

Тема работы:

Анализ влияния асимметрии входного потока на гемодинамику в бифуркации сонной артерии

Состав коллектива исполнителей:

- Борисов Владимир Геральдович, кафедра фундаментальной математики, Кемеровский государственный университет, кандидат физико-математических наук.
- Захаров Юрий Николаевич, Институт Вычислительных Технологий СО РАН, Новосибирск, доктор физико-математических 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_202206.pdf.

Аннотация:

Методами вычислительной гидродинамики выполнялись расчёты установившегося периодического течения крови в 89 трёхмерных персонально-специфических моделях бифуркации сонной артерии, построенных на основании КТ обследований пациентов, не имеющих патологий сонной артерии, а также добровольцев со здоровой сонной артерией. Сравнением показателей между парами моделей с симметричным и асимметричным потоками на входе в бифуркацию было установлено, что практически у всех моделей с симметричным потоком гемодинамические показатели хуже, чем у соответствующих им моделей с асимметричным потоком. Отсюда был сделан вывод, что гемодинамические показатели более простых моделей с симметричным потоком на входе можно считать оценкой сверху для показателей моделей с асимметричным потоком.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:

Проводились численные расчёты установившегося периодического течения крови в трёхмерных персонально-специфических моделях бифуркации сонной артерии. Используемые геометрические модели области течения, называемые далее «Norm», были построены на основании результатов КТ ангиографии 53 сонных артерий практически здоровых людей разного возраста без видимых поражений в зоне бифуркации. Во всех построенных моделях методом конечных элементов проводились расчёты нестационарного установившегося периодического кровотока. Кровь предполагалась ньютоновой

жидкостью с плотностью 1060 kg/m^3 и динамической вязкостью $4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. На боковой стенке сосуда ставилось условие непротекания, стенки сосуда считались жесткими.

На входном сечении задавалась временная зависимость объёмной скорости на входе, характерная для здорового человека, в соответствии с графиком на Рисунке 1.

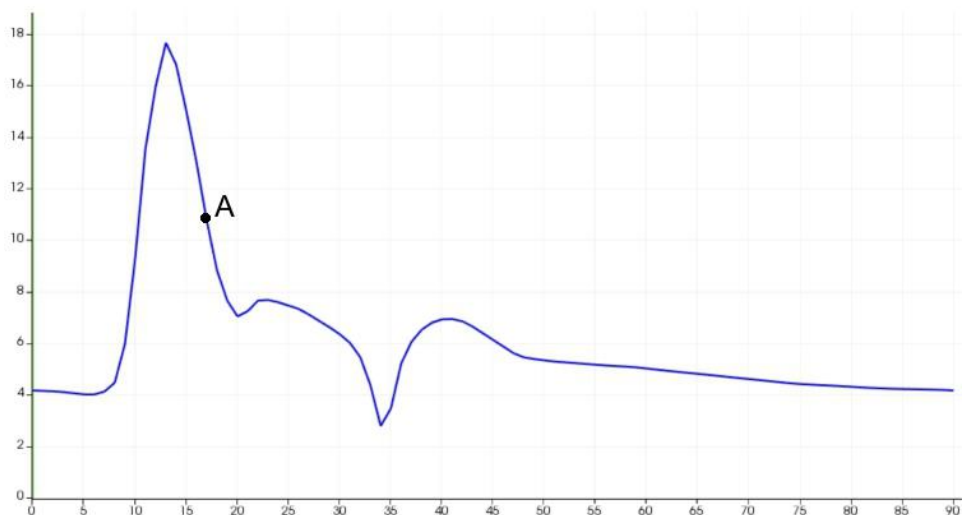


Рис. 1. Временная зависимость объёмной скорости течения на входе (мл/с)

На выходных сечениях ставились краевые условия RCR, описывающие сопротивление лежащей далее сосудистой сети.

Для всех моделей, в целях корректности сравнения результатов расчётов, численные расчеты проводились с идентичными параметрами кровотока:

- средняя объёмная скорость на входе (CCA) 6.05 ml/s ;
- соотношение средних объёмных скоростей на выходах $1.815 \pm 2\%$;
- длина пульсового интервала 0.9 s .

Для этого приходилось проводить вспомогательные расчёты с корректировкой параметров RCR на выходах.

По результатам расчётов визуально анализировалась центральная симметричность течения на входе в бифуркацию в момент времени, соответствующем точке «А» сердечного цикла (см. Рисунок 1). Для этого в дистальной части Общей Сонной Артерии (ОСА) каждой модели строилось ортогональное сечение и формировалось распределение скорости в нём. На Рисунке 2 изображено симметричное распределение скорости в ортогональном сечении и примеры асимметричных распределений. Цветом на рисунке отображается величина скорости течения в интервале от нуля до 70 cm/s .

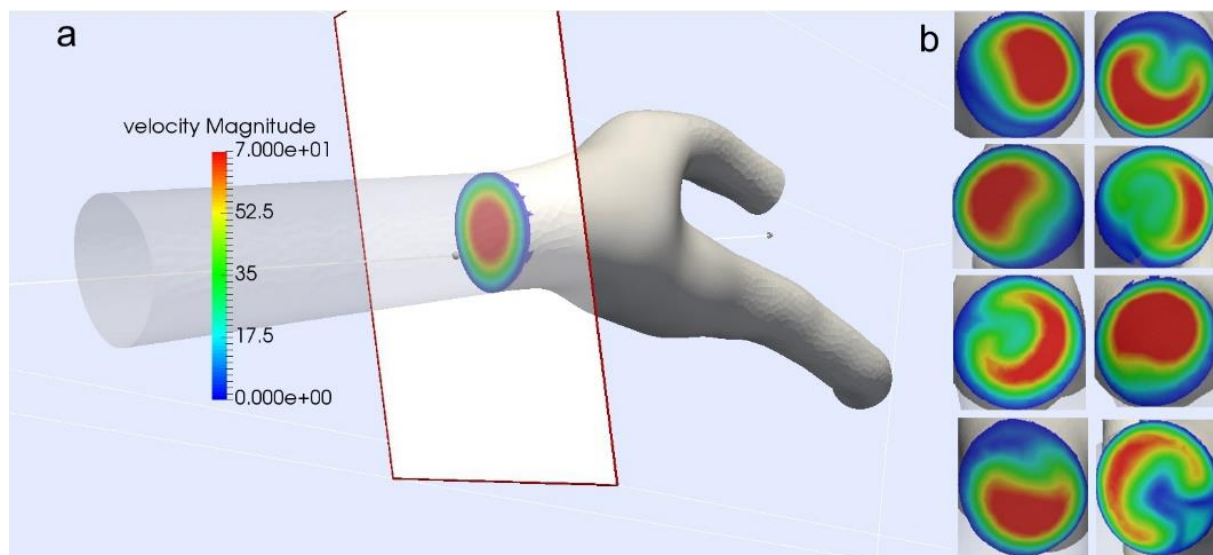


Рис. 2. а) центрально-симметричное течение на входе в бифуркацию, б) примеры асимметричных распределений потока

По результатам визуального анализа построенные модели были разбиты на две группы. К первой группе (17 моделей) отнесены модели, у которых распределение скорости оказалось близким к центрально-симметричному. Ко второй группе отнесены остальные 36 моделей у которых наблюдалась существенная асимметрия потока. Для каждой из 36 моделей второй группы строился альтернативный вариант геометрии в целях формирования на входе в бифуркацию центрально-симметричного распределения скорости. Для этого на исходных моделях строились ортогональные сечения в дистальной части ССА (см. figure 3). Затем нижняя часть сосуда отрезалась и формировалось продолжение в виде цилиндра с образующей, ортогональной плоскости сечения.

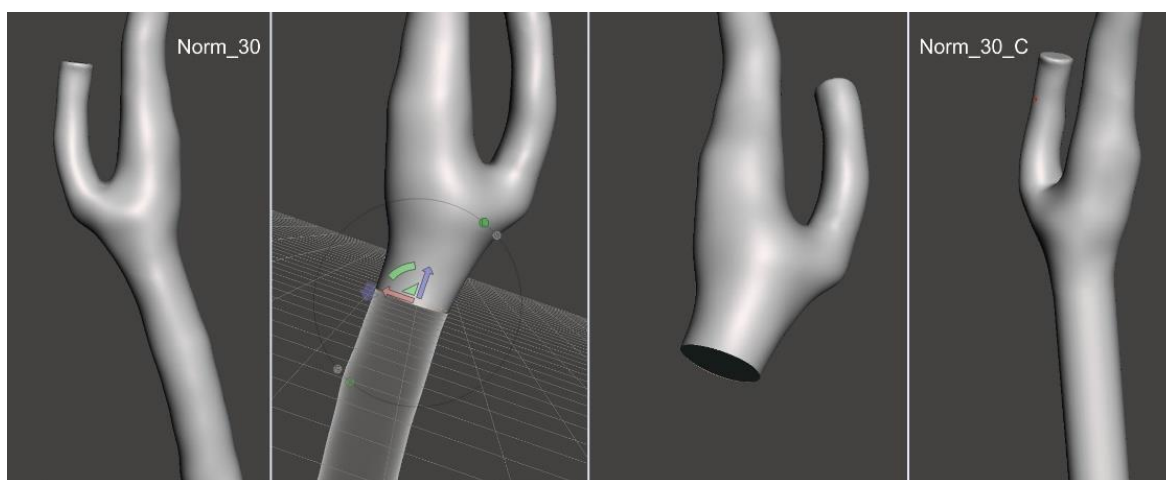


Рис. 3. Построение варианта модели с ОСА в виде цилиндра с прямолинейной образующей

В результате этой процедуры к каждой из исходных моделей «Norm» второй группы добавлялась модель, обозначаемая далее «NormC». У каждой из моделей «NormC» формы бифуркации, а также формы ВСА и НСА (Внутренняя и Наружная Сонные Артерии) идентичны исходной модели, а ОСА является цилиндром с прямолинейной образующей,

ортогонального сечения. В каждой из вновь построенных моделей «NormC» были проведены численные расчёты течения с теми же параметрами, что и для исходных моделей. Как и следовало ожидать, для них поток на входе оказался центрально-симметричным. Таким образом, модели «NormC» совместно с первой группой из 17 моделей, образуют группу из 53 моделей с центрально симметричным распределением скорости на входе в бифуркацию.

На основании проведённых численных расчётов для всех 89 построенных моделей вычислялось значение гемодинамического показателя RRT_int [1], характеризующего риск развития атеросклероза. На Рис. 4a-b изображены критические зоны (см. [1]) на стенках моделей Norm_12, NormC_12. Там же в отдельных вставках изображены распределения скорости в ортогональном сечении на входе в бифуркацию в момент времени «А» (см. Рис. 1). Цветом отображается величина скорости в интервале от нуля до 70 см/с. На figure 4c совместно изображена пара моделей Norm_12, NormC_12.

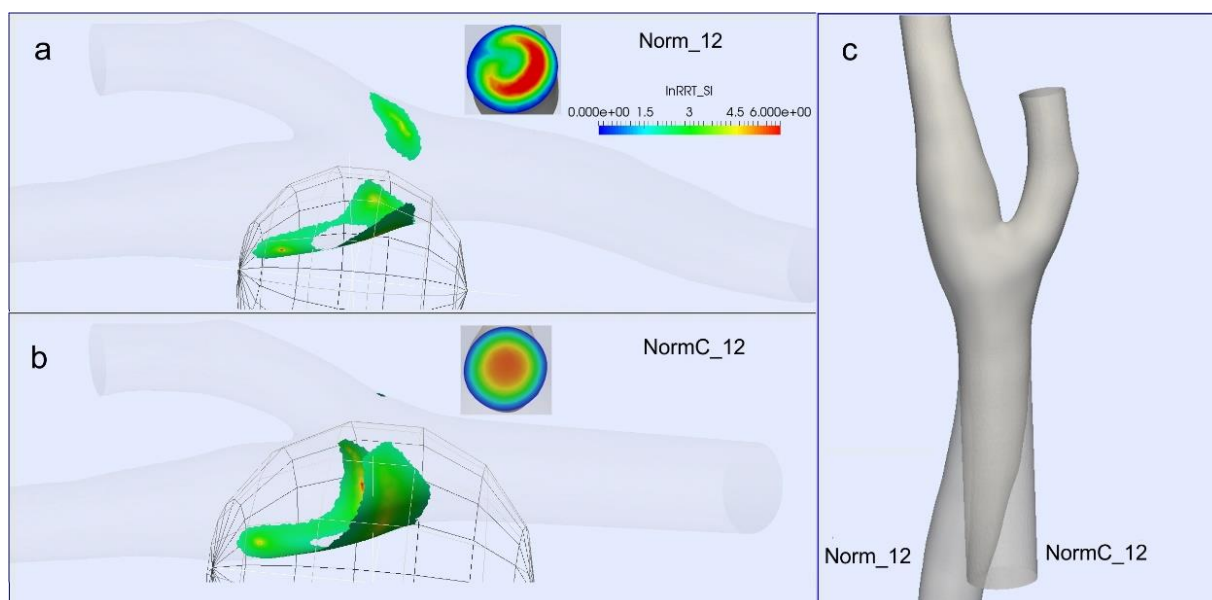


Рис. 4. a), b) критические зоны и распределения скорости на входе в бифуркацию для пары моделей Norm_12, NormC_12, c) модели сосудов Norm_12, NormC_12

Проводился сравнительный анализ значений показателя RRT_int между парами моделей. В анализ по разным причинам не были включены 6 нехарактерных пар моделей:

Полученные результаты:

Сравнение значений показателя RRT_int для пар моделей выборки отражено также на диаграмме рисунка 5. Сортировка данных на диаграмме – в порядке возрастания показателя RRT_int для моделей «Norm».

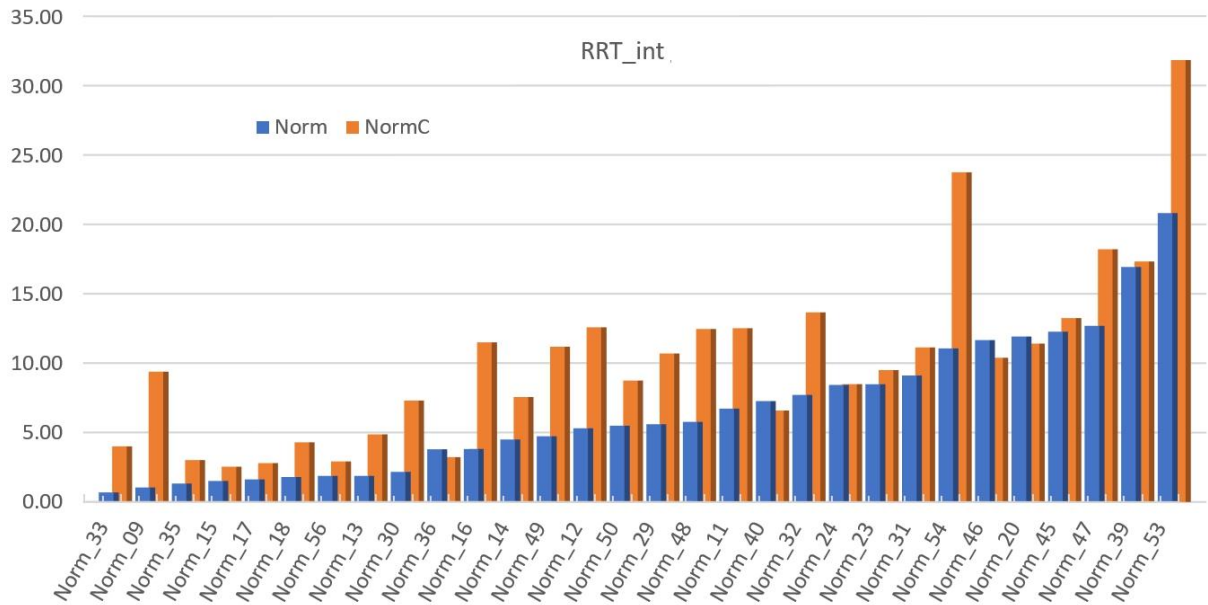


Рис. 5. Значения показателя RRT_int ($Pa^{-1} cm^2$) для пар моделей выборки

Типичное расположение критических зон для моделей с центрально-симметричным потоком на входе в бифуркации, выглядит приблизительно так, как изображено на Рис. 4. При этом размеры зон и их формы варьируется в зависимости от формы бифуркации. Расположение критических зон для исходных моделей с асимметричным потоком на входе, выглядит более разнообразно.

Сравнение значений показателя RRT_int между парами моделей выборки (see table 2 and figure 5) показывает, что в 26 случаях из 30, значение показателя RRT_int для исходных моделей «Norm» не превышает значений для соответствующих моделей «NormC». Для остальных 4 пар моделей наблюдается небольшая разница в противоположную сторону. Вероятно, это связано с тем, что реальное физиологическое отклонение потока на входе в бифуркацию от центрально-симметричного распределения способствует уменьшению рисков факторов атерогенеза по сравнению с центрально-симметричным случаем. Таким образом, на данной выборке в подавляющем большинстве случаев, реально существующая асимметрия потока в моделях «Norm» приводит к лучшим гемодинамическим показателям, по сравнению с соответствующими моделями «NormC». Следовательно, гемодинамические показатели для модели «NormC» можно трактовать как «оценку сверху» для показателей соответствующей модели «Norm». При этом, параметрический анализ геометрической формы и гемодинамики для моделей «NormC» более прост по сравнению с моделями «Norm», так как в этом случае нет необходимости учитывать асимметрию входного потока.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы:

Доступ к кластеру НГУ использовался для численных расчётов в пакете краевых задач для системы уравнений Навье-Стокса. С помощью расчётов, выполненных на кластере было существенно сокращено время численных расчётов, что позволили провести более полное исследование поставленной задачи.

Публикации, содержащие результаты работы:

1. THE INFLUENCE OF INLET FLOW ASYMMETRY ON THE CAROTID BIFURCATION HEMODYNAMICS Borisov V.G., Zakharov Yu.N., Derbilova V.P., Vinogradov R.A., Ivanova N.V., Journal of Physics: Conference Series. 2024. Т. 2701. № 1. С. 012010.
2. MATHEMATICAL MODELING IN ASSESSING THE RISK OF RESTENOSIS AFTER CAROTID ENDARTERECTOMY, Borisov V.G., Zakharov Yu.N., Vinogradov R.A., Derbilova V.P., Ivanova N.V., Biomedical Physics and Engineering Express. 2024. Т. 10. № 3. С. 035011.