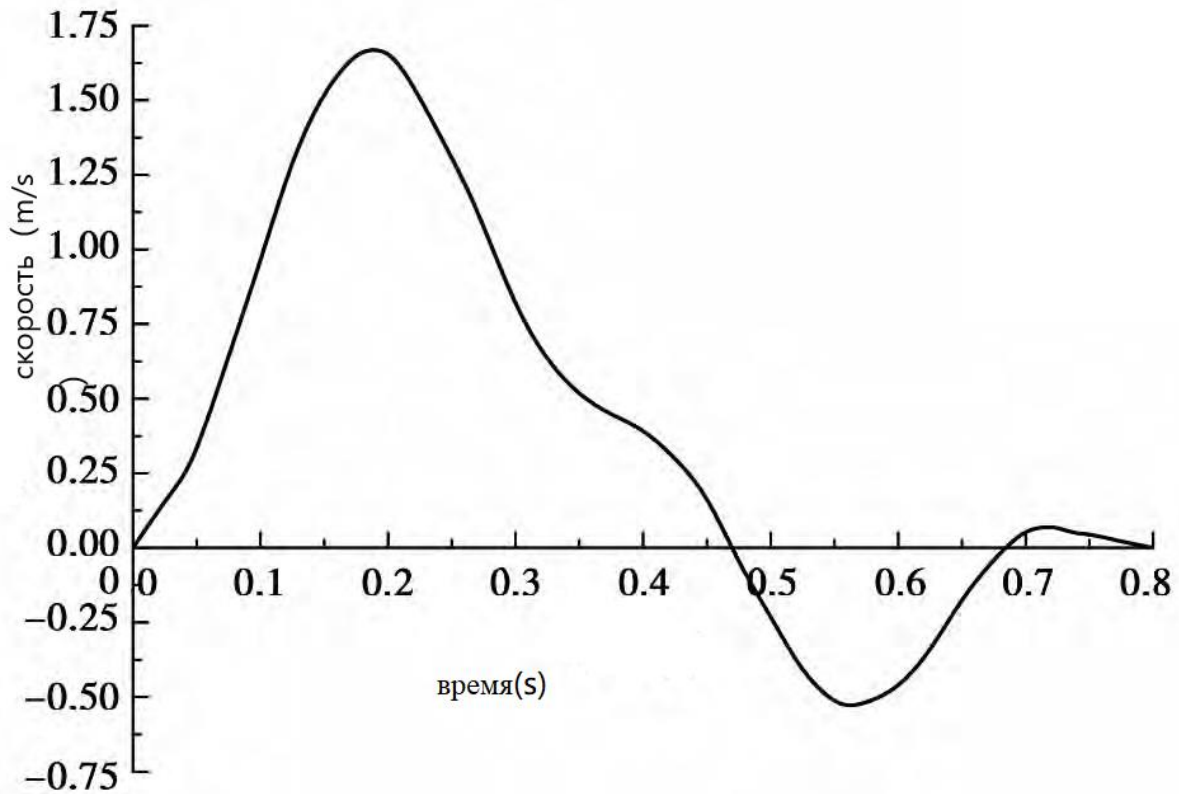


Рисунок 27 – График зависимости скорости от времени

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 [29];

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

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w$$

$u$ ,  $v$  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.

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

#### 4.1.1 Анализ скорости кровотока

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 28).

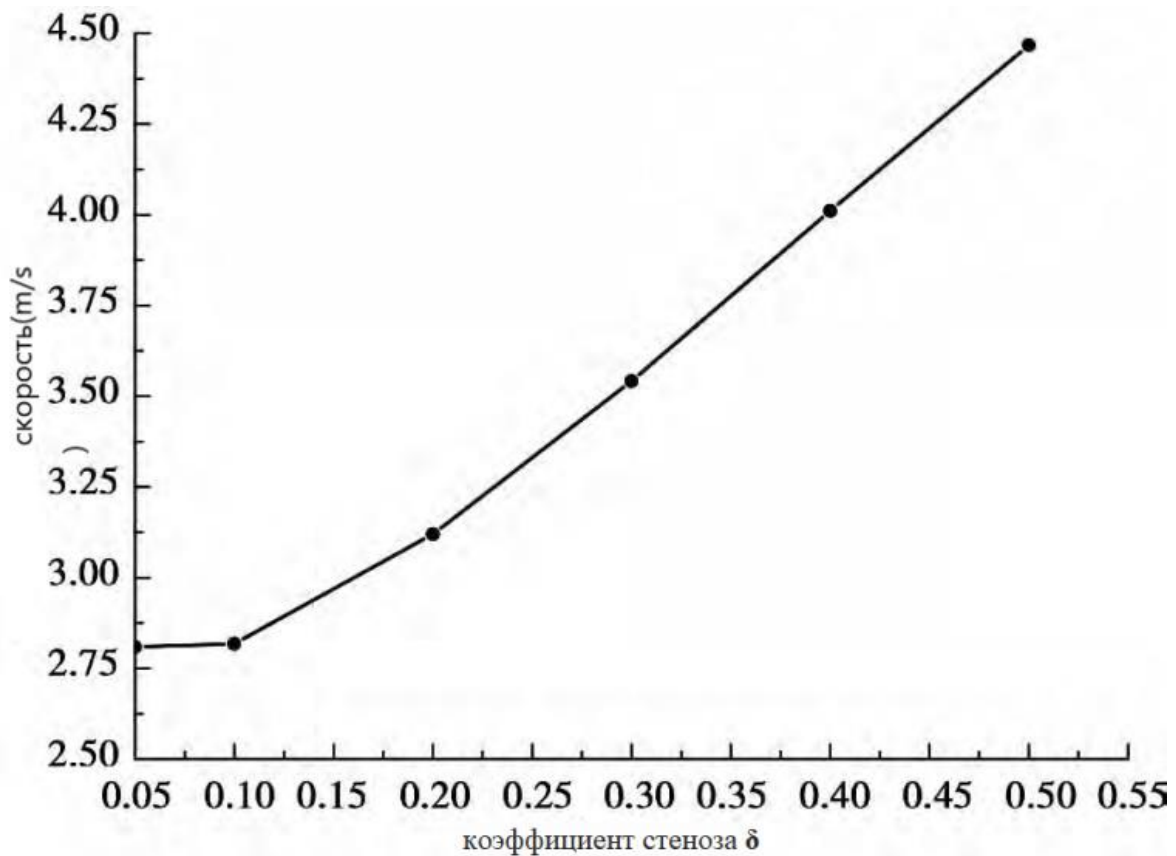


Рисунок 28 – Взаимосвязь между скоростью и коэффициентом стеноза

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 29).

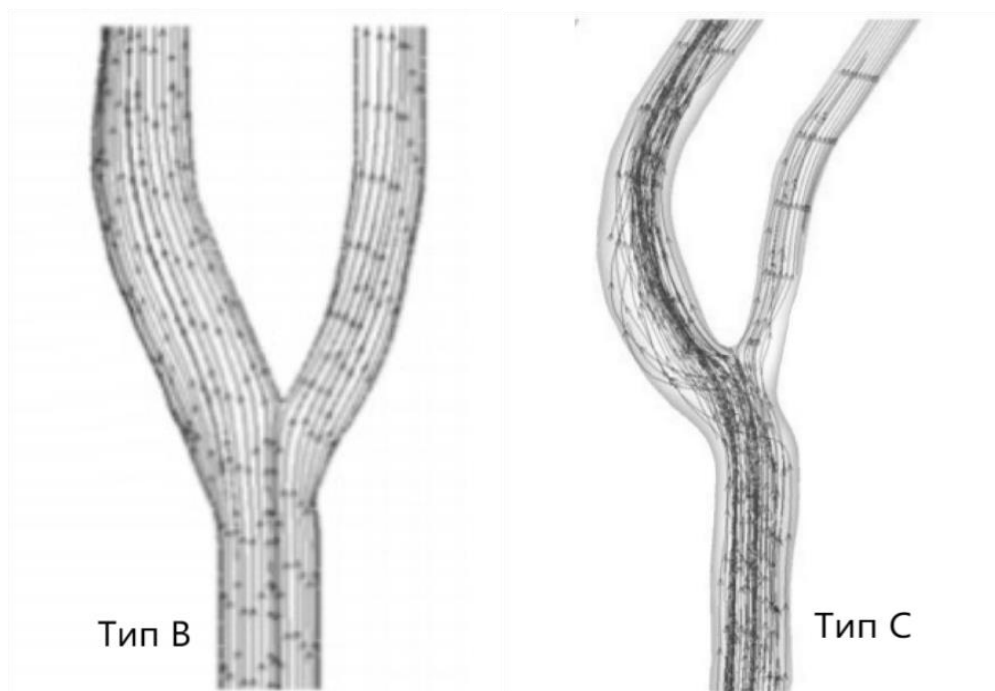


Рисунок 29 – Неньютоновское поле скоростей потоков в тип В и С бифуркациях сонных артерий

Влияние изменений в размере и направлении кровотока на формирование атеросклеротических бляшек в сонных артериях и восстановление поврежденных стенок сосудов является весьма значительным.

#### 4.1.2 Анализ давления на стенку

Давление на стенку в месте каротидного стеноза с течением времени в течение сердечного цикла представлено на рисунок 30.

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.

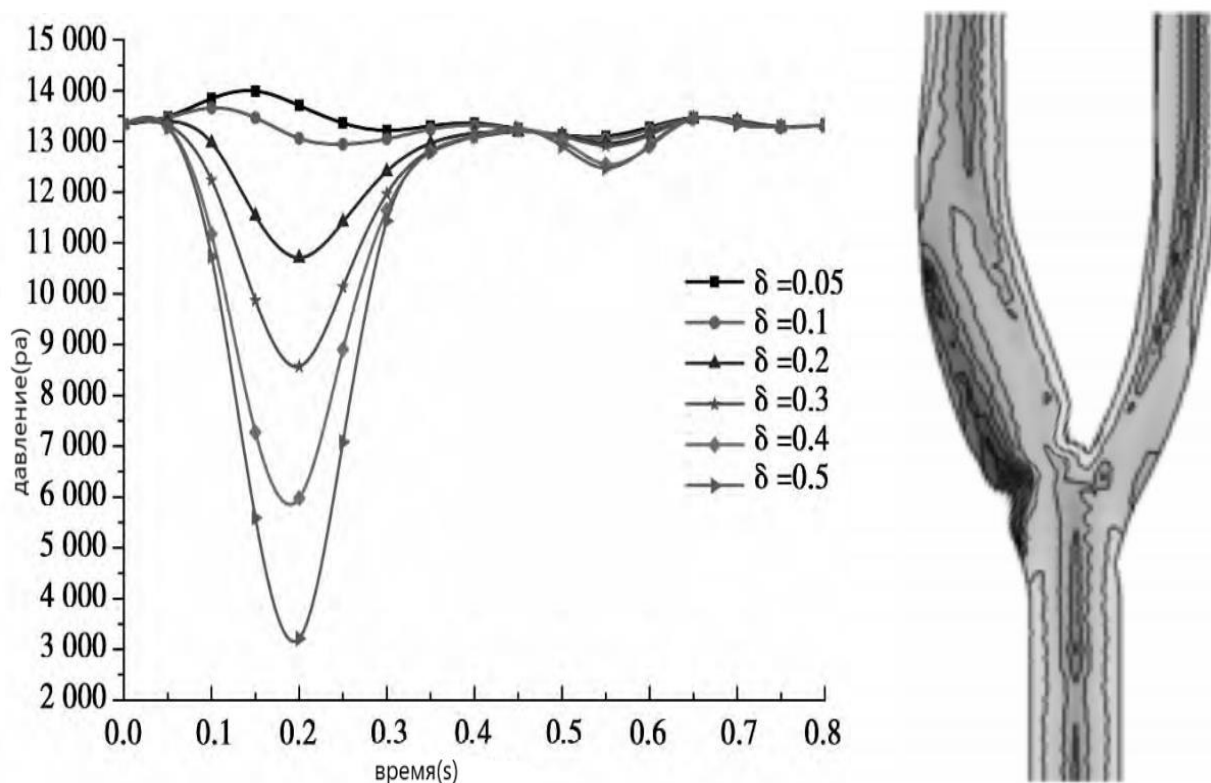


Рисунок 30 – Давление на стенку кровеносного сосуда при стенозе

Сравнение давления на стенке в местах стеноза сонной артерии с различной скоростью стеноза показывает, что с увеличением скорости стеноза давление на стенке в месте стеноза значительно изменяется, с постепенным снижением значений давления. 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.

#### 4.2 Обсуждение математической модели

Формирование атеросклеротической бляшки в сонной артерии обусловлено сложными распределениями кровотока и изменениями гемодинамических параметров, таких как давление и напряжение сдвига. Исследования гемодинамики сонных артерий с разными степенями стеноза, основанные на сравнительном анализе скоростей потока, давления на стенке и напряжения сдвига, позволяют сделать следующие выводы:

(1) Распределение кровотока в сонных артериях с различной степенью стеноза существенно варьируется. С увеличением степени стеноза скорость потока в центре сужения возрастает, а вихревой поток рядом со стенозом значительно усиливается.

(2) В течение сердечного цикла давление на стенку в месте стеноза сонной артерии изменяется циклически и находится в состоянии общего отрицательного давления, что создает эффект отрицательного давления. По мере увеличения степени стеноза значение давления в этом месте имеет тенденцию к снижению. Эффект отрицательного давления также приводит к отложению клеток крови в области выше и ниже стеноза, формируя атеросклеротические бляшки и вызывая стеноз сонной артерии.

(3) С увеличением степени стеноза наблюдается тенденция к расширению области высокого потокового напряжения в месте стеноза; величина этого напряжения непрерывно возрастает и достигает максимума в самой области стеноза. Потоковое напряжение в наружной сонной артерии, которая не имеет стенозов, также зависит

от состояния внутренней сонной артерии и, вероятно, увеличивается. Аномальные уровни потокового напряжения могут приводить к утолщению и разрыву стеноза, а также к отслоению атеросклеротических бляшек сонной артерии, что может вызвать окклюзию дистальной сонной артерии и ишемический инсульт.

### **4.3 Математическое моделирование сонных артерий в каротидной эндартерэктомии**

В результате проведения ангиографии сонных артерий были получены детализированные изображения анатомии сонной артерии пациента, которые учитывают его индивидуальные анатомические особенности. Эти изображения содержат информацию о диаметре артерии, наличии аномалий и других важных морфологических параметрах. Важным аспектом анализа стали граничные условия на входе и выходе системы, такие как скорость кровотока и артериальное давление, которые необходимы для точного моделирования гемодинамических процессов. На основе этих изображений создается трехмерная модель сонной артерии, которая включает в себя информацию о расположении и размерах атеросклеротической бляшки, а также о состоянии стенок артерии. Параллельно с этим формируется расчетная сетка для последующих численных расчетов в программе CFD, что позволяет более глубоко изучить влияние бляшки на кровоток и оценить риски, связанные с развитием сердечно-сосудистых заболеваний.

Это позволило реалистично смоделировать характеристики кровотока, потоковое напряжение стенки сосуда и т.д. в модели *in vitro*, изучить и проанализировать их. Кроме того, в модели можно моделировать операции КЭА. Например, после удаления бляшки пересчитывается измененная гемодинамика. Результаты операции также анализируются для оценки влияния операции на такие параметры, как скорость кровотока и потоковое напряжение, а также для прогнозирования возможных гемодинамических паттернов после операции.

Используя результаты моделирования, специалисты могут оценить вероятные послеоперационные риски, что также позволяет предсказать

долгосрочные изменения в кровотоке. В частности, это включает анализ вероятности возникновения рестеноза сосуда, что имеет важное значение для планирования дальнейшего наблюдения и лечения пациентов после хирургического вмешательства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно отчетам Всемирной организации здравоохранения, цереброваскулярные заболевания занимают вторую строчку в списке основных причин смертности на глобальном уровне. Следует подчеркнуть, что наблюдается тенденция к росту смертности от цереброваскулярных заболеваний, несмотря на периодические колебания этих показателей, которые остаются на достаточно высоком уровне.

Распространенность заболеваний сонной артерии и их связь с ишемическим инсультом можно понять благодаря различным исследованиям, в которых освещается частота возникновения стеноза сонной артерии и его влияние на цереброваскулярные нарушения.

Распространенность цереброваскулярных заболеваний и ишемического инсульта, связанных с поражением сонной артерии. Стеноз сонной артерии признан критическим фактором риска ишемического инсульта, на долю которого приходится примерно 10% всех ишемических инсультов. Распространенность тяжелого бессимптомного стеноза сонной артерии, по оценкам, составляет от 0,5% до 1,6% в общей популяции Rossitter et al. (2017). Это указывает на то, что, хотя у многих людей может быть заболевание сонной артерии, значительная часть из них остается бессимптомной до тех пор, пока не произойдет нарушение мозгового кровообращения.

Согласно исследованию, С. Tangkanakul et al. (2014), острая ишемия головного мозга примерно в 4-5% случаев связана со стенозом ВСА, что подчеркивает важность скрининга заболеваний сонной артерии в группах риска [122]. Исследование, проведенное М. Petrova et al. (2021), показало, что распространенность стеноза сонной артерии варьировало от 0,4% до 16,1%, в зависимости от популяции и используемых методов скрининга [57].

Согласно данным эпидемиологических исследований, заболевания экстракраниальной сонной артерии являются причиной 20-30% ишемических инсультов в западной популяции. Это подчеркивает критическую роль патологии

сонной артерии в этиологии цереброваскулярных заболеваний. Кроме того, была задокументирована взаимосвязь между толщиной интима-медиа сонных артерий и тяжестью ишемической болезни сердца, что указывает на то, что атеросклероз сонных артерий является маркером системного сосудистого заболевания [38].

Каротидная эндартерэктомия признана одним из самых эффективных методов лечения пациентов со стенозом сонной артерии на уровне 70 – 99% и в настоящее время считается стандартной хирургической процедурой. Операция, проведенная в течение двух недель после ишемического инсульта, значительно снижает риск ипсилатерального инсульта на протяжении следующих двух лет – до 17%, по сравнению с 27,6% у тех, кому не производилась операция. Таким образом, каротидная эндартерэктомия не только эффективно уменьшает риск повторного инсульта, но и является убедительным аргументом для своевременного хирургического вмешательства как меры профилактики будущих цереброваскулярных осложнений [55].

КЭАЭ считается предпочтительным методом лечения симптоматического стеноза внутренней сонной артерии при сужении от 70 до 99%, так как её эффективность в снижении риска ишемического инсульта в три раза выше, чем у медикаментозной терапии. При стенозе от 50 до 69% требуется детальный анализ соотношения риска ишемического инсульта и возможных периоперационных осложнений перед тем, как решать вопрос о необходимости хирургического вмешательства или выборе консервативного метода лечения.

С увеличением распространенности каротидной эндартерэктомии в клинической практике стали проявляться новые трудности, зачастую вызванные недостаточным знанием анатомии шейной области хирургами. Неполное понимание расположения нервных структур и их взаимодействия с сосудами может привести к травмам как сосудов, так и нервов, что может вызвать различные осложнения.

Наше исследование состояло из двух этапов: анатомического и клинического. На первом этапе была проведена морфометрия корней аорты у 20 трупов из отделения патологической анатомии Сеченовского Университета.

Мы провели морфометрические измерения сонных артерий (внутренние диаметры ОСА, ВСА и НСА), а также угол бифуркации. Полученные данные послужили основой для создания базы данных, которая затем была подвергнута статистическому анализу. В рамках НИР проведенного на базе Центра хирургии имени Б.В. Петровского при исследовании области бифуркации сонных артерий головы осуществлялось послойное рассечение от поверхностных слоев к глубоким. При этом особое внимание уделялось тщательному наблюдению за сосудистыми и нервными путями в данной области и их взаимосвязями. Уточнение направлений сосудистых и нервных структур, а также их анатомических характеристик обеспечило анатомическую основу для более эффективной защиты нервов и сосудов во время каротидной эндартерэктомии. Известно, что существуют большие индивидуальные различия в типологии и расположении нервов в черепной части черепа, а также в сосудисто-нервной корреляции. Поэтому строгая и хорошо документированная сосудистая и нейроанатомическая база необходима для точного предоперационного позиционирования.

При КЭА сонная артерия выделяется продольно вдоль передней границы грудино-ключично-сосцевидной мышцы. После обнажения оболочки сонной артерии освобождаются общая, внутренняя и наружная сонные артерии. Поэтому при освобождении сонной артерии следует избегать травмы соседних нервов. Подъязычный и верхний гортанный нервы легко повредить интраоперационно, и у пациентов могут возникнуть такие осложнения, как паралич язычной мышцы на пораженной стороне, паралич крикотиреоидной мышцы и расслабление голосовых связок. Подъязычный нерв проходит через наружную сонную артерию и внутреннюю сонную артерию впереди от бифуркации и должен быть тщательно идентифицирован, чтобы избежать травмы во время операции. Разделение коллатералей подъязычного нерва обычно не требуется, но может быть выполнено для лучшего обнажения внутренней сонной артерии. Кроме того, наружная ветвь верхнего гортанного нерва часто проходит в непосредственной близости от верхней щитовидной артерии, поэтому рассечение верхней щитовидной артерии должно выполняться таким образом, чтобы избежать травмы верхнего гортанного

нерва, который проходит через первый сегмент этой артерии.

P. Whitfield et al. (2010), пришли к выводу, что интраоперационная травма может возникнуть сразу после выделения латеральной ветви верхнего гортанного нерва, поэтому рутинное интраоперационное воздействие не рекомендуется [135]. Повреждение черепно-мозгового нерва обычно вызывается потягиванием, при этом временное повреждение встречается в 3 – 10 % случаев, а постоянное – в 1 – 2 %. Лучшее время для оценки функции черепных нервов это от 3 недель до 6 месяцев после операции [86]. В настоящем исследовании были детально измерены взаимоотношения нерва с сонной артерией и окружающими мышцами, а также детально изучена анатомическая структура каждого слоя, связанного с операцией, с целью дальнейшего снижения осложнений эндартерэктомии при стенозе сонной артерии.

Морфология бифуркации общей сонной артерии наиболее характерна для типа В; высота бифуркации общей сонной артерии преимущественно располагалась выше верхнего рога щитовидного хряща.

Внутренние диаметры общей сонной, внутренней сонной и наружной сонной артерий и угол бифуркации сонной артерии в области бифуркации сонной артерии у мужчин и женщин достоверно различались, при  $p < 0,05$ , причем разница была статистически значимой и у мужчин большей, чем у женщин. Выводы данного исследования в основном согласуются с данными литературы, то есть при выполнении каротидной эндартерэктомии у пациентов с ишемической цереброваскулярной болезнью хирургическая операция должна проводиться разными методиками в зависимости от принадлежности пола, а размер разреза должен быть осторожным и не слишком большим, чтобы избежать повреждения кровеносных сосудов и периферических нервов у пациентов женского пола. Между тем, во время вскрытия областей бифуркации левой и правой сонных артерий на образцах трупного черепа было обнаружено, что различия в измерениях внутренних диаметров общей сонной артерии, внутренней сонной артерии и наружной сонной артерии между областями бифуркации левой и правой сонных артерий у здоровых пациентов были относительно небольшими, при  $p > 0,05$ , и не

имели статистической значимости. Что касается угла бифуркации сонной артерии, то при  $p < 0,05$  существует разница между левой и правой сторонами, и угол бифуркации левой стороны больше, чем правой, что является статистически значимым. Разница в угле бифуркации левой и правой сонных артерий является результатом комбинации факторов, включая различия в анатомической конфигурации левой и правой сонных артерий и асимметрия во время эмбрионального развития. Общая сонная артерия берет начало в грудной полости, справа – от плечеголового ствола, слева – от дуги аорты, поэтому левая общая сонная артерия на несколько сантиметров длиннее правой общей сонной артерии.

Это различие в происхождении и путях оттока крови приводит к различиям в артериальном давлении и гемодинамике. Таким образом, сочетание этих факторов создает разницу в угле бифуркации сонной артерии между правой и левой сонной артерией.

С помощью биомеханических измерений образца (общая прочность, прочность на растяжение, абсолютная и относительная деформация, модуль Юнга) была получена биомеханическая модель

Знание структуры артериальной стенки с гистологической точки зрения является важной основой для разработки собственных уравнений, описывающих механические свойства артериальной стенки. На основе состава, структуры и основных механических свойств стенки сонной артерии могут быть созданы математические модели для моделирования. Эксперименты с механическими свойствами сонной артерии показывают, что анизотропная, нелинейная связь сосудистого изоморфизма более способна правильно описать механические свойства кровеносного сосуда, уравнение изоморфизма коэффициента жесткости и инкрементального модуля упругости является важным параметром модели сосудистой механики. Зависимость "напряжение-давление-деформация-диаметр" артериального сосудистого русла нелинейна, и ее кривую можно разделить на зоны низкого и высокого напряжения; в зоне низкого напряжения напряжение нарастает медленнее, и операция сосудистого шва может обеспечить более высокую степень проходимости в этом интервале [5].

Моделируя гемодинамику в сонных артериях с разной степенью стеноза, мы узнали, что распределение кровотока в сонных артериях с различной степенью стеноза существенно различается. Во время сердечного цикла давление на стенку в месте стеноза сонной артерии находится в процессе циклического изменения и общего состояния отрицательного давления, формируя эффект отрицательного давления. По мере увеличения степени стеноза значение давления в этом месте имеет тенденцию к снижению. Эффект отрицательного давления также приводит к отложению клеток крови в области выше и ниже стеноза, формируя атеросклеротические бляшки и вызывая стеноз сонной артерии. По мере увеличения степени стеноза наблюдается тенденция к увеличению области высокого напряжения сдвига стенки в месте стеноза, причем величина напряжения сдвига монотонно возрастает и достигает максимума в месте стеноза.

Во второй части исследования, в “Научном Центре Хирургии имени академика Б.В. Петровского” обследованы пациенты в количестве 60 человек с атеросклеротическим поражением сонных артерий, которым были выполнена реконструктивная операция. На основе анализа оперированных больных с применением современных инструментальных методов диагностики будет получена общая количественная и качественная характеристика клинико-физиологических особенностей больных в предоперационном периоде.

Проанализировав результаты данного исследования, можно сделать вывод, что Внутренние диаметры общей сонной, внутренней сонной и наружной сонной артерий с бляшками были больше, чем у сонных артерий без бляшек. а угол бифуркации общей сонной артерии коррелирует с образованием бляшек на внутренней сонной артерии; чем больше угол бифуркации, тем выше вероятность образования бляшек на внутренней сонной артерии.

В клинической группе у 9 из 151 пациента была выявлена патологическая извитость сонных артерий, но она не была обнаружена ни в одном случае в кадаверной группе. Это может свидетельствовать о том, что патологическая извитость сонных артерий повышает вероятность формирования атеросклеротических бляшек в сонных артериях. Это требует дальнейшего

изучения.

Поэтому не исключено, что изменение геометрии сосудов может быть причиной раннего развития атеросклеротической болезни.

В сонных артериях может действовать естественный компенсаторный механизм вазодилатации для поддержания кровотока на ранних стадиях формирования атеросклеротических бляшек. Эта компенсаторная вазодилатация может уменьшить влияние стеноза на начальных стадиях заболевания. По мере постепенного нарастания бляшки стенка сосуда может претерпевать определенную степень ремоделирования, в результате чего общий внутренний диаметр кажется больше по сравнению с сосудом без бляшки, даже при наличии интимального утолщения. В то же время воспаление по периферии бляшки приводит к небольшой локальной дилатации стенки сосуда, увеличивая его диаметр. Это особенно верно в тех областях, где накопление бляшек и воспалительная активность более активны. Гипертония или другие состояния, связанные с кровотоком и давлением, могут вызывать увеличение диаметра сосуда в местах разницы напряжения сдвига в стенке сосуда после образования бляшки, что может быть биомеханической адаптацией к длительному изменению кровотока.

Со временем наличие долговременной бляшки может привести к хроническим изменениям сосудов, включая расширение или повышение жесткости, что может повлиять на измерение внутреннего диаметра сонной артерии.

В докладе T.G. Phan et al. (2012) говорится, что изменения угла бифуркации сонной артерии и изменения просвета внутренней сонной артерии могут быть связаны с образованием бляшек как фактора риска стеноза независимо от традиционных сосудистых факторов [50].

Изменения в морфологии сосудов приводят к изменениям в гемодинамике, которые играют ключевую роль в развитии артериальной патологии, например, напряжение сдвига стенки на эндотелиальные клетки, которое представляет собой силу трения, оказываемую текущей кровью на единицу площади стенки сосуда. Напряжение сдвига стенки снижается в области угла бифуркации по сравнению с

другими частями артериального участка, и, в частности, напряжение сдвига стенки снижается более значительно в боковой стенке по сравнению с окружающей стенкой сосуда.

Однако низкое напряжение сдвига стенки, как правило, приводит к дисфункции эндотелиальных клеток и повышенному поглощению ЛПНП, что, в свою очередь, увеличивает вероятность образования атеросклеротических бляшек.

Таким образом, считается, что во время образования бляшек низкое напряжение сдвига стенки способствует прогрессированию атеросклероза, в то время как высокое напряжение сдвига стенки оказывает тормозящее влияние на формирование бляшек.

Измененная геометрия влияет на гемодинамические изменения, и было показано, что изменения в структуре самого сосуда чаще приводят к отложению холестерина, чем к его увеличению, поэтому, когда гемодинамические изменения превышают допустимые для сосуда, вероятно, возникает сосудистое заболевание.

Исследователи предположили, что вероятность образования бляшек значительно возрастает, если напряжение сдвига стенки меньше 0,4 Па. Помимо влияния на локальное образование бляшек, напряжение сдвига стенки может непосредственно изменять состав бляшек и, следовательно, их уязвимость. В области бифуркации сонной артерии стенка сосуда повреждается прямым воздействием кровотока, а когда сосудистый эндотелий подвергается воздействию кровотока, эндотелиальные клетки механически повреждаются, что приводит к недостаточности эндотелиальных клеток, окислительному стрессу, инфильтрации липидов и другим патологическим процессам. В заключение следует отметить, что изменения морфологических характеристик сосудов свидетельствуют о том, что сонные артерии пациентов с бляшками могут претерпевать значительные структурные и функциональные изменения, которые требуют более тщательного мониторинга и возможных вмешательств [106-119].

Анализ прогнозирования риска послеоперационного рестеноза у того же пациента был проведен на основе наших данных, сравнивающих морфологию артерий в группе с бляшками и в группе без бляшек.

Поскольку это был предоперационный и послеоперационный прогноз риска для одного и того же пациента, другие факторы риска, такие как гипертония и сахарный диабет, считались неизменными, и после операции изменилась только морфология артерий.

Мы проанализировали значимость всех статистически значимых переменных с  $P < 0,05$ . Были отобраны переменные с высокой корреляцией. В качестве предикторов были выбраны возраст, угол сонной артерии, внутренний диаметр сонной артерии.

Создание logistic регрессионной модели для прогнозирования риска послеоперационного ишемического инсульта у пациентов.

Мы предполагаем, что хотим предсказать, болен ли человек (0 = не болен, 1 = болен),

Формула logistic регрессионной модели:

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 \text{age} + \beta_2 \text{angle} + \beta_3 \text{diameterCCA} + \beta_4 \text{diameterICA} + \beta_5 \text{diameterECA}$$

Поскольку возраст, угол сонной артерии и диаметр сонной артерии являются разными параметрами, мы использовали иерархическую регрессионную модель (Hierarchical Regression Model). Каждый сегмент отдельно вычисляет свой собственный термин пересечения.

$$p_0 = \beta_0 \text{age} + \beta_0 \text{angle} + \beta_0 \text{diameter}$$

Наконец, полученная нами формула logistic регрессионной модели

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_0 + \beta_1 * \text{age} + \beta_2 * \text{angle} + \beta_3 * \text{diameterCCA} + \beta_4 * \text{diameterICA} + \beta_5 * \text{diameterECA}))}$$

- p - вероятность заболеть.

-  $\beta_0$  - член перехвата.

-  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  - коэффициенты регрессии соответствующих переменных.

Для расчета коэффициентов регрессии можно воспользоваться следующей формулой:

$$\beta_i = \frac{t_i * SE_i}{\sqrt{N}}$$

- $t_i$  - t-значение для каждой переменной
- $SE_i$  - стандартная ошибка
- $N$  - размер выборки

На основании полученных данных мы получили формулу для прогнозирования рестеноза после операции

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(-63.27 + 0.07 * \text{age} + 0.27 * \text{angle} + 1.44 * \text{CCA} + 4.27 * \text{ICA} + 1.56 * \text{ECA}))}$$

Хотя при изучении сонных артерий или других частей анатомии можно получить ценные сведения, эти исследования обычно сопровождаются рядом ограничений. Понимание этих ограничений крайне важно для правильной интерпретации результатов, руководства клинической практикой и разработки будущих исследований.

Анатомия человека значительно различается между людьми, что может повлиять на общую применимость и сопоставимость результатов исследований. Анатомические исследования часто основаны на ограниченных образцах и могут не полностью отражать эти различия.

Между тем, биомеханические свойства сонных сосудов с бляшками отличаются от свойств сосудов без бляшек, но из-за нехватки ресурсов собрать большое количество образцов сонных стенозов сложно и долго, поэтому сначала мы можем моделировать биомеханические свойства только нормальных сонных артерий. Поэтому сначала можно создать биомеханические модели только нормальных сонных артерий.

Несмотря на эти ограничения, анатомические исследования остаются жизненно важными для улучшения нашего понимания структуры и функции человеческого тела. Признавая эти ограничения и принимая меры по минимизации их влияния, исследователи могут повысить качество своих исследований и проложить путь для будущих исследований. Кроме того, междисциплинарные

подходы и разработка новых технологий могут помочь преодолеть эти проблемы и получить более глубокие анатомические и физиологические знания.

## 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 анатоморфологических и биомеханических данных 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

**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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бокерия, Л. А. Рентгеноэндоваскулярная диагностика и лечение заболеваний сердца и сосудов в Российской Федерации / Л. А. Бокерия, Б. Г. Алесян; – Москва: Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева. – 2014. – 180 с. – ISBN: 978-5-7982-0329-1.
2. Большаков, О. П. Оперативная хирургия и топографическая анатомия / О. П. Большаков, Г. Семёнов. – СПб.: Питер. – 2004. – 960 с. – ISBN 5-94723-085-2.
3. Влияет ли способ каротидной реконструкции на непосредственные результаты вмешательства? / А.В. Покровский., Д.Ф.Белоярцев., З.А. Адырхаев [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2012.– Т. 18. – №3. – С. 81-91.
4. Возрастно-половая изменчивость морфобиомеханических параметров передней мозговой артерии взрослых людей / В.Н. Николенко, О.А. Фомкина, И.В. Кириллова, Д.В. Иванов //Саратовский научно-медицинский журнал. – 2009. – Т. 5. – №. 4. – С. 482-485.
5. Гавриленко, А.В. Клиническое значение анатомических особенностей сонной артерии при каротидной эндартерэктомии / А.В. Гавриленко, В.Н. Николенко, Ч. Ли // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2024. – № 5. – С. 205-210.
6. Гемодинамика и механическое поведение бифуркации сонной артерии с патологической извитостью / О. Е. Павлова, Д. В. Иванов, А. А. Грамакова [и др.] // Изв. Саратов. ун-та Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2010. – №2. – С. 66-73.
7. Гладилин, Ю.А. Вариантная анатомия внутренней сонной артерии, артериального круга большого мозга и мозговых артерий / Ю.А. Гладилин, В.Н. Николенко. – Саратов: Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского. – 2009. – 241с.
8. Каротидная эндартерэктомия в России. Как действовать, если действующие рекомендации не дают ответов на сложные вопросы? / А.В. Сухарева, В.А.

Райконен, С.В. Ленская [и др.] // Российский кардиологический журнал. – 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 72-80.

9. Когнитивные расстройства в раннем и отдаленном периодах у пациентов после каротидной эндартерэктомии / Ю.В. Белов, Л.А. Медведева, О.И. Загорулько [и др.] // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2018. – №. 12. – С. 5-12.

10. Комаров, Р.Н. Современные анатомические представления о строении корня аорты с точки зрения практикующего хирурга / Р.Н. Комаров, А.И. Катков, С.Н. Одинокова // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2019. – Т. 12. – №. 5. – С. 433-440.

11. Корреляция между морфологическими и биомеханическими особенностями и атеросклерозом сонных артерий / А.В. Гавриленко, В.Н. Николенко, Н.Н. Аль-Юсеф [и др.] // Наука и инновации в медицине. – 2022. – Т. 7. – №. 3. – С. 160-163.

12. Лосев, Р.З. Рестеноз сонных артерий после каротидной эндартерэктомии. Современные аспекты проблемы (местные и системные факторы риска) часть I / Р.З. Лосев, А.Н. Куликова, А.С. Бахметьев // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2012. – Т.18. – №4. – С. 160-164.

13. Николенко, В.Н. Отечественная конституциональная анатомия в аспекте персонифицированной медицины / В.Н. Николенко, Д.Б. Никитюк, С.В. Чава // Сеченовский вестник. – 2013. – Т. 14. – №. 4. – С. 9-17.

14. 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 [и др.] // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2024. – Т. 23. – № 2. – С. 15-23.

15. Оценка эффективности хирургической реваскуляризации головного мозга у больных с крупными постинсультными кистами / Р.Н. Ларьков, Ю.Ю. Колеснико, П.Г. Сотников [и др.] // Альманах клинической медицины. – 2015.– № 39. –С. 29-3

16. Покровский, А. В. Анализ результатов эверсионной каротидной эндартерэктомии в отдаленном периоде / А. В. Покровский, Д. Ф. Белоярцев, О. Л. Талыблы // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2014. – Т. 20. С.100-108.

17. Покровский, А. В. Сравнительное изучение отдаленных результатов открытых операций и эндоваскулярных вмешательств при атеросклеротических стенозах брахиоцефального ствола / А. В. Покровский, Д. Ф.Белоярцев //Ангиология и сосудистая хирургия. – 2004. – Т. 10. – №. 4. – С. 53-62.
18. Покровский, А.В. Ангиология и сосудистая хирургия / А. В. Покровский; – Москва: Медицина, 2004. – Том 1. – 734 с.
19. Покровский, А.В. Клиническая ангиология: В двух томах / А.В. Покровский. – Москва: ОАО «Издательство «Медицина». с Т.1. – 2004. – 808 с. – ISBN 5-225-04738-6.
20. Распространенность проявлений атеросклероза при различных вариантах положения сосудов в области бифуркации общей сонной артерии / А.С. Мошкин, М.А. Халилов, Ч. Ли [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2024. – №4.
21. Синельников, Р. Д. Атлас анатомии человека. Том 4: Учение о нервной системе и органах чувств / Р.Д. Синельников, Я.Р. Синельников, А. Я. Синельников // Изд. 7-е, перераб. В 4-х томах. – Москва: Новая волна, 2010. – 312 с. – ISBN 978-5-7864-0202-6.
22. Случаи этапного комбинированного лечения пациентки с разорвавшейся аневризмой офтальмического сегмента внутренней сонной артерии /Д.В. Литвиненко, Е.И. Заблова, В.В. Ткачев, Г.Г. Музлаев // Сеченовский вестник. – Т. 12. – N 4. – 2021г. – С. 65-71.
23. Сонные артерии / Большая медицинская энциклопедия: в 30 т. / М. Д. Князев, Н. В. Крылова, М. Н. Селезнев, гл. ред. Б. В. Петровский. – 3-е изд. – Москва: Советская энциклопедия, 1984. – 544 с.
24. Сравнительный анализ эффективности реконструктивных операций и консервативного лечения у больных с патологической извитостью внутренней сонной артерии на основании динамики неврологического и офтальмологического статусов / А.В. Гавриленко, А.В. Абрамян, А.В. Куклин, Д. Офосу //Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 51-55.

25. Тактика лечения больных с атеросклеротическим поражением сонных артерий в зависимости от ультразвуковых характеристик бляшки / А.В. Гавриленко, В.А. Сандриков, С.И. Скрылев [и др.] // *Анналы хирургии*. – 2001. – № 4. – С. 49-56.
26. Тактика хирургического лечения пациентов высокого риска с атеросклеротическим поражением сонных артерий / М.Л. Телепнева, Л.Н. Иванов, Е.В. Чеботарь [и др.] // *Медицинский альманах*. – 2015. – №3. – С. 57-60.
27. Экономический ущерб сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации в 2016 году / А.В. Концевая, О.М. Драпкина, Ю.А. Баланова [и др.] // *Рациональная фармакотерапия в кардиологии*. – 2018. – Т. 14. – № 2. – С. 156-166.
28. A Pilot Study on Measuring Tissue Motion During Carotid Surgery Using Video-Based Analyses for the Objective Assessment of Surgical Performance / T. Sugiyama, T. Nakamura, Y. Ito [et al.] // *World J Surg*. – 2019. – Vol. 43. – № 9. – P. 2309-2319.
29. Aburahma, A.F. Cranial and cervical nerve injuries after repeat carotid endarterectomy / A.F. AbuRahma, M.A. Choueiri // *J Vasc Surg*. – 2000. – Vol. 32. – № 4. – P. 649-654.
30. ACST-2 Collaborative Group. Second asymptomatic carotid surgery trial (ACST-2): a randomised comparison of carotid artery stenting versus carotid endarterectomy / A. Halliday, R. Bulbulia, L.H. Bonati [et al.] // *Lancet*. – 2021. – Vol. 398. – P. 1065-1073.
31. Age and disease-related geometric and structural remodeling of the carotid artery / A.V. Kamenskiy, I.I. Pipinos, J.S. Carson [et al.] // *J Vasc Surg*. – 2015. – Vol. 62. – № 6. – P. 1521-1528.
32. American College of Cardiology Foundation Clinical Expert Consensus Task Force (ACCF/AHA Writing Committee to Update the 2000 Expert Consensus Document on Electron Beam Computed Tomography); Society of Atherosclerosis Imaging and Prevention, Society of Cardiovascular Computed Tomography. ACCF/AHA 2007 clinical expert consensus document on coronary artery calcium scoring by computed tomography in global cardiovascular risk assessment and in evaluation of patients with chest pain: a report of the American College of Cardiology Foundation Clinical Expert Consensus Task Force (ACCF/AHA Writing Committee to Update the 2000 Expert

- Consensus Document on Electron Beam Computed Tomography)/ P. Greenland, R.O. Bonow, B.H. Brundage [et al.] // *Circulation*. – 2007. – Vol. 115. – №3. – P. 402-426.
33. American Society of Anaesthesiologists physical status classification // *Indian J Anaesth*. – 2011. – Vol. 55. – № 2. – P.111-115.
34. An in vivo murine model of low-magnitude oscillatory wall shear stress to address the molecular mechanisms of mechanotransduction-brief report / N.J. Willett, R.C. Long, K Maiellaro [et al.] // *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. – 2010. – Vol. 30. – № 11. – P. 2099-2102.
35. Analysis of the anatomic eligibility for transcarotid artery revascularization in Chinese patients who underwent carotid endarterectomy and transfemoral carotid artery stenting / W. Fan, W. Shi, S. Lu [et al.] // *Front Cardiovasc Med*. – 2023. – № 9. – e1045598.
36. Anisotropic residual stresses in arteries / T. Sigaeva, G. Sommer, G.A. Holzapfel [et al.] // *J R Soc Interface*. – 2019. – Vol. 16. – № 151.
37. Arumugam, S. A Cadaveric Study on the Course of the Cervical Segment of the Internal Carotid Artery and Its Variations / S. Arumugam, N.K. Subbiah // *Cureus*. – 2020. – Vol. 12. – № 4. – e7663.
38. Association of carotid intima media thickness with the severity of coronary artery disease in patients undergoing coronary artery bypass graft surgery in a tertiary care center / B. Gautam, K. Sherpa, R. Paudel [et al.] // *Nepalese Heart Journal* – 2019. – Vol. 16. – № 2. – P. 35-40.
39. Association of Transcarotid Artery Revascularization vs Transfemoral Carotid Artery Stenting With Stroke or Death Among Patients With Carotid Artery Stenosis. / M.L. Schermerhorn, P. Liang, J. Eldrup-Jorgensen [et al.] // *JAMA*. – 2019. – Vol. 322. – № 23. – P& 2313-2322.
40. Associations between preprocedural carotid artery perivascular fat density and early in-stent restenosis after carotid artery stenting / J. Hu, N. Hu, T. Hu [et al.] // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9. – № 6. – e16220.

41. Atherosclerosis at arterial bifurcations: evidence for the role of haemodynamics and geometry / U. Morbiducci, A.M. Kok, B.R. Kwak [et al.] // *Thrombosis and haemostasis*. – 2016. – Vol. 115. – № 3. – P. 484-492.
42. Atherosclerotic plaque surface morphology in the carotid bifurcation assessed with multidetector computed tomography angiography / T.T. de Weert, S. Cretier, H.C. Groen [et al.] // *Stroke*. – 2009. – Vol. 40. – № 4. – P. 1334-1340.
43. Audit and Research Committee, A model for national outcome audit in vascular surgery / D.R. Prytherch, B.M. Ridler, J.D. Beard [et al.] // *Eur J VascEndovasc Surg*. – 2001. – Vol.21. – № 6. – P.477-483.
44. Beasley, W.D. Cranial nerve injuries and the retrojugular approach in carotid endarterectomy / W.D. Beasley, C.P. Gibbons // *Ann R Coll Surg Engl*. – 2008. – Vol. 90. – № 8. – P. 685-688.
45. Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators / H.J. Barnett, D.W. Taylor, M. Eliasziw // *N Engl J Med*. – 1998. – Vol. 339. – № 20. – P.1415-1425.
46. Bijari, P.B. Carotid bifurcation geometry is an independent predictor of early wall thickening at the carotid bulb / P.B. Bijari., B.A. Wasserman., D.A. Steinman // *Stroke*. – 2014. – Vol. 45. – № 2. – P. 473-478.
47. Biomechanical factors in atherosclerosis: mechanisms and clinical implications / B.R. Kwak, M. Back, M.L. Bochaton-Piallat [et al.] // *Eur Heart J*. – 2014. – Vol. 35. – № 43. – P. 3013-3020.
48. Brain Vasculature Color-Labeling Using the Triple-Injection Method in Cadaveric Heads: A Technical Note for Improved Teaching and Research in Neurovascular Anatomy / K. Smith, G.J. Ventre, P. Palmisciano [et al.] // *Oper Neurosurg (Hagerstown)* – 2023. – Vol. 24. – № 3. – P. 291-300.
49. Bressloff, N.W. Parametric geometry exploration of the human carotid artery bifurcation / N.W. Bressloff // *Journal of Biomechanics*. – 2007. – Vol. 40. – № 11. – P. 2483-2491.

50. Carotid artery anatomy and geometry as risk factors for carotid atherosclerotic disease / T.G. Phan, R.J. Beare, D. Jolley [et al.] // *Stroke*. – 2012. – Vol. 43. – № 6. – P. 1596-1601.
51. Carotid atheroma rupture observed in vivo and FSI-predicted stress distribution based on pre-rupture imaging / J.R. Leach, V.L. Rayz, B. Soares [et al.] // *Ann Biomed Eng.* – 2010. – Vol. 38. – № 8. – P. 2748-2765.
52. Carotid bifurcation atherosclerosis. Quantitative correlation of plaque localization with flow velocity profiles and wall shear stress / C.K. Zarins, D.P. Giddens, B.K. Bharadvaj [et al.] // *Circulation research*. – 1983. – T. 53. – № 4. – C. 502-514
53. Carotid Bifurcation Geometry as Assessed by Ultrasound is Associated with Early Carotid / K. Spanos, G. Petrocheilou, L. Livieratos [et al.] // *Atherosclerosis Ann Vasc Surg*. – 2018. – Vol. 51. – P. 207-216.
54. Carotid bifurcation position and branching angle in patients with atherosclerotic carotid disease / D. De Syo, B.D. Franjic, I. Lovricevic [et al.] // *Coll Antropol.* – 2005. – Vol. 29. – № 2. – P. 627-632.
55. Carotid Endarterectomy With Shunt-A Stepwise Surgical Technique Demonstration for Trainees: 2-Dimensional Operative Video / S. Matsuo, R. Kurogi, T. Hasegawa [et al.] // *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. – 2024. – Vol. 27. – № 2. – 243.
56. Carotid plaque assessment using fast 3D isotropic resolution black-blood MR / N. Balu, V.L. Yarnykh, B. Chu [et al.] // *Magnreson Med*. – 2011. – Vol. 65. – № 3. – P. 627-637.
57. Carotid Ultrasound Screening Programs in Rural Communities: A Systematic Review / M. Petrova, H. Kiat, A. Gavino [et al.] // *J Pers Med*. – 2021. – Vol. 11. – № 9. – P. 897.
58. Chandra, U. A prospective study of prevalence of carotid artery disease in patients with coronary artery disease and its correlation with traditional atherosclerotic risk factors in central india / U. Chandra, Y. Panwar, A. Bharani // *International Journal of Cardiovascular Practice*. – 2019. – Vol. 4. – № 2. – P. 45-49.

59. Chiu, J.J. Effects of disturbed flow on vascular endothelium: pathophysiological basis and clinical perspectives / J.J. Chiu, S. Chien // *Physiol Rev.* – 2011. – Vol. 91. – № 1. – P. 327-387.
60. Chuong, C.J. Compressibility and Constitutive Equation of Arterial Wall in Radial Compression Experiments / C.J. Chuong, Y.C. Fung // *Journal of Biomechanics.* – 1984. – Vol. 17. – № 1. – P. 35-40.
61. Ci Han, Ö.F. Topography of the Anatomical Landmarks of Carotid Bifurcation and Clinical Significance / Ö.F. Ci Han, K. Deveci // *Cureus.* – 2022. – Vol. 14. – №11. – e31715.
62. Çirak, M. Vagus nerve injury during carotid endarterectomy: a cadaveric study / M. Çirak, B. Bozkurt, K. Yağmurlu // *Medical Journal of Bakirkoy* – 2020. – Vol. 50. – № 6. – P. 621-626.
63. Collateral circulation alters downstream hemodynamic stress caused by intracranial atherosclerotic stenosis / X. Liu, D. Dornbos, Y. Pu [et al.] // *Neurol Res.* – 2017. – Vol. 39. – № 6. – P. 498-503.
64. Comparison of carotid endarterectomy and repeated carotid angioplasty and stenting for in-stent restenosis (CERCAS trial): a randomised study / T. Hrbac, J. Fiedler, V. Procházka [et al.] // *Stroke Vasc Neurol.* – 2023. – Vol. 8. – № 5. – P. 99-404.
65. Current medical and surgical stroke prevention therapies for patients with carotid artery stenosis / M. Jusufovic, K. Skagen, K. Krohg-Sørensen [et al.] // *Curr Neurovasc Res.* – 2019. – Vol. 16. – № 1. – P.96-103.
66. Dharmakidari, S. Carotid Artery Stenosis: Medical Therapy, Surgery, and Stenting / S. Dharmakidari, P. Bhattacharya, S. Chaturvedi // *Curr Neurol Neurosci Rep.* – 2017. – Vol. 19. – № 17. – P.77.
67. Distribution of cardiac output to the brain across the adult lifespan / C.Y. Xing, T. Tarumi, J. Liu [et al.] // *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism.* – 2017. – Vol. 37. – №. 8. – P. 2848-2856.
68. 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 [et al.] // *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*. – 2021. Vol. 30 – №2.
69. Endothelial-to-mesenchymal transition drives atherosclerosis progression / P.Y. Chen, L. Qin, N. Baeyens [et al.] // *J Clin Invest*. – 2015. – Vol. 125. – № 12. – P. 4514-1428.
70. Estimation of Biomechanical Properties of Normal and Atherosclerotic Common Carotid Arteries / E. Soleimani, M. Mokhtari-Dizaji, N. Fatourae [et al.] // *Cardiovasc Eng Technol*. – 2019. – Vol. 10. – №1. – P. 112-123.
71. Estrogen attenuates neuronal excitability in the insular cortex following middle cerebral artery occlusion / T.M. Saleh, B.J. Connell, C. Legge [et al.] // *Brain Res*. – 2004. – Vol. 20. – № 1. – P. 119-129.
72. Expert recommendations on the assessment of wall shear stress in human coronary arteries: existing methodologies, technical considerations, and clinical applications / F. Gijssen, Y. Katagiri, P. Barlis [et al.] // *European heart journal*. – 2019. – Vol. 40. – № 41. – P. 3421–3433.
73. Exploring the Relationships Between Hemodynamic Stresses in the Carotid Arteries / M. Ziegler, J. Alfraeus, E. Good [et al.] // *Front Cardiovasc Med*. – 2021. – №7. № e617755.
74. Finite element simulation of three dimensional residual stress in the aortic wall using an anisotropic tissue growth model / H. Liu, M. Zhang, M. Liu [et al.] // *J Mech Behav Biomed Mater*. – 2019. – Vol. 92 – P. 188-196.
75. GBD 2019 Ageing Collaborators et al. Global, regional, and national burden of diseases and injuries for adults 70 years and older: systematic analysis for the Global Burden of Disease 2019 Study // *bmj*. – 2022. – Vol. 376.
76. Gimbrone, M.A. Vascular endothelium, hemodynamics, and the pathobiology of atherosclerosis / M.A. Gimbrone, G. Garcia-Cardena // *Cardiovasc Pathol*. – 2013. – Vol. 22. – № 1. – C. 9-15.
77. Haghighipour, N. Residual stress distribution in a lamellar model of the arterial wall / N. Haghighipour, M. Tafazzoli-Shadpour, A. Avolio // *J Med Eng Technol*. – 2010. – Vol. 34. – № 7. – P. 422-428.

78. Heart Disease and Stroke Statistics 2018 Update: A Report from the American Heart Association / E.J. Benjamin, S.S. Virani, Callaway CW [et al.] // *Circulation*. – 2018. – Vol.137. – P. e67–e492.
79. Hemodynamic Parameters and Early Intimal Thickening in Branching Blood Vessels / C. Kleinstreuer, S. Hyun, J.R. Buchanan // *Crit Rev Biomed Eng*. – 2017. – № 45. – P. 319-382.
80. High shear stress relates to intraplaque haemorrhage in asymptomatic carotid plaques / A. Tuentler, M. Selwaness, A. Arias Lorza [et al.] // *Atherosclerosis*. – 2016. – Vol. 251. – P. 348-354.
81. High-risk carotid plaque: lessons learned from histopathology / F.D. Kolodgie, K. Yahagi, H. Mori [et al.] // *Seminars in Vascular Surgery*. – 2017. – Vol. 30. – №. 1. – P. 31-43.
82. Hudetz, A.G. Characterization of anisotropic elastic properties of the arteries by exponential and polynomial strain energy functions / A.G. Hudetz, E. Monos // *Acta Physiol Acad Sci Hung*. – 1981. – Vol. 57. – № 2. – P. 111-122.
83. Hybrid surgery for symptomatic chronic near-total or total occlusion of the internal carotid artery / C.M. Wang, J.T. Han, Z.C. Jia [et al.] // *Chin Med J (Engl)* – 2021. – Vol. 134. – № 9. – P. 1104-1106.
84. Impact of Clinical Trial Results on the Temporal Trends of Carotid Endarterectomy and Stenting From 2002 to 2014 / M.A. Hussain, M. Mamdani, J.V. Tu [et al.] // *Stroke*. – 2016. – Vol. 47. – № 12. – P. 2923-2930.
85. In Vivo Material Properties of Human Common Carotid Arteries: Trends and Sex Differences / M. Smoljkic, J. Vander Sloten, P. Segers [et al.] // *Cardiovasc Eng Technol*. – 2023 – Vol. 14 – № 6. – P. 840-852.
86. Incidence of cranial nerve injuries after carotid eversion endarterectomy with a transverse skin incision underregional anaesthesia / A. Assadian, C. Senekowitsch, N. Pfaffelmeyer [et al.] // *Eur J Vasc Endovasc Surg*. – 2004. – Vol. 28. – № 4. – P. 421-424.
87. Internal carotid artery angle of origin: a novel risk factor for early carotid atherosclerosis / M. Sitzer, D. Puac, A. Buehler [et al.] // *Stroke*. – 2003. – Vol. 34. – № 4. – P. 950-955.

88. Jariwala, P. Endovascular management of the post-traumatic common carotid artery pseudoaneurysms / P. Jariwala, A. Punjani, R. Kamble // *Pol J Radiol.* – 2021. – № 86. – P. 287-290.
89. Kerwin, W.S. Noise and motion correction in dynamic contrast-enhanced MRI for analysis of atherosclerotic lesions / W.S. Kerwin, J. Cai, C. Yuan // *Magn Reson Med.* – 2002. – Vol. 47. – № 6. – P. 1211-1217.
90. Kurkcuoglu, A. Localization of the Carotid Bifurcation According to Hyoid Bone and Mandibular Angle / A. Kurkcuoglu, C. Pelin, H. Oktem & C. Aytakin // *Journal of Morphology.* – 2017. – Vol. 35. – № 3. – P. 901-906.
91. Long-term outcomes of carotid artery stenting in patients with carotid artery stenosis: A single-center 14-year retrospective analysis / B.M. Kang, S.M. Yoon, J.S. Oh [et al.] // *J Cerebrovasc Endovasc Neurosurg* – 2023. – Vol. 25. – 2. – P. 60-174.
92. Long-term results of carotid stenting and risk factors in patients with severe carotid artery stenosis undergoing subsequent cardiac surgery / N. Habib, B.K. Mahmoodi, M.J. Suttorp [et al.] // *Catheter Cardiovasc Interv.* – 2019 – Vol. 93. – № 3. – P. 134-139.
93. Low WSS Induces Intimal Thickening, while Large WSS Variation and Inflammation Induce Medial Thinning, in an Animal Model of Atherosclerosis / A. Millon, M. Sigovan, L. Boussel [et al.] // *PLoS One.* – 2015. – Vol. 17. – № 11. – e0141880.
94. Microsurgical anatomy of the internal carotid artery at the skull base / K.C. Prasad, A. Gupta, G. Induvarsha [et al.] // *J Laryngol Otol.* – 2022. – Vol. 136. – № 1. – P. 64-67.
95. Monocyte Subsets and Related Chemokines in Carotid Artery Stenosis and Ischemic Stroke / G.M. Grosse, W.J. Schulz-Schaeffer, O.E. Teebken [et al.] // *Int J Mol Sci.* – 2016. – Vol. 17. – № 4. – e433.
96. Morphological variation of carotid artery bifurcation level in digital angiography / A. Kurkcuoglu, C. Aytakin, H. Oktem [et al.] // *Folia Morphological.* – 2015. – Vol. 74. – № 2. – P. 206-211.
97. Morphometric Analysis of parameters of Internal Carotid Artery-Potential Clinical Implications / S. Sharma, S.G. Dixit, P.S. Khera [et al.] // *Neurol India.* – 2021. – Vol. 69. – № 6. – P. 1722-1728.

98. Morphometric and hemodynamic analysis of atherosclerotic progression in human carotid artery bifurcations / X. Huang, X. Yin, Y. Xu [et al.] // *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* – 2016. – Vol. 310. – № 5. – P. 639-647.
99. Naylor, A.R. Management of atherosclerotic carotid and vertebral artery disease: 2017 clinical practice guidelines of the European Society for Vascular Surgery (ESVS) / A.R. Naylor, J.B. Ricco, G.J. de Borst // *Eur J Vasc Endovasc Surg.* – 2018. – Vol. 55. – 3e81.
100. Nonlinear elastic analysis of blood vessels / S.G. Wu, G.C. Lee, N.T. Tseng // *J Biomech Eng.* – 1984. – Vol. 106. – № 4. – P. 376-383.
101. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborative Group. The final results of the NASCET trial. *New England Journal of Medicine.* – 1998. – № 339. – P. 1415-1425.
102. Outcome After 7 Years of Carotid Artery Stenting and Endarterectomy in Sweden – Single Centre and National Results / D. Lindström, M. Jonsson, J. Formgren [et al.] // *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery* – 2012. – Vol. 43. – № 5. – P. 499-503.
103. Partington, T. Intracranial pressure and cerebral blood flow / T. Partington, A. Farmery // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine.* – 2014. – Vol. 15. – № 4. – P. 189-194.
104. Perktold, K. Numerical flow studies in human carotid artery bifurcations: basic discussion of the geometric factor in atherogenesis / K. Perktold, M. Resch // *Journal of Biomedical Engineering.* – 1990. – Vol. 12. – № 2. – P. 111-123.
105. Postpartum cerebral arterial dissections: Clinical features and treatment / C.Y. Ruan, B.L. Gao, H.L. Pang [et al.] // *Medicine (Baltimore).* – 2021. – Vol. 100. – № 47. – e27798.
106. Quantitative Evaluation Between Wall Shear Stress and Artery Angle in Three-Dimensional Atherosclerotic Carotid Bifurcation Model / Z.Z. Li, X. Xu, J. Xia [et al.] // *Journal of Medical Imaging and Health Informatics.* – 2017. – Vol. 7. – № 4. – P. 805-809

107. Randomized controlled trial of visualization versus neuromonitoring of the external branch of the superior laryngeal nerve during thyroidectomy / M. Barczynski, A. Konturek, M. Stop [et al.] // *World J Surg.* 2012. – Vol. 36. – №6. – P. 1340-1347.
108. Relation between wall shear stress and carotid artery wall thickening MRI versus CFD / M. Cibis, W.V. Potters, M. Selwaness [et al.] // *J Biomech.* – 2016. – Vol. 49. – № 5. – P. 735-741.
109. Risk Factors for Stroke, Myocardial Infarction, or Death Following Carotid Endarterectomy: Results From the International Carotid Stenting Study / D. Doig, E.L. Turner, J. Dobson [et al.] // *Eur J Vasc Endovasc Surg.* – 2015. – Vol. 50. – № 6. – P. 688-694.
110. Rizzo, V. Enhanced interstitial flow as a contributing factor in neointima formation: (shear) stressing vascular wall cell types other than the endothelium. / V. Rizzo // *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* – 2009. – № 4. – P. 1196-1197.
111. Rogers, W. Cranial nerve injuries after carotid artery endarterectomy / W. Rogers, H.D. Root // *South Med J.* – 1998. – Vol. 81. – № 8. – P.1006-1009.
112. Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling: molecular, cellular, and vascular behavior / Y.S. Chatzizisis, A.U. Coskun, M. Jonas [et al.] // *J Am Coll Cardiol.* – 2007. – Vol. 49. – № 25. – P. 2379-2393.
113. Shear stress increases ICAM-1 and decreases VCAM-1 and E-selectin expressions induced by tumor necrosis factor-  $\alpha$  in endothelial cells / J.J. Chiu, P.L. Lee, C.N. Chen [et al.] // *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* – 2004. – Vol. 24. – № 1. – P. 73-79.
114. Shear stress selectively upregulates intercellular adhesion molecule-1 expression in cultured human vascular endothelial cells / T. Nagel, N. Resnick, W.J. Atkinson [et al.] // *J Clin Invest.* – 1994. – Vol. 94. – № 2. – P. 885-891.
115. Silver, F.H. Mechanical behavior of vessel wall: a comparative study of aorta, vena cava, and carotid artery / F.H. Silver, P.B. Snowhill, D.J. Foran // *Ann Biomed Eng.* – 2003. – Vol. 31. – № 7. – P. 793-803.

116. Silver, F.H. Viscoelasticity of the vessel wall: the role of collagen and elastic fibers / F.H. Silver, I. Horvath, D.J Foran // *Crit Rev Biomed Eng.* – 2001. – Vol. 29. – № 3. – P. 279-301.
117. Simulation of a pulsatile non-Newtonian flow past a stenosed 2D artery with atherosclerosis / F.B. Tian, L. Zhu, P.W. Fok, X.Y. Lu // *Comput Biol Med.* – 2013. – Vol.9. – P. 1098-1113.
118. Song, YK. Current and potential use of fresh frozen cadaver in surgical training and anatomical education / Y.K. Song, D.H. // *Jo. Anat Sci Educ.* – 2022. – Vol.15. – № 5. – P. 957-969.
119. Study of correlation between wall shear stress and elasticity in atherosclerotic carotid arteries / B. Zhang, J. Gu, M. Qian [et al.] // *Biomed Eng Online.* – 2018. – Vol. 16. – № 17. – P. 5.
120. Surgical anatomy of the external branch of the superior laryngeal nerve and its clinical significance in head and neck surgery / X. Kochilas, A. Bibas, J. Xenellis [et al.] // *Clin Anat.* – 2008. – Vol. 21. – № 2. – P. 99-105.
121. Tamtekin, B. Our early results of carotis endarterectomy with no shunt and primary closure method / B. Tamtekin, G.G. Ersoy, I Dal // *Kastamonu medical journal.* – 2023. – Vol. 3. – № 1. – P. 41-43.
122. Tangkanakul, C. Prevalence of carotid artery disease and risk factors in asymptomatic thai population using carotid duplex ultrasonography at the check-up clinic, health promotion center at bangkok hospital / C. Tangkanakul // *The Bangkok medical journal.* – 2014.
123. Tesfamariam, B. Endothelial Repair and Regeneration Following Intimal Injury / B. Tesfamariam // *J Cardiovasc Transl Res.* – 2016. – Vol. 9. – № 2. – P. 91-101.
124. The cerebral circulation and cerebrovascular disease I: Anatomy/ A. Chandra, W.A. Li, C.R. Stone [et al.] // *Brain circulation.* – 2017. – Vol. 3. – № 2. – P. 45-56.
125. The North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial: surgical results in 1415 patients / G.G. Ferguson, M. Eliasziw, H.W. Barr [et al.] // *Stroke.* – 1999. – Vol. 30. – № 9. – P. 1751-1758.

126. Tran, H. Small carotid thrombus and minimal stenosis causing repeated embolic strokes / H. Tran, H. Yonas // *Neuroimaging*. – 2011. – Vol. 21. – № 3. – P. 266-268.
127. Use of intermediate cervical plexus block in carotid endarterectomy -an alternative to deep cervical plexus block: a case series / A. Ratnayake, A. Abeysundara, B. Samarasinghe [et al.] // *BMC Anesthesiol*. – 2024. – Vol. 24. – № 1. – P. 288.
128. Variation in the carotid bifurcation geometry of young versus older adults: implications for geometric risk of atherosclerosis / J.B. Thomas, L. Antiga, S.L. Che [et al.] // *Stroke*. – 2005. – Vol. 36. – № 11. – P. 2450-2456.
129. Viedma, A. Extended Willis circle model to explain clinical observations in periorbital arterial flow / A. Viedma, C. Jiménez-Ortiz, V. Marco // *J Biomech*. – 1997. – Vol. 30. – № 3. – P. 265-272.
130. Wall shear stress and its role in atherosclerosis / M. Zhou, Y. Yu, R. Chen [et al.] // *Front Cardiovasc Med*. – 2023. – № 10. – e1083547.
131. Wall shear stress and local plaque development in stenosed carotid arteries of hypercholesterolemic minipigs / T. Thim, M.K. Hagensen, A. Horlyck [et al.] // *J Cardiovasc Dis Res*. – 2012. – Vol. 3. – № 2. – P. 76-83.
132. Wall shear stress in hypertensive patients is associated with carotid vascular deformation assessed by speckle tracking strain imaging / J.W. Yang, K.I Cho, J.H. Kim [et al.] // *Clin Hypertens*. – 2014. – Vol. 20. – № 10.
133. Wall shear stress in hypertensive patients is associated with carotid vascular deformation assessed by speckle tracking strain imaging / J.W. Yang, K.I. Cho, J.H. Kim [et al.] // *Clin Hypertens*. – 2014. – Vol. 20. – № 10.
134. Weizsacker, H.W. Isotropy and anisotropy of the arterial wall / H.W. Weizsacker, J.G. Pinto // *J Biomech*. – 1988. – Vol. 21. – № 6. – P. 477-487.
135. Whitfield, P. Surgical anatomy of the external branch of the superior laryngeal nerve / P. Whitfield, R.P. Morton, S. Al-Ali // *ANZ J Surg*. – 2010. – Vol. 80. – № 11. – P.813-816.
136. Wong, A. High-fidelity perforator visualization for cadaver dissection in surgical training / A. Wong // *Archives of Plastic Surgery* – 2023. – Vol. 50. – № 6. – P. 621-626.

137. Ziegler, T. Tissue engineering a blood vessel: regulation of vascular biology by mechanical stresses / T. Ziegler, R.M. Nerem // J Cell Biochem. – 1994. – Vol. 56. – №2. – P. 204-209.