

Касательное напряжение на стенке сосудистой бифуркации, обусловленное вихревым течением.

Гольцев М. В., Мансуров В. А.

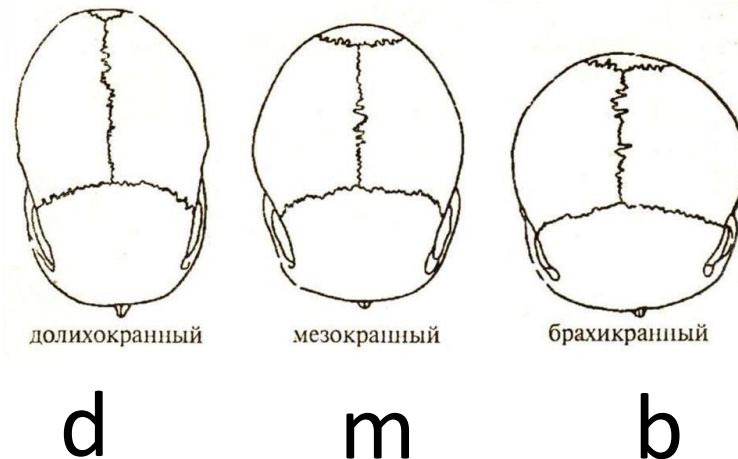
Кафедра медицинской и биологической физики

Актуальность

- Касательные напряжения на стенках сосудистых бифуркаций существенно зависят от характеристик вихревого течения и могут оказывать влияние на развитие патологий сердечно-сосудистой системы, таких как атеросклероз и аневризмы [1].
- Тщательная оценка и моделирование гемодинамических процессов позволяют лучше понимать механизмы развития заболеваний и разрабатывать эффективные методы профилактики и лечения.
- Знание закономерностей анатомии и морфометрических характеристик бифуркации общей сонной артерии в зависимости от конституциональных особенностей черепа позволяет прогнозировать возникновение атеросклеротических бляшек в этих сосудах у людей с разной формой черепа

Цель

- Исследование процессов течения и касательного напряжения на стенке в бифуркации отрезка общей сонной артерии в зависимости от конституциональных особенностей черепа для прогноза возникновения атеросклеротических бляшек с помощью численного моделирования.



*Данные предоставлены
кафедрой Нормальной
анатомии*

Вихрь

- **Вихрь** — это область пространства, внутри которой наблюдается круговое движение среды. Это движение характеризуется наличием угловой скорости и направлено вдоль определенной линии, называемой осью вихря.
- **Вектор скорости течения** – векторная сумма аксиального вектора (вдоль течения) и радиального вектора (круговое движение среды).

Причины и последствия образования вихрей в сосудистых бифуркациях

Причины

При разветвлении сосудов возникает сложная геометрия кровотока, что способствует возникновению локальных завихрений:

- 1. Разделение основного потока: Часть крови движется прямо вперед, часть отклоняется в боковые ветви, создавая зоны торможения и ускорения.
- 2. Геометрическое сужение и расширение просвета: В месте ветвления образуется зона изменения поперечного сечения, способствующая формированию областей повышенного давления и замедленного движения жидкости.
- 3. Изменение направления скорости: Резкое изменение направления потока создает условия для формирования вторичных токов и круговых движений частиц жидкости.

Последствия

Образующиеся вихри приводят к следующим эффектам:

- Повышение неоднородности поля скоростей.
- Увеличение градиентов скорости вблизи стенок сосудов, особенно в зонах, прилегающих к областям разветвлений.
- Возрастание сил трения и нагрузок на эндотелий, что увеличивает риск повреждения клеток внутренней оболочки артерии.

Касательное напряжение на стенке

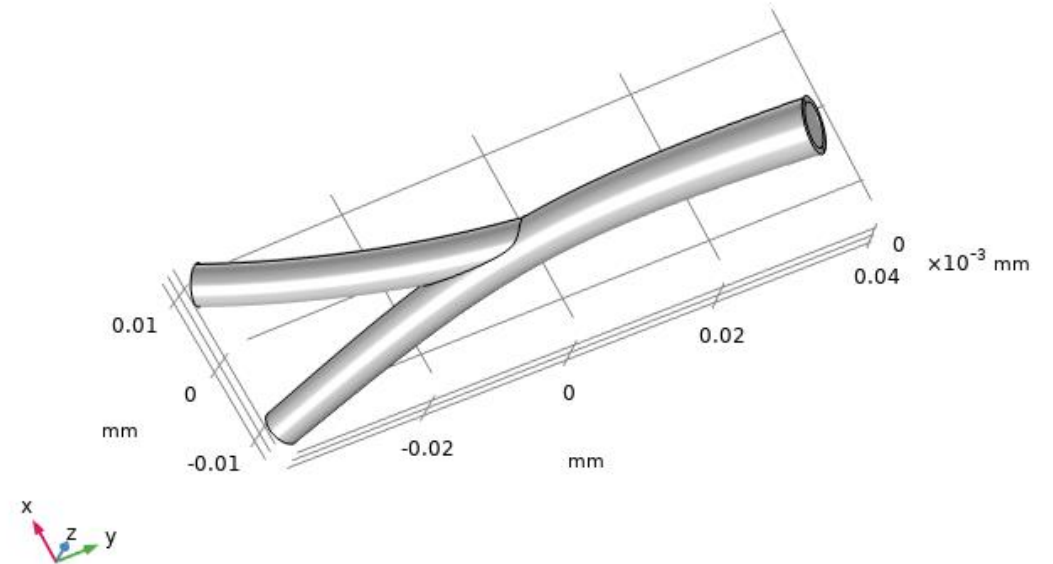
- Взаимосвязь касательного напряжения на сосудистой стенке и вихревого течения в сосудистых бифуркациях играет ключевую роль в понимании процессов, происходящих в кровеносной системе организма.
- Касательное напряжение (τ - вектор) на поверхности сосудистой стенки возникает вследствие взаимодействия движущейся жидкости (крови) с поверхностью сосуда. Оно определяется формулой:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial u}$$

- где μ — динамическая вязкость крови, $\frac{\partial v}{\partial u}$ — градиент скорости вдоль оси u , перпендикулярной направлению движения крови.
- Форма и размер сосудистого просвета оказывают значительное влияние на распределение касательных напряжений. Например, в местах сужения сосудов или вблизи точек бифуркаций, где поток разделяется на две ветви, формируются зоны повышенного касательного напряжения. Это связано с изменением профиля скорости и возникновением турбулентных зон.

Геометрическая модель

- На основе измерений угла бифуркации общей сонной артерии и диаметры общей, внутренней и наружной сонной артерий на 15 половинках препаратов головы и шеи взрослого человека из коллекции кафедры нормальной анатомии. зависимости от формы черепа взрослого человека были построены 3 численных геометрических модели с различными углами
- Для сравнения результатов были выбраны отрезки одинаковой длины, но с разными углами бифуркаций



бифуркация	угол
b	30°
m	21°
d	12°

Численное моделирование

- Интегрирование уравнения движения, описываемое уравнением Навье-Стокса методом конечных элементов

В векторной форме для несжимаемой жидкости уравнения выглядят так:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{v}$$

К этому добавляется уравнение неразрывности (для несжимаемой жидкости)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

- Начальные и граничные условия. Предполагалось, что давление на входе всех моделей равно 50 Па. На стенке сосуда условия прилипания, окончание отрезков сосудов – неподвижны.

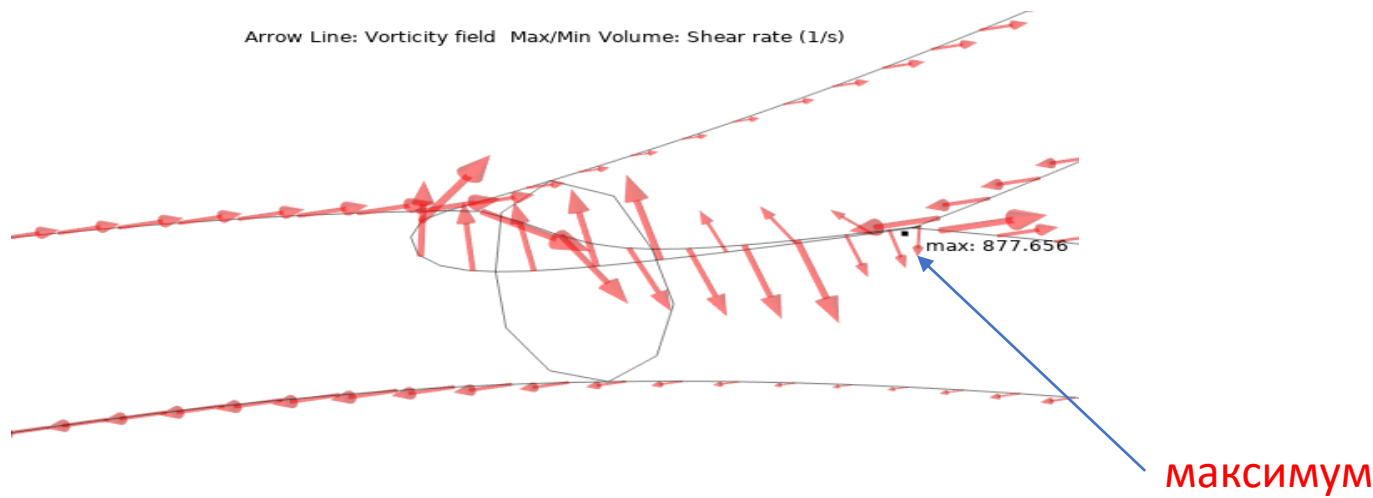
- Особое внимание уделим вихревому вектору

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$$

- \mathbf{v} — вектор скорости жидкости в точке,
- ∇ — оператор набла (градиент),

Результаты моделирования

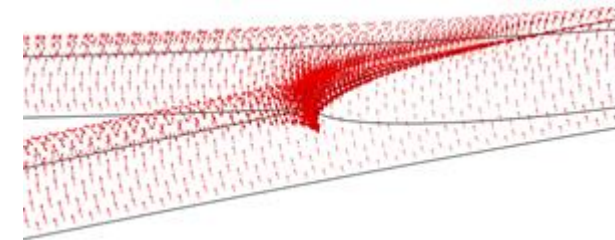
- Линии тока искривляются при прохождении места соединения артерий
- Искривление порождает радиальное течение
- В совокупности эти процессы порождает вихревое течение



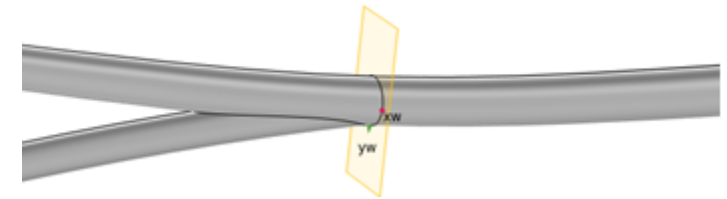
Поле вихревых векторов и максимум градиента скорости



Линии тока в бифуркации



Векторы скорости радиального течения



Секущая плоскость для вычисления средней завихренности

Анализ

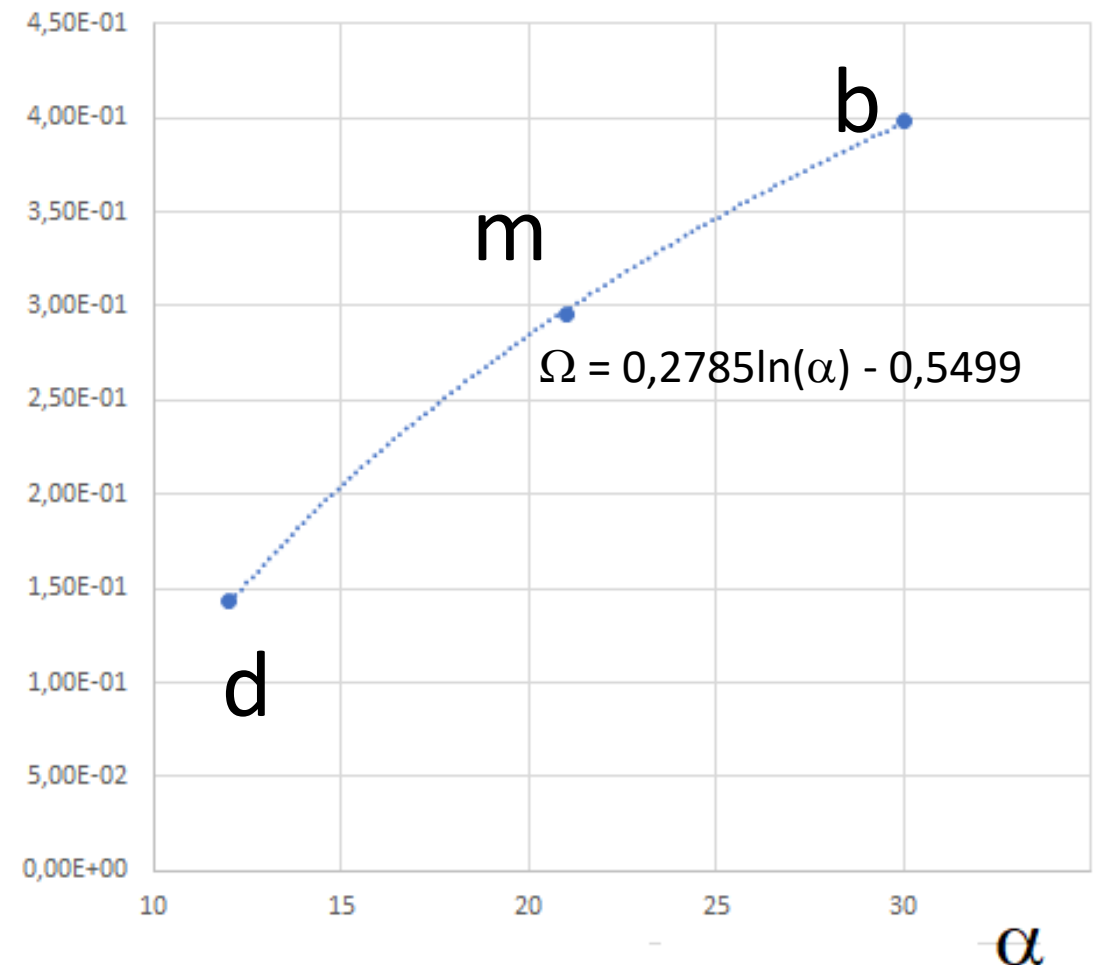
- Для сравнения средней завихренности $\bar{\Omega}$ для данных бифуркаций использовалась интегральная оценка

$$\bar{\Omega} = \iint_S \vec{\omega} dS/S$$

- Здесь S - площадь сечения бифуркации в месте соединения дочерних артерий, ω - вихревой вектор
- Средняя завихренность имеет тенденцию к увеличению при увеличении угла α .

$\omega, 1/s$

зависимость $\bar{\Omega}$ от угла бифуркации



Заключение

- Чем больше угол бифуркации тем больше неоднородность поля скоростей течения, что приводит к увеличению градиентов скорости вблизи стенок сосудов, особенно в зонах, прилегающих к областям разветвлений.
- В результате возрастания сил трения и нагрузок растянут **касательные напряжения** на стенках сосудистых бифуркаций, что увеличивает риск повреждения клеток внутренней оболочки артерии. Это повышает вероятность возникновения атеросклеротических явлений в бифуркации.

Спасибо за внимание