

**Тема работы:**

Численное моделирование гемодинамических показателей в бифуркации сонной артерии.

**Состав коллектива исполнителей:**

- Борисов Владимир Геральдович, кафедра фундаментальной математики, Кемеровский государственный университет, кандидат физико-математических наук.
- Захаров Юрий Николаевич, заведующий кафедрой Юнеско по информационным вычислительным технологиям, Кемеровский государственный университет, доктор медицинских наук.
- Виноградов Роман Александрович, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет», доктор медицинских наук.
- Дербилова Виктория Павловна, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет», аспирант.

**Научное содержание работы:**

Работа является продолжением исследования, описанного в отчете kemsu\_vgborisov\_202006.pdf.

**Аннотация:**

Методами вычислительной гидродинамики выполняются расчёты нестационарного периодического течения крови в трёхмерных персонально специфических моделях бифуркации сонной артерии, построенных на основании КТ обследований пациентов, перенёсших операции каротидной эндартерэктомии, а также добровольцев со здоровой сонной артерией. По результатам численных расчётов строятся рисковые зоны возникновения атеросклеротических явлений на стенках сосудов, связанные с пристеночным напряжением сдвига (WSS). С помощью интегральных значений гемодинамического показателя RRT (Relative Residence Time), оценивается расположение рисковых зон, их площади и характеристики интенсивности рисковых факторов. Проводится сравнение рисковых факторов между моделями в разрезе отдельных сегментов сосудов.

**Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:**

Геометрические модели сосудов строились на основании данных КТ-ангиографии сонных артерий в виде .stl файлов, сформированных с помощью внешнего программного обеспечения. Для выполнения численных расчётов использовалось ПО OpenFOAM. Постпроцессинг, анализ результатов расчётов, визуализация выполнялись в программе ParaView. При численных расчётах предполагалось, что стенки сосудов являются жёсткими. Кровь считалась ньютоновской жидкостью с плотностью  $1060 \text{ кг/м}^3$  и динамической вязкостью  $4.0 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Для корректности сравнения различных моделей, длительность кардиоцикла была выбрана равной 0.9 с, что соответствует частоте пульса 67. Форма графика изменения объёмной скорости в ОСА была построена по данным из литературных источников и также была неизменной для разных моделей.

Зоны, имеющие высокий риск развития атеросклероза, характеризуются длительным нахождением частиц крови вблизи внутренней стенки сосуда и их осцилляторным поведением. Это выражается в высоких значениях гемодинамического показателя RRT (Relative Residence Time), который учитывает и низкое значение пристеночного напряжения сдвига WSS (Wall Shear Stress) и осцилляторное поведение течения. Распределение показателя RRT на стенке сосуда рассчитывалось постпроцессингом на основании результатов численного расчёта скоростных параметров течения.

Для детализации сравнения рисков зон в разнородных моделях проводилась сегментация всех моделей по единой методике, которая заключалась в нижеследующем. Для каждой модели строилась секущая плоскость, проходящая через седловую точку бифуркации и ортогональная ОСА-ВСА (Общая и Внутренняя Сонные Артерии, см. Рисунок 1).

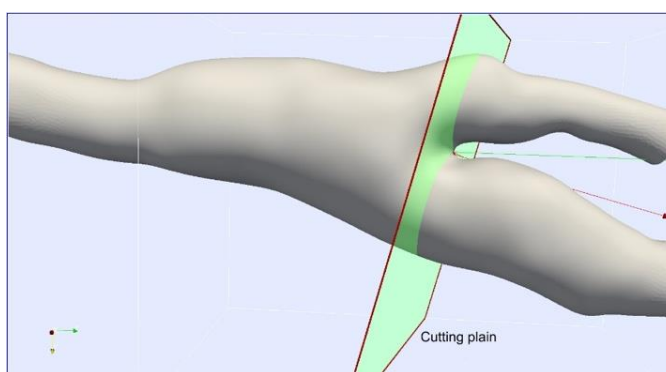


Рисунок 1. Построение секущей плоскости через седловую точку бифуркации.

Затем строились 3-4 параллельные плоскости, со сдвигом в 1 см. Одна - в дистальном (по течению) направлении, остальные - в проксимальном. В результате, в зависимости от длины исследуемого фрагмента возникали 5-6 сегментов сосуда, которые представлены на рисунке 2.

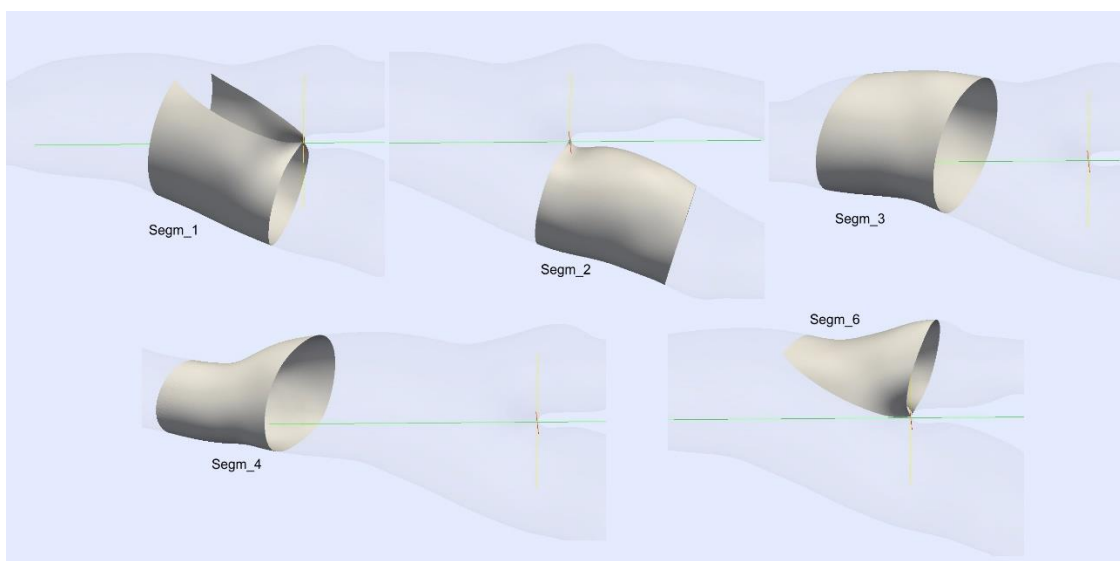


Рисунок 2. Деление бифуркации ОСА на сегменты.

В каждом из сегментов по результатам численных расчётов строились зоны, соответствующие значениям RRT, превышающим  $6.25 \text{ Па}^{-1}$ , называемые далее рисковыми зонами, которые отмечены цветом на Рисунке 3. Цветом отображается величина значения показателя RRT. Для каждого сегмента каждой модели вычислялась площадь рискованной зоны и интегральное значение показателя RRT, характеризующее суммарное воздействие на стенку сосуда фактора WSS в данной зоне в течение одного кардиоцикла. Использовались данные по второму кардиоциклу после старта расчёта, на котором, как показывают тестовые расчёты, значения показателя стабилизируются в достаточной степени после начального возмущения.

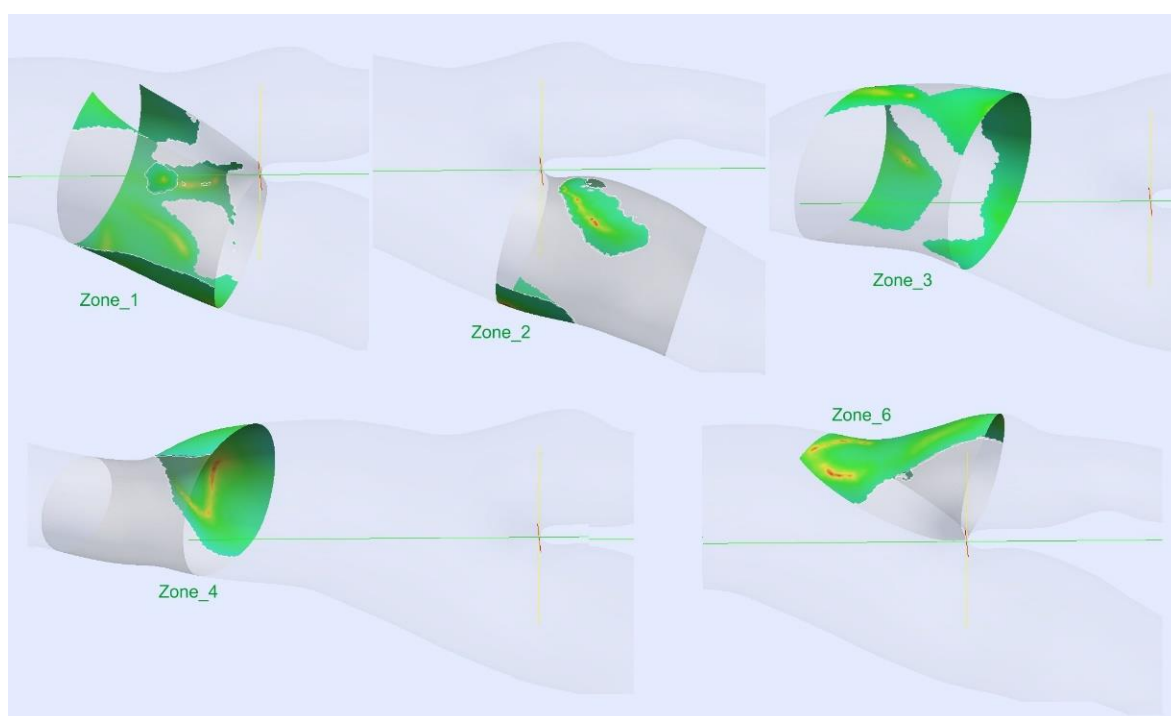


Рисунок 3. Зоны риска развития атеросклероза по сегментам.

