

Междун Конференция "Мед. физиология и
нутрициология-основа здоровья и долголе-
тия", посв. памяти и 80-летию профессора
Утепбергенова А.А.

25 сентября 2015 г. - 26 сентября 2015 г.

УДК 532.55+ 612.133+616-004.6

Моделирование гидравлического сопротивления бифуркации, пораженной возрастными склеротическими изменениями.

В.А., Мансуров, В.Г. Лещенко, Н.И. Инсарова, М.А. Шаламова

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

Резюме. В последние годы внимание уделяется исследованиям морфологии и гемодинамики в области сосудистых разветвлений (бифуркаций), которые в первую очередь поражаются атеросклеротическим процессом. Целью данного исследования – посредством численного математического моделирования установить гемодинамические особенности течения крови в области раздвоения (бифуркации) сосуда, пораженного атеросклерозом в зависимости от толщины бляшки, связанной с возрастом, и размеров основных и дочерних сосудов бифуркации. В результате установлено, что при росте толщины бляшки по стенному закону, перепад давления на этой бифуркации изменяется линейным образом.

UDC 532.55+ 612.133+616-004.6

A hydraulic resistance simulation of a vessel bifurcation affected by age-specific atherosclerosis

V.A. Mansurov, V.G. Leszhenko, N.I. Insarova, M.A. Shalamova

Belorussian state medical university, Minsk, Belarus

Summary. The atherosclerotic cardiovascular diseases growth is cause to be anxious researchers. The study of these diseases is topicality. In this work particular emphasis has been placed on the interdependence of the morphology and the hemodynamic of an arterial bifurcation affected an atherosclerosis process. The feature of blood flow depending on an atherosclerosis plaque thickness and morphology into this bifurcation determined with a mathematical simulation is main aim of this work. It is has been found that the plaque aged growth is an exponential function of age however a bifurcation pressure drop is a linear dependence.

Актуальность настоящего исследования обусловлена ростом числа церебрососудистых заболеваний. В последние годы пристальное внимание уделяется исследованиям морфологии и гемодинамики в области сосудистых разветвлений (бифуркаций), которые в первую очередь поражаются атеросклеротическим процессом. Бифуркация кровеносного сосуда существенно меняет тип движения крови в нем, способствуя образованию здесь вихревого кровотока, выраженность которого зависит от углов разветвления и диаметров артерий

Целью данного исследования – посредством численного математического моделирования установить гемодинамические особенности течения крови в области раздвоения (бифуркации) сосуда, пораженного атеросклерозом (атеросклеротической бляшкой), исследовать напряженно-деформированное состояние атеросклеротической бляшки, вызванное течением, в зависимости от толщины бляшки и размеров основных и дочерних сосудов бифуркации. Задачи исследования: установить параметры кровотока при разной толщине атеросклеротических бляшек в области латеральных углов разветвления сосудов; выявить влияние толщины атеросклеротических бляшек на степень деформирования их потоком крови; установить углы разветвления сосудов соотношения их радиусов, при которых велика вероятность разрыва атеросклеротических бляшек.

Материалы и методы. Морфологически, морфометрически и статистически изучены сосуды виллизиева круга на 10 препаратах головного мозга взрослого человека (аутопсийный материал). На препаратах были установлены углы разветвления сосудов и их диаметры при разных вариантах артериального круга. С помощью полученных данных методом математического моделирования было изучено двумерное поле скоростей течения и распределение давления в области бифуркации (рис. 2). Модельные расчеты проводились с помощью пакета численного моделирования COMSOL 4.0, который решает системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в двух измерениях (рис. 1).

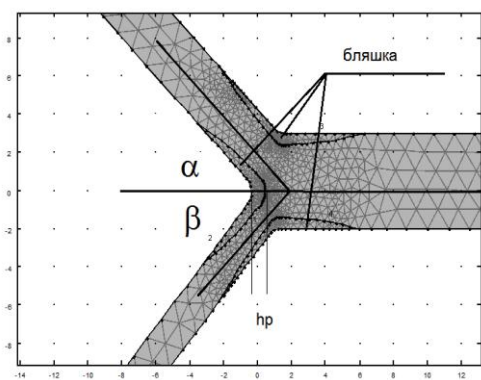


Рисунок 2

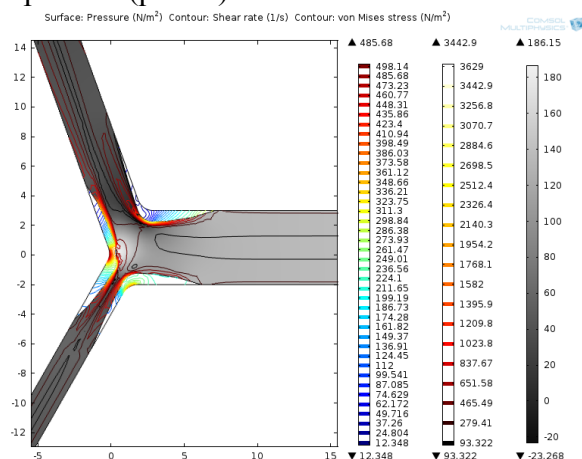


Рис. 2. Результаты расчета

Рис. 1 Геометрия математической модели

Бифуркация кровеносного сосуда существенно меняет тип движения крови в нем, способствуя образованию здесь вихревого кровотока, выраженность которого зависит от углов разветвления и диаметров артерий [1,2]. Это характеризуется дополнительным местным гидравлическим сопротивлением.

Эволюционно, сосудистая система приспособлена транспортировать кровь с минимальными затратами энергии (принцип оптимальности), другими словами местные гидравлические сопротивления должны быть минимальными. Принцип оптимальности течения [3] (при котором кровь течет с минимальными энергетическими потерями и в меньшей степени вызывает меньшее воздействие на стенку сосуда) требует выполнения следующих условий соотношений радиусов и углов отходящих артерий:

$$r_1 = \delta \cdot r_2, \quad (1)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{R^4 + r_1^4(1 - \delta^4)}{2R^2 \cdot r_2^2}, \quad (2)$$

$$\cos(\beta) = \frac{R^4 - r_1^4(1 - \delta^4)}{2\delta \cdot R^2 \cdot r_1^2}, \quad (3)$$

где r – радиус первого дочернего сосуда и второго соответственно; R – радиус материнского сосуда; δ – отношения радиусов дочерних сосудов, α и β углы отклонения дочерних сосудов от оси материнского сосуда.

Появление любого изменения (например, атеросклеротические явления) в области ветвления изменит условия (1-3) этого принципа, т.е. появятся дополнительные потери энергии (местное гидравлическое сопротивление). При уменьшении сопротивления, местный кровоток усиливается, а при его увеличении происходит уменьшение объемной скорости кровотока в органе и возникает ишемия. Следовательно, важно компенсировать изменения сопротивления в сосудах изменением разницы давлений.

В результате используя параметры, с помощью метода численного моделирования была построена геометрическая модель, в которой материнский сосуд разделялся на два дочерних сосуда таким образом, что площадь сечения отходящих сосудов равня-

лась суммарной площади сечения материнского сосуда. При помощи этой модели установлены параметры кровотока при разной толщине атеросклеротических бляшек в области латеральных углов разветвления сосудов; выявлено влияние толщины атеросклеротических бляшек на степень деформирования их потоком крови. При этом следует учитывать тот факт, что с возрастом в области разветвлений сосудов появляются атеросклеротические бляшки, уменьшающие просвет сосудов (рис 3). Это также приводит к изменению кровотока и увеличению местного гидравлического сопротивления (рис. 4).

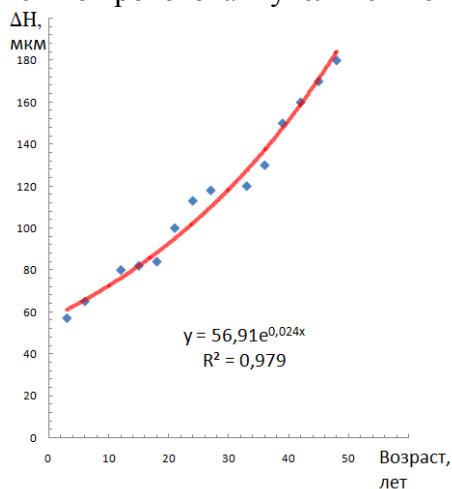


Рисунок 3 толщина интимальных изменений, обусловленных возрастом

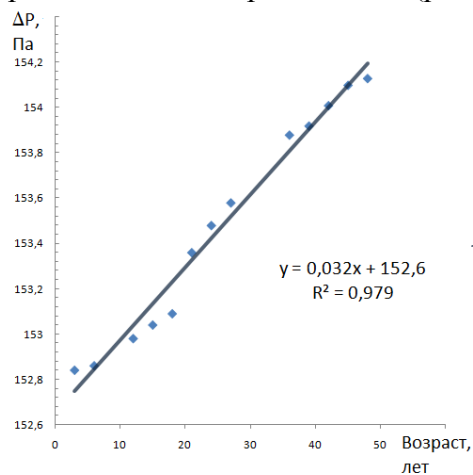


Рисунок 4 изменение перепада давления бифуркации, связанного с изменением толщины интимы

Выявлен угол ветвления сосудов артериального круга большого мозга, при котором кровотоки проходят место стеноза с минимальными энергетическими потерями. Этот угол равен $65-75^\circ$. Такой угол обнаруживается в месте разветвления базилярной артерии. В этом месте вероятность возникновения аневризм небольшая, что соотносится с данными литературы [2]. Установлено, что местное гидравлическое сопротивление при наличии атеросклеротических бляшек в области разветвлений сосудов виллизиева круга зависит от угла бифуркации. Оптимальный угол бифуркации, при котором наблюдается наименьшее местное сопротивление, равен приблизительно 43° . При увеличении толщины бляшек он изменяется в сторону уменьшения. Причем при увеличении толщины бляшки при данном угле местное гидравлическое сопротивление незначительно уменьшается.

Выводы: При приближении к «атеросклеротической бляшке» наблюдается искривления линий тока, т.е. имеется тенденция к образованию вихря. Причем чем больше в просвет сосуда выступает «атеросклеротическая бляшка» и чем больше угол бифуркации сосудов, тем дальше от места бифуркации бьет поток крови. То есть это может приводить к увеличению протяженности атеросклеротических бляшек от центра бифуркации к периферии. Также установлено, что при росте толщины бляшки по стеному закону, перепад давления на этой бифуркации изменяется линейным образом.

Литература

1. Гемодинамика и механическое поведение бифуркации сонной артерии с патологической извитостью / О.Е. Павлова [и др.] // Известия. Саратов. ун-та. – Сер. : Математика. Механика. Информатика. – 2010.– Т. 10., Вып. 2. – С. 66–73
2. Размологова, О.Ю. Бифуркационно-гемодинамические аневризмы сосудов головного мозга как вариант конституциональной патологии / О.Ю. Размологова // Поленовские чтения: материалы Всерос. конф. – СПб., 2006. –С. 151–152.
3. Р. Розен Принцип оптимальности в биологии /пер. с англ. под ред. В.М. Волосова. М: Мир, 1969. 215 с.