

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ КРУПНЫХ СОСУДОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Балюк Д. А.

Давыдов М. В. – к.т.н., доцент

Одной из самых актуальных проблем научной медицины и практического здравоохранения являются болезни системы кровообращения. На данный момент среди причин смертности инсульт головного мозга занимает второе место после инфаркта миокарда. Причинами нарушения мозгового кровообращения ишемического характера являются атеросклероз сонных артерий и их патологическая извитость (рисунок 1) [1].

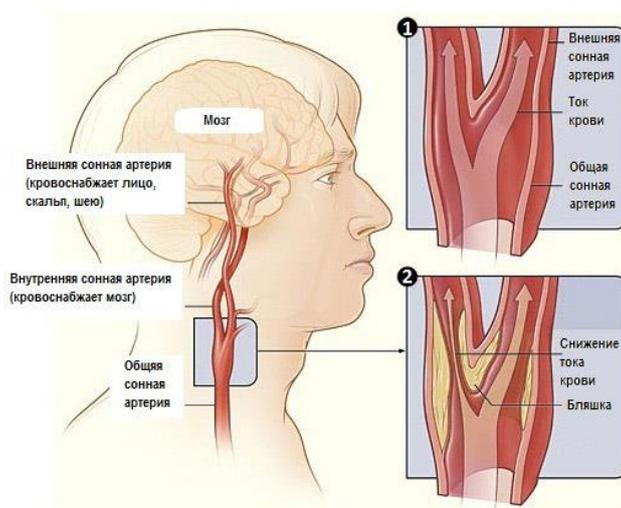


Рис. 1 – Атеросклероз сонной артерии

Для восстановления кровообращения в пораженных сосудах помимо медикаментозного лечения нередко проводятся реконструктивные операции. В настоящее время существует множество методик хирургической коррекции данной патологии. Первыми хирургическую коррекцию патологической коррекции провели в 1959 году Quattelbaum, Upton and Neville [2].

Часто невозможно объективно оценить, какой тип оперативного вмешательства будет оптимальным для конкретного пациента. В связи с этим вопросы моделирования гемодинамики крупных кровеносных сосудов приобретают в последнее время все большую актуальность. Это связано с необходимостью прогнозирования возможного поведения сосуда в ближайшие и отдаленные периоды после оперативного вмешательства.

В работе «Моделирование влияния геометрии анастомоза на кровоток во внутренней сонной артерии», целью исследования являлось изучение влияния положения анастомоза после операции ЭКЭАЭ на характер и распределение кровотоков во всех СА и сравнение этого влияния.

Модель, изначально созданная в системе SolidWorks, была модифицирована в системах Компас3D и AutoCAD. Исследования проводились с применением гидродинамических расчетов. Кровь предполагалась однородной, несжимаемой ньютоновской жидкостью. Гидродинамические расчеты производились с помощью системы инженерного анализа CFD Flex разработки AutoDesk, реализующей метод конечных элементов применительно к решению нестационарных задач гидродинамики и теплопроводности [3].

Рассмотрим работу «Моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов с учетом взаимодействия потока крови со стенкой», где в рамках исследования взаимодействия стенки и крови была рассмотрена модель перистальтического сокращения стенок сосуда. Следует отметить, что за ускорение потока отвечает только продольная составляющая силы, действующей на стенку, поэтому при расчете моделей учитывалась только она.

Моделирование проводилось в конечно-элементном программном пакете Comsol Multiphysics 3.5. Эксперимент проходил в несколько этапов.

На первом этапе была построена двумерная модель сужающегося сосуда со следующими параметрами: радиус входного сечения $R=10$ мм, радиус на выходе $r=9$ мм, длина $L=100$ мм, толщина стенки $h=2$ мм.

Далее модель была разбита конечно-элементной сеткой. После этого было проведено моделирование кровотока без учета действия на кровь стенки. Для того чтобы учесть влияние сокращений сосуда на поток, на границе между стенкой и кровью для крови задавалась дополнительная составляющая скорости (рисунок 2) [4].

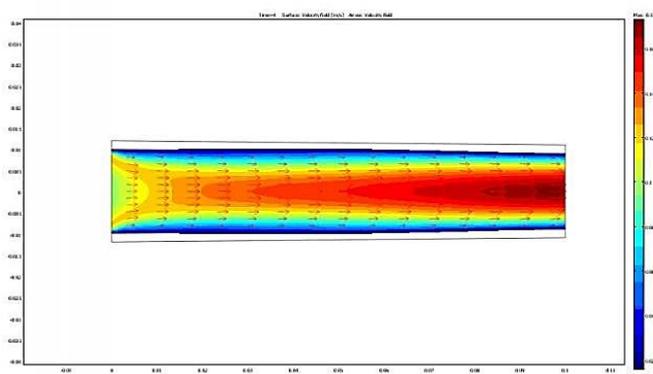


Рис. 2 – Распределение скорости в просвете сосуда

Рассмотрим работу «Численное исследование влияния патологической извитости артерии на кровоток» в которой было проведено исследование с целью выявить изменения в гемодинамической картине и напряженно-деформированном состоянии СА при учете нелинейных характеристик материала стенки сосуда. В качестве примера приводятся результаты для модели сонной артерии в норме и с патологическим перегибом внутренней сонной артерии.

Для этого в специализированном программном пакете SolidWorks на основе серии послойных изображений, полученных при КТ-ангиографии, были восстановлены трехмерные модели геометрии сонной артерии в норме и со всеми видами патологических извитостей.

Затем, построенные модели сосудов были импортированы в конечно-элементный пакет ANSYS. В нем была решена трехмерная задача о течении крови в артерии с податливыми стенками [5].

При моделировании течение крови в системе кровообращения в общем случае описывается трехмерными нестационарными уравнениями для вязкой в общем случае неньютоновской жидкости совместно с уравнениями динамики эластичных оболочек сосудов [6]. Это связано с необходимостью учета реальных свойств крови, пространственной геометрии сосудов, влияния вязкости, взаимного влияния гидродинамики сосудов и их деформации. Кровь обычно рассматривается как однородная ньютоновская среда. Задача моделирования течения крови в значительной мере облегчается тем обстоятельством, что практически во всех отделах кровеносной системы наблюдается ламинарный режим течения. Таким образом, одной из основных проблем построения вычислительного алгоритма является необходимость решения уравнений Навье-Стокса в областях с подвижными криволинейными границами. Этому вопросу посвящена, в частности, работа [7].

В настоящее время вопросу гемодинамики, несмотря на клиническую важность, уделено еще мало внимания. В большой степени это обусловлено тем, что модели создаваемые ранее были достаточно условными и не обладали достаточной точностью. