

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт

На правах рукописи

СИНИЦЫНА ДАРЬЯ ЭДУАРДОВНА

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРЕХМЕРНОГО КРОВОТОКА В БИФУРКАЦИИ БРЮШНОЙ АОРТЫ**

Направление подготовки 01.06.01 – Математика и механика
Направленность 01.06.01_03 Механика жидкости, газа и плазмы

Научный доклад

Об основных результатах научно-квалификационной работы

Санкт-Петербург
2022

Научно-квалификационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Зайцев Дмитрий Кириллович

Рецензент: Доктор технических наук, профессор кафедры
Высшая математика,
Антонов Валерий Иванович
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время подробное изучение закономерностей движения крови в сердечно-сосудистой системе не теряет своей актуальности ввиду того, что такие исследования могут помочь врачам ответить на вопрос о гидродинамических причинах развития патологий в кровеносных сосудах, а также на основе результатов моделирования заблаговременно подобрать оптимальный способ дальнейшего хирургического вмешательства. Наличие в сердечно-сосудистой системе областей с нерегулярной геометрией, таких как бифуркации и изгибы, способствует возникновению вторичных течений и поперечной циркуляции кровотока, наряду с множеством физиологических параметров, в том числе присутствующих патологий (например, стенозы – локальное сужение сосуда, аневризмы – расширение сосуда). Также, стоит отметить, при построении модели кровеносного сосуда достаточно трудоёмко измерение большого количества индивидуальных параметров, поэтому необходимо создавать аргументировано упрощенные математические модели сосудистого русла, учитывающие пространственную кривизну и изменение диаметров. Сформировать упрощённые модели среднестатистической конфигурации, основанные на геометрических характеристиках множества пациентов, учитывающие характерные особенности рассматриваемой части сосудистого русла, без заметного снижения точности прогнозов является крайне актуальной задачей. В большинстве случаев при постановке физического эксперимента, ограничиваются использованием упрощённых моделей кровеносных сосудов, бифуркации и изгибы которых располагается в одной плоскости. Систематические экспериментальные исследования течения ультразвуковым доплеровским методом в бифуркации брюшной аорты при детальном моделировании геометрии среднестатистической конфигурации встречаются достаточно редко. Ультразвуковой доплеровский метод является наиболее доступным и распространённым клиническим методом, с помощью которого проводится диагностика сосудистых заболеваний и оценка результатов реконструктивных операций. При изучении потока посредством ультразвуковых методов регистрируется только проекция скорости на ось датчика без разделения на её компоненты - осевую, окружную и радиальную. Работ, представляющих методику регистрации всех составляющих скорости посредством ультразвукового доплеровского метода, не найдено.

Представленная работа направлена на получение новых углублённых знаний о структуре ламинарного кровотока, формирующегося в модели сосудистого русла, включающей бифуркацию брюшной аорты и последующие подвздошные артерии среднестатистической конфигурации в норме и при наличии атеросклеротических изменений её ветвей посредством численного и физического моделирования.

Цели и задачи работы

В ходе работы решались следующие основные задачи:

1. Разработка параметрической модели рассматриваемой области сосудистого русла среднестатистической конфигурации на основе клинических данных;
2. Сборка экспериментального стенда для ультразвуковых измерений структуры потока, моделирующего стационарный и пульсирующий режим кровотока;
3. Численное исследование влияния геометрии, входных и выходных граничных условий, а также наличия атеросклеротических изменений в подвздошных артериях на вихревые структуры трёхмерного пульсирующего кровотока;
4. Исследование трёхмерного потока при стационарном и пульсирующем движении кровеносной жидкости ультразвуковым доплеровским методом в разработанной модели, сопоставление полученных результатов с результатами численного моделирования.

Научная новизна работы

Новые данные фундаментального характера о структуре течения в области бифуркации брюшной аорты, полученные в результате численного и физического моделирования. Проведен подробный анализ влияния физиологических параметров на структуру развивающегося течения.

Достоверность полученных результатов

Проведенные в настоящей работе расчёты выполнены с использованием широко апробированного гидродинамического кода ANSYS CFX (<https://www.ansys.com>), который в настоящее время является наиболее доступным и надёжным вычислительным кодом в сфере CFD.

Достоверность выводов работы обеспечивается сравнением расчётных данных с данными физического моделирования, которое показало хорошее согласование. Наряду с этим, проведено обширное методическое исследование, предоставляющее детальную информацию о чувствительности различных численных параметров на решение, получаемое в ходе расчётов.

Практическая значимость работы

Систематизация информации о формирующимся течении на выходе из подвздошных артерий, которая может быть использована в качестве граничных условий при изучении кровотока ниже по сосудистому руслу.

Выработанные рекомендации по постановке экспериментального исследования структуры потока ультразвуковым доплеровским методом.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на российских и международных конференциях и семинарах:

1. Международной конференции Физика. СПб (Санкт-Петербург, 2019),
2. XII всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019).
3. Международной конференции Физика. СПб (Санкт-Петербург, 2020),
4. XIV Всероссийская (с международным участием) конференция «БИОМЕХАНИКА-2020» (Пермь, 2020),
5. Международной конференции Физика. СПб (Санкт-Петербург, 2021),
6. XVI Всероссийская школа «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (ММБМ 2022) (Краснодарский край, п. Дивноморское, 2022),
7. International summer school conference advanced problems in mechanics (Санкт-Петербург, 2022).