Затем сравнивались различные параметры моделей в каждой из зон, относящихся к ОСА-ВСА в отдельности. Также, для исследования корректности полученных результатов, проводились тестовые расчёты с различными скоростными параметрами на входе и выходах и с различными сетками.

#### **Полученные результаты:**

Результаты исследования показали, что рискованные зоны практически всех моделей по данным здоровых пациентов локализуются в сегментах 1 и 2 и не пересекаются с прочими сегментами, за исключением сегмента 6, результаты по которому в силу его малой значимости в исследование не включены. На Рисунке 4 изображено распределение интегрального значения гемодинамического показателя RRT для пациентов со здоровой артерией.

Данные по здоровым артериям сравнивались с аналогичными данными для постоперационных пациентов. Полученные результаты показали, что для постоперационных моделей распределение показателя RRT значительно отличается от моделей здоровых пациентов и имеет специфические характеристики для различных типов операции эндартерэктомии.

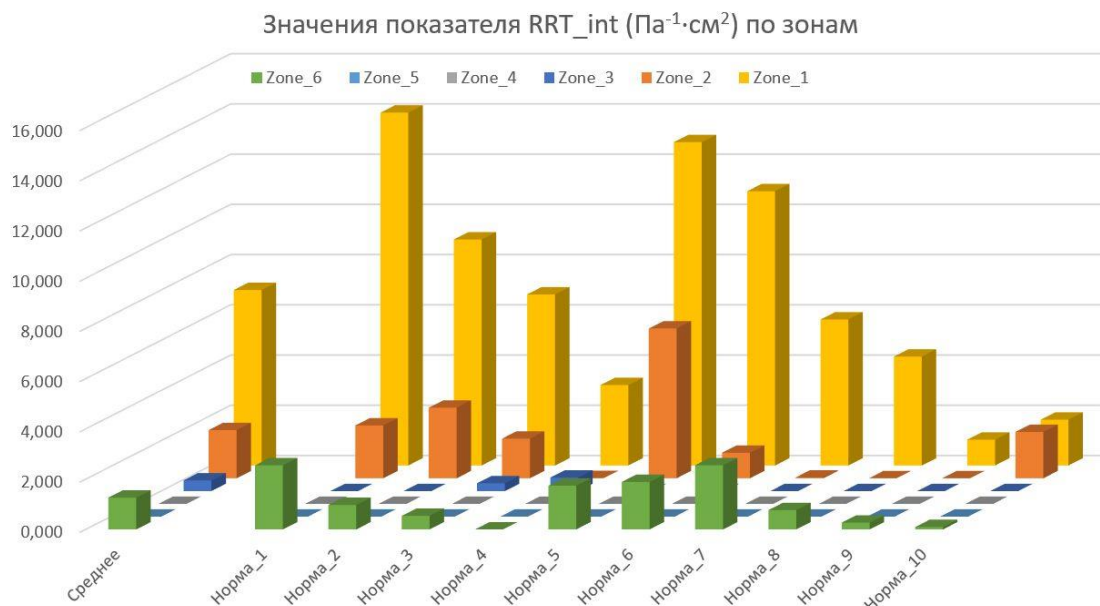


Рисунок 4. Диаграмма распределения RRT\_int по зонам для здоровых артерий.

### Эффект от использования кластера в достижении целей работы:

Доступ к кластеру НГУ использовался для численных расчётов в пакете OpenFOAM. С помощью расчётов, выполненных на кластере было существенно сокращено время численных расчётов, что позволили провести более полное исследование поставленной задачи.

### Публикации, содержащие результаты работы:

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В НОРМАЛЬНОЙ БИФУРКАЦИИ ОБЩЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ, Дербилова В.П., Виноградов Р.А., Захаров Ю.Н., Борисов В.Г. и др. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2022. Т. 28. № 1. С. 29-35.

АНАТОМИЯ И ГЕОМЕТРИЯ БИФУРКАЦИИ ОБЩЕЙ СОННОЙ АРТЕРИИ, Дербилова В.П., Виноградов Р.А., Капран Т.И., Захаров Ю.Н., Борисов В.Г. и др. *Клиническая физиология кровообращения*. 2022. Т. 19. № 1. С. 25-32.