Публикации по теме работы и личный вклад автора

Основные результаты исследований изложены в 13 научных работах, список которых представлен в конце доклада. Все статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень РИНЦ, ВАК и индексируемых в базе Web of Science, 3 из них в журналах, индексируемых в базе Scopus. Вклад автора во все публикации является определяющим.

Результаты и положения, выносимые на защиту

Новые результаты расчетов кровотока в модели, включающей бифуркацию брюшной аорты и последующие подвздошные артерии, их анализ и сопоставление с экспериментальными данными.

Структура и объем работы

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 67 наименований. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, включая 19 таблиц и 66 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, её практическое значение, сформулированы основные цели и поставленные задачи работы.

В главе 1 представлен обзор современных подходов при моделировании течений в области бифуркации брюшной аорты. Отмечены особенности постановки физического эксперимента в моделях кровеносных сосудов. Представлены актуальные задачи гидродинамики кровообращения (раздел 1.1.), подробно разобраны все этапы и особенности постановки физического эксперимента (раздел 1.2, 1.3).

В главе 2 описаны использованные в ходе работы математическая и вычислительная модели, подробно описана поэтапная разработка модели

среднестатистической конфигурации, представлены собранные клинические данные по геометрии сосудистого русла ([раздел 2.1](#)) и граничным условиям ([раздел 2.3](#)), вычисление осреднённых граничных условий ([раздел 2.3](#)), а также результаты методических расчётов и некоторые вычислительные аспекты решаемых задач ([раздел 2.2](#)). Численное моделирование течения проводилось в предположении о ламинарном характере движения крови в сосудистом русле. Течение кровотока описывается системой трёхмерных уравнений Навье-Стокса. Численное моделирование проводилось в гидродинамическом пакете ANSYS CFX 19.2 (<https://www.ansys.com>), в котором реализован метод конечных объёмов на неструктурированных сетках. Во всех расчётах использовались опции, при которых обеспечивалась дискретизация по пространству и времени со вторым порядком точности. Построение геометрии производилась в программном комплексе SolidWorks 16, генерация расчётных сеток осуществлялись в сеточном генераторе ICEM CFD 19.2. Размерность используемых в расчётах сеток составляла 5 млн ячеек.

В [главе 3](#) представлены результаты численного моделирования кровотока в разработанной модели, исследовано влияние изменения характерной геометрии в физиологическом диапазоне, скошенности входного профиля скорости и наличия гемодинамически значимого стеноза в правой общей подвздошной артерии на структуру трёхмерного пульсирующего кровотока. Геометрия расчётной области базовой модели среднестатистической конфигурации представлена на рисунке 1. Модель сосудистого русла, включает нижний отдел брюшной аорты (БА) диаметром 18 мм, её бифуркацию на правую и левую общие подвздошные артерии (ОПА) диаметром $D = 10,8$ мм, которые в свою очередь разделяются на наружные (НПА, диаметр – 9,0 мм) и внутренние (ВПА, диаметр – 5,5 мм) подвздошные артерии и построена по осреднённым клиническим данным около 1000 пациентов. Общая длина модели составляет 215 мм. В разработанной модели учтены характерные пространственные углы ветвления сосудистого участка: отклонения от оси выходного участка БА от ОПА составляют: для левой $\beta_1=30^\circ$, для правой $\beta_2=15^\circ$; угол между ВПА и НПА составляет $\beta_3+\beta_4=40^\circ$ (на виде спереди) и $\beta_8=50^\circ$ (на виде сбоку); угол, характеризующий искривлённость брюшной аорты (в поперечном сечении) $\beta_5=165^\circ$; угол, характеризующий искривлённость ОПА в точке бифуркации

БА - $\beta_6=160^\circ$; угол между ОПА и НПА – $\beta_7=120^\circ$; угол, характеризующий искривлённость наружных подвздошных артерий (в поперечном сечении) $\beta_9=135^\circ$.

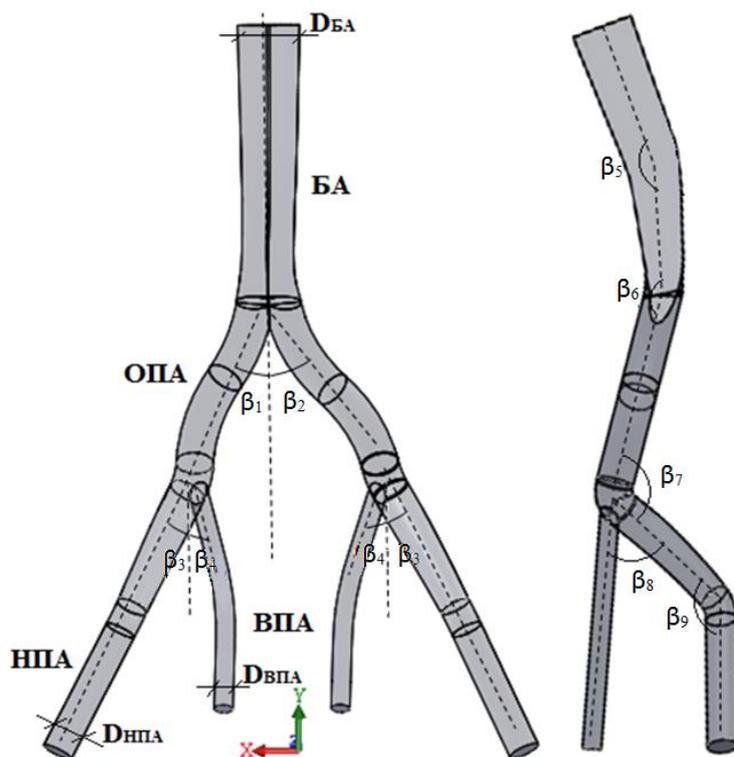


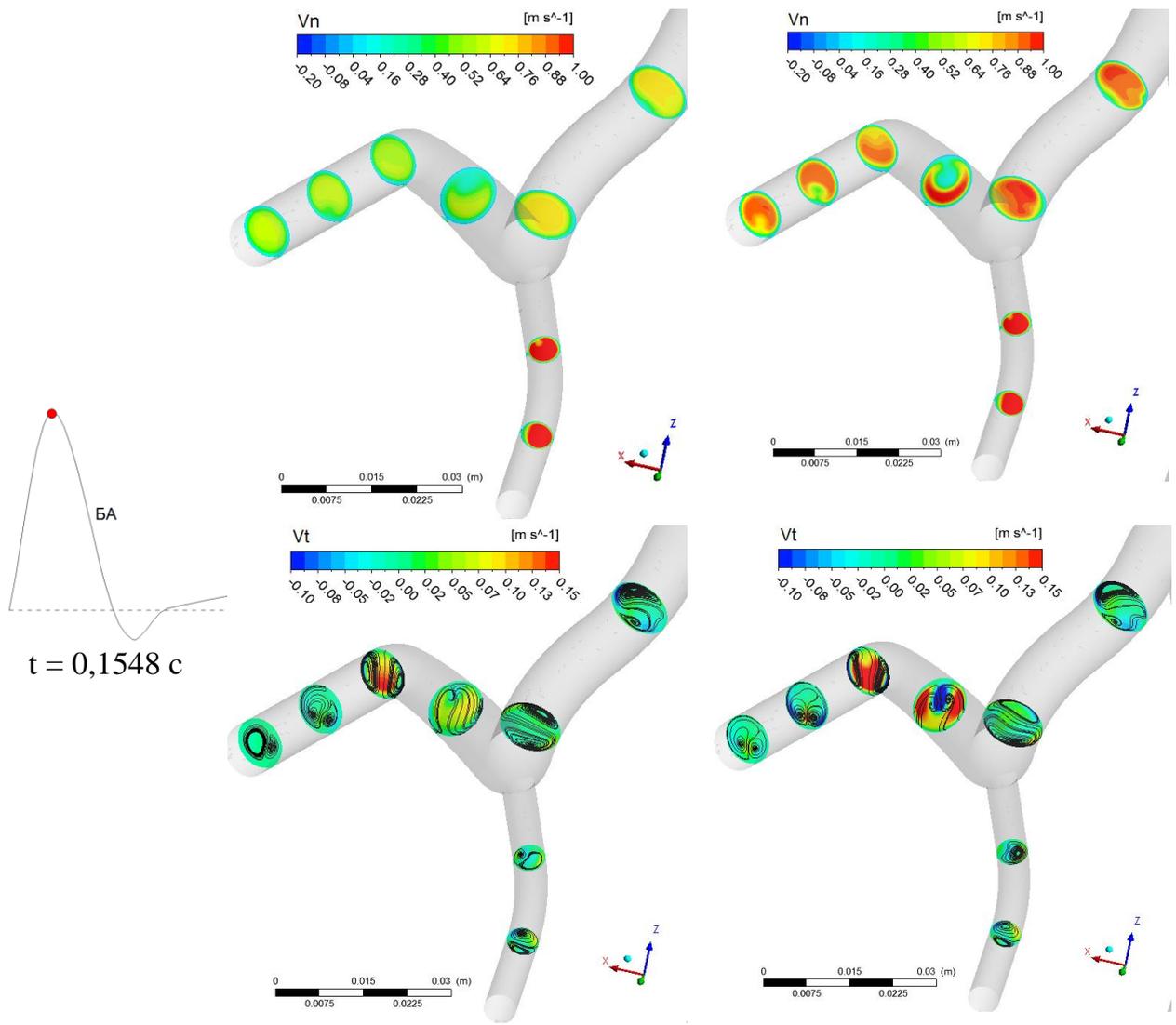
Рисунок 1. Базовая модель здоровой бифуркации брюшной аорты и подвздошных артерий среднестатистической конфигурации

Граничные условия задавались следующим образом: на входе в БА и на выходах из подвздошных артерий задавалось изменение среднерасходной скорости (V_b) во времени, исключая выход из правой НПА, где задавался постоянный уровень давления $P = 0$. На стенках ставилось условие прилипания. Исследовались два варианта режимов работы сердца: покоя (ЧСС = 70 уд/мин) и нагруженное состояние (ЧСС = 120 уд/мин). Период цикла пульсаций составляет $T = 0,86$ с и $0,5$ с, соответственно. Фаза увеличения расхода составляет 17-20% от всего времени цикла. Особенностью кривых расхода рассматриваемой области является наличие фазы обратных токов в состоянии покоя сердца (ЧСС = 70 уд/мин), которая исчезает при увеличении частоты сердечных сокращений (ЧСС=120 уд/мин), при этом максимальный расход на входе в брюшную аорту увеличивается в 1,5 раза. Расчёты выполнялись для жидкости со свойствами аналогичными крови: динамический коэффициент вязкости $\mu = 0,00375$ Па·с, плотность $\rho = 1050$ кг/м³. Для данных параметров максимальное за цикл число Рейнольдса на входе в брюшную аорту

составляет $Re_{\max} = V_b D_{BA} \rho / \mu = 1865$ для ЧСС = 70 уд/мин, и $Re_{\max} = 2782$ для ЧСС = 120 уд/мин, число Уомерсли $Wo = R \sqrt{2\pi\rho/\mu T} \approx 13$ и 17, соответственно.

В разделе 3.1. представлены характеристики структуры течения и подробно анализируется влияние физиологической скошенности входного профиля в рассматриваемой области сосудистого русла. Степень скошенности входного линейного профиля скорости определялась отношением, s , скоростей у передней и задней стенок БА. В расчётах данный параметр варьировался в диапазоне от 1.0 (однородное распределение) до 1,5; наибольшее из значений превосходит оценку степени скошенности, следующую из анализа литературных данных.

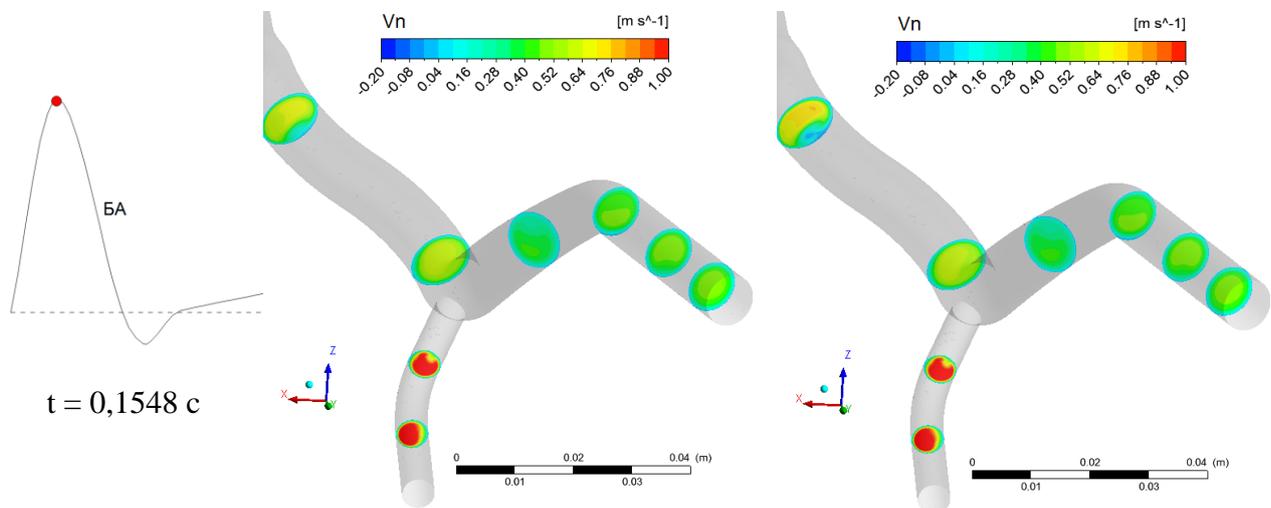
По рисункам 2-3 заметно влияние входной неоднородности на величину осевой скорости в правой ветви модели, а также на поле поперечной скорости в этой части рассматриваемой модели. В обеих подвздошных артериях также ощущается влияние формы входного профиля на поля поперечной скорости. Под поперечной скоростью рассматривается проекция скорости на ось t , перпендикулярную оси сосуда и направленную к передней стенке. Такое расположение выбрано неслучайно и соответствует оси ультразвукового (УЗ) датчика при экспериментальном исследовании полей поперечной скорости. В случае скошенного профиля в фазу уменьшения расхода ($t = 0.2236$ с) наблюдается разворот продольных вихрей на выходе из правой НПА. Течение в наружных и внутренних подвздошных артериях практически нечувствительно к задаваемой неоднородности скорости на входе в БА.



a

б

Рисунок 2. Распределение осевой и поперечной скорости с линиями тока в правой ветви подвздошных артерий в момент максимального расхода для *a* – однородного и *б* – скошенного профиля скорости



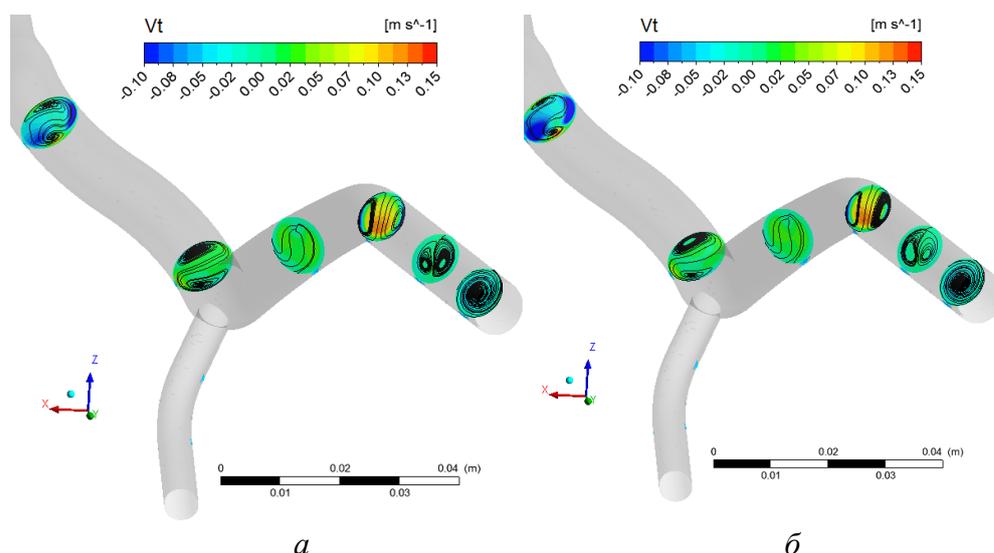


Рисунок 3. Распределение осевой и поперечной скорости с линиями тока в левой ветви подвздошных артерий в момент максимального расхода для а – однородного и б – скошенного профиля скорости

В разделе 3.2. представлены результаты исследования влияния характерных углов ветвления сосудистого русла в физиологическом диапазоне на структуру течения при разной частоте сердечных сокращений. В рамках задачи численного моделирования проведено параметрические исследования влияния углов двух характерных углов сосудистого русла: угла между ОПА и нижним отделом БА - β_6 , и угла между ОПА и НПА - β_7 (рисунок 4) в физиологическом диапазоне. Для этого модернизирована разработанная базовая модель среднестатистической конфигурации (рисунок 1) и получены 3 дополнительные модели, характерные углы ветвления которых изменялись в физиологическом диапазоне (Рисунок), геометрические параметры рассматриваемых четырёх модельных конфигураций приведены в таблице 1. Граничные условия соответствуют работе сердца в спокойном состоянии ЧСС = 70 уд/мин и при нагрузке ЧСС = 120 уд/мин.

Таблица 1. Геометрические параметры моделей бифуркации брюшной аорты

Вариант №	$\beta_1, ^\circ$	$\beta_2, ^\circ$	$\beta_3, ^\circ$	$\beta_4, ^\circ$	$\beta_5, ^\circ$	$\beta_6, ^\circ$	$\beta_7, ^\circ$	$\beta_8, ^\circ$	$\beta_9, ^\circ$	$D_{БА},$ мм	$D_{НПА},$ мм	$D_{ВПА},$ мм
1	15	30	25	15	165	180	90	50	135	18	9	5,5
2							120					
3							90					
Базовая модель							120					

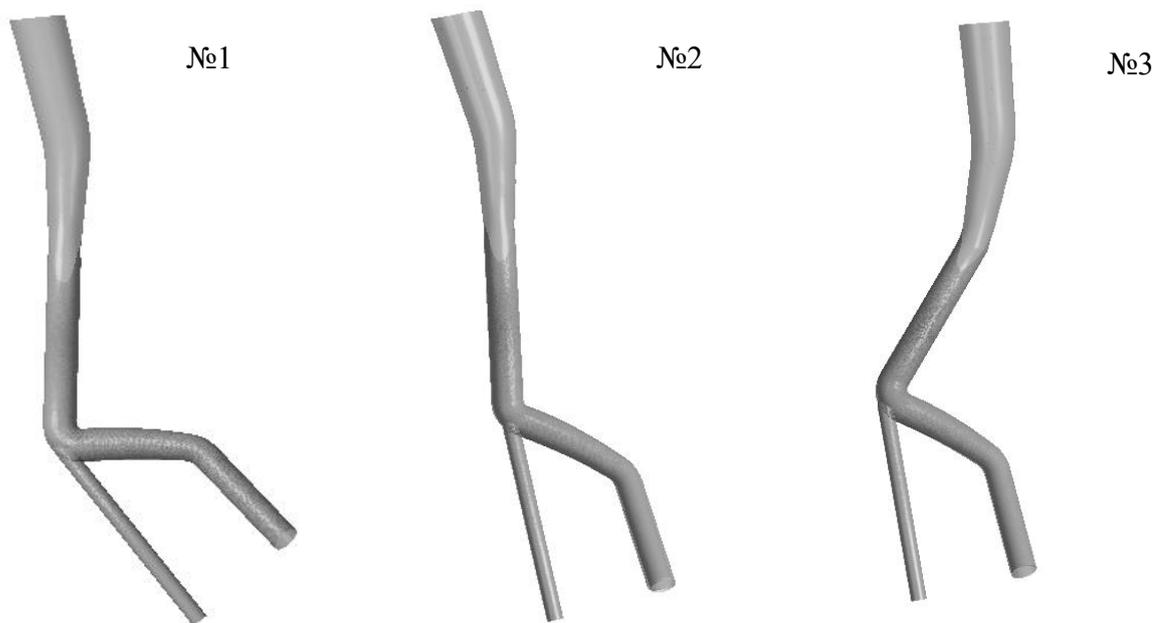


Рисунок 4. Варианты моделей бифуркаций брюшной аорты и подвздошных артерий среднестатистической конфигурации

Наибольший практический интерес представляет структура поперечного течения, формирующаяся на выходе из подвздошных артерий (рисунок 5, б). В НПА в начале цикла формируется одновихревое течение, которое трансформируется в двухвихревое (парные вихри Дина) в фазу увеличения расхода, и сохраняется почти до конца цикла пульсаций. Правая и левая ветви практически полностью идентичны по структуре поперечного течения, за исключением выхода из левой НПА, в которой в течение цикла зарегистрировано менее устойчивое закрученное течение. На выходе из обеих ВПА формируется устойчивое поперечное двухвихревое течение во всех геометрических моделях большую часть сердечного цикла, только в фазу обратного тока для состояния покоя ЧСС = 70 уд/мин формируется одновихревое течение.

С увеличением частоты сердечных сокращений структура течения на выходах из подвздошных артерий в основном подобна, наблюдаются увеличение количества вихрей до 4-х, но эти структуры неустойчивы. В состоянии нагрузки на выходах из НПА к концу цикла не успевает сформироваться одновихревое течение и большую часть цикла преобладает двухвихревое течение, в обеих ВПА весь цикл зафиксировано двухвихревое течение (Рисунок).

Перечисленные особенности характерны для всех модельных конфигураций, существующие отличия незначительны и наблюдаются в ОПА, но конечное

формирующееся течение на выходах из НПА и ВПА для всех моделей идентичное. Таким образом, при дальнейших экспериментальных исследованиях эволюции кровотока в этой области можно исключить рассмотрение моделей с максимальной сосудистой извитостью и ограничиться базовым вариантом (рисунок 1), который соответствует среднестатистической конфигурации.

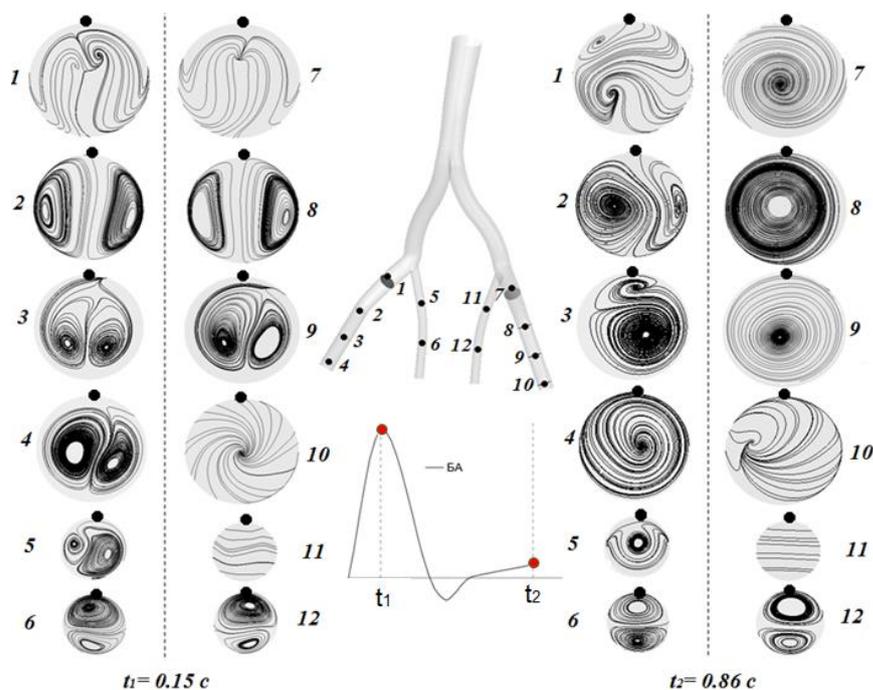


Рисунок 5. Линии тока поперечного течения в подвздошных артериях в момент максимума расхода и в конце сердечного цикла для ЧСС = 70 уд/мин

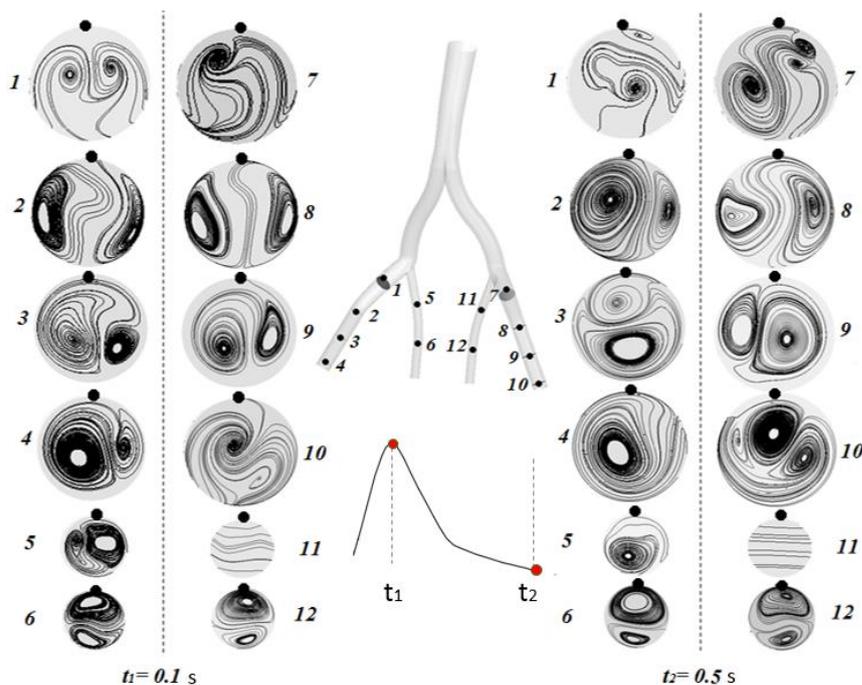


Рисунок 6. Линии тока поперечного течения в подвздошных артериях в момент максимума расхода и в конце сердечного цикла для ЧСС = 120 уд/мин

В разделе 3.3. рассматривается влияние наличия гемодинамически значимого стеноза (степень сужения стеноза (по площади) $STI = (1 - D_s^2/D^2) \cdot 100 \% = 70 \%$) в правой ОПА на структуру течения ниже по сосудистому руслу. Анализируя поле осевого течения после первой бифуркации на входе в ОПА, можно сделать вывод, что стеноз оказывает влияние также и выше по потоку по сравнению со здоровой ветвью: в течение цикла на входе в ОПА формируется зона обратных токов у внешней боковой и задней стенок сосуда в фазу уменьшения входного расхода (0,3 с), которая занимает 40% площади поперечного сечения. Также наличие стеноза приводит к формированию устойчивого закрученного поперечного течения на протяжении почти всей НПА большую часть сердечного цикла.

В главе 4 подробно описан экспериментальный стенд, его основные элементы, измерительный комплекс, а также методика исследования структуры потока ультразвуковым доплеровским методом. Представлены сопоставления расчётных и экспериментальных данных структуры потока в разработанной модели при наличии стеноза в правой ОПА. Представлено хорошее согласие расчётных и экспериментальных результатов. Устойчивые одновихревая и двухвихревая структуры поперечного течения по всей длине стенозированной ветви отчётливо регистрируются на ультразвуковых картинах. Однако, с увеличением количества вихрей и усложнением структуры течения зарегистрировать быстро меняющиеся картины течений ультразвуковым доплеровским методом крайне затруднительно.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Проведён подробный анализ геометрических характеристик сосудистого русла, включающий бифуркацию брюшной аорты и последующих бифуркации общих подвздошных артерий. Выделены основные геометрические характеристики. На основе проведённого анализа построена параметрическая модель среднестатистической конфигурации, а также её вариации с изменением параметров в физиологическом диапазоне. Также на основе проведённого литературного обзора подобраны осреднённые граничные условия для случая покоя и нагрузки сердца.
2. Для проведения экспериментального исследования структуры течения ультразвуковыми доплеровскими методами изготовлена жёсткая модель

среднестатистической конфигурации, собран и настроен экспериментальный стенд, который позволяет моделировать стационарный и пульсирующий режим работы с необходимыми соотношениями расходов в ветвях модели.

3. Выявлено, что во всех рассматриваемых модельных конфигурациях на выходах из подвздошных артерий присутствуют две характерные структуры вихревого течения: одновихревая и двухвихревая. В НПА в начале цикла формируется одновихревое течение, которое трансформируется в двухвихревое (парные вихри Дина) в фазу увеличения расхода, и сохраняется почти до конца цикла пульсаций. Правая и левая ветви практически полностью идентичны по структуре поперечного течения, за исключением выхода из левой НПА, в которой в течение цикла зарегистрировано менее устойчивое закрученное течение. На выходе из обеих ВПА формируется устойчивое поперечное двухвихревое течение во всех геометрических моделях большую часть сердечного цикла, только в фазу обратного тока для состояния покоя ЧСС = 70 уд/мин формируется одновихревое течение. С увеличением частоты сердечных сокращений вихревая структура на выходах из подвздошных артерий в основном подобна, наблюдаются увеличение количества вихрей до 4-х, но эти картины неустойчивы. В состоянии нагрузки на выходах из НПА к концу цикла не успевает сформироваться одновихревое течение и большую часть цикла преобладает двухвихревое течение.
4. Проведено численное исследование влияния характерных углов ветвления сосудистого русла в физиологическом диапазоне на структуру течения при разной частоте сердечных сокращений. Перечисленные в пункте 3 особенности характерны для всех модельных конфигураций, существующие отличия незначительны. Таким образом, при дальнейших исследованиях эволюции кровотока в этой области можно исключить рассмотрение моделей с максимальной сосудистой извитостью и ограничиться базовым вариантом, который соответствует среднестатистической конфигурации.
5. Согласно клиническим данным высокие значения индекса колебаний сдвиговых напряжений (OSI) и низкие значения осреднённых по циклу сдвиговых напряжений (TAWSS) приводят к поражению сосудистой стенки. Согласно расчётам, места, подверженные атеросклеротическим поражениям это внешняя

боковая стенка общих подвздошных артерий, передняя стенка и задняя стенка наружных подвздошных артерий. С увеличением частоты сердечных сокращений локализация опасных зон не изменилась, но их размер уменьшился, это свидетельствует о том, что такое распределение указанных параметров характерно для представленной физиологической конфигурации кровеносных сосудов.

6. Проведено численное исследование влияния скошенности входного профиля скорости. Показано, что физиологическая скошенность на входе в модель оказывает незначительное влияние на структуру течения и ограничивается начальным участком брюшной аорты.
7. Проведены экспериментальные исследования в стационарном и пульсирующем режиме ультразвуковым доплеровским методом. Исследовано влияние наличия гемодинамически значимого стеноза в правой общей подвздошной артерии на структуру течения ниже по сосудистому руслу. Подтверждено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных результатов. Устойчивые одновихревая и двухвихревая структуры поперечного течения по всей длине стенозированной ветви отчётливо регистрируются на ультразвуковых изображениях. Однако, с увеличением количества вихрей и усложнением структуры течения зарегистрировать быстро меняющиеся картины течений ультразвуковым доплеровским методом крайне затруднительно.

Опубликованные работы автора научно-квалификационной работы

1. Сеницына Д.Э., Туркина М.В., Юхнев А.Д., Зайцев Д.К. Ультразвуковое и численное исследование структуры течения в трехмерной модели бифуркации брюшной аорты, Научно-технические ведомости СПбГПУ.Физико-Математические науки, 2019, Т.12, №4, с.50-60 (**список ВАК, Web of Science**).
2. Туркина М.В., Сеницына Д.Э., Юхнев А.Д. Исследование структуры течения в модели бифуркации брюшной аорты со стенозом ультразвуковым доплеровским методом, Материалы научного форума с международным участием "Неделя науки СПбГПУ", 2019, с.202-205 (**список РИНЦ**).

3. Sinitsina D.E., Gataulin Y.A., Yukhnev A.D., Smirnov E.M., Zaitsev D.K. Numerical study of blood flow in the spatial model of the abdominal aorta bifurcation: effect of an inlet conditions // Journal of Physics: Conference Series 1400, 2019, 077043 IOP Publishing, pp. 1-6 (**список ВАК, Web of Science, Scopus**).
4. Синицына Д.Э., Юхнев А.Д., Гатаулин Я.А., Смирнов Е.М., Зайцев Д.К., Кирсанов Р.И., Куликов В.П. Численное моделирование пространственно-временной структуры кровотока в модели бифуркации брюшной аорты, XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Д23 Т. 4: Материалы симпозиумов. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019, с.208-210 (**список РИНЦ**).
5. Синицына Д.Э., Гатаулин Я.А., Юхнев А.Д., Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Численное моделирование кровотока в пространственной модели бифуркации брюшной аорты: влияние входных условий, Физика.СПб. Тезисы докладов международной конференции 22–24 октября 2019 года. СПб., 2019, с.480-481 (**список РИНЦ**).
6. Sinitsina D.E., Zaitsev D.K. Numerical simulation of the spatio-temporal evolution of the flow in the model of abdominal aorta bifurcation with stenosis in the in one of the common iliac arteries // Journal of Physics: Conference Series Special 1697, 2020, 012232 IOP Publishing, pp. 1-6 (**список ВАК, Web of Science, Scopus**).
7. Синицына Д. Э., Зайцев Д.К. Численное моделирование пространственно-временной эволюции течения в модели бифуркации брюшной аорты при наличии стеноза в одной из ветвей, Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020, с.427-428 (**список РИНЦ**).
8. Синицына Д.Э., Юхнев А.Д., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М. Расчетно-экспериментальное исследование пространственно-временной структуры течения в бифуркации брюшной аорты при наличии стеноза в одной из ветвей, Биомеханика-2020: материалы XIV Всерос. конф. с междунар. участием. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020, с.246-250 (**список РИНЦ**).

9. Сеницына Д.Э., Зайцев Д.К. Экспериментальное исследование течения в упругой модели бифуркации брюшной аорты, Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции 18–22 октября 2021 г. — СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021, с.514-515 (**список РИНЦ**).
10. Sinitsyna D.E., Zaitsev D.K. Experimental study of the flow in the elastic model of the abdominal aortic bifurcation, Journal of Physics: Conference Series 2103, 2021, 012221 IOP Publishing, pp. 1-6 (**список ВАК, Web of Science, Scopus**).
11. Мизинцева А.А., Сеницына Д.Э. Экспериментальное исследование структуры течения за односторонним стенозом ультразвуковым доплеровским методом // Неделя науки СПбПУ Физмех: материалы научной Всероссийской конференции. Физико-механический институт, 2022 (**список РИНЦ**).
12. Мальсагова Л.В., Сеницына Д.Э. Отработка технологии изготовления упругих моделей кровеносных сосудов в гидродинамическом эксперименте // Неделя науки СПбПУ Физмех: материалы научной Всероссийской конференции. Физико-механический институт, 2022 (**список РИНЦ**).
13. Сеницына Д.Э. Численное исследование влияния пространственной кривизны сосудистого русла на вихревую структуру в бифуркации брюшной аорты // Неделя науки СПбПУ Физмех: материалы научной Всероссийской конференции. Физико-механический институт, 2022 (**список РИНЦ**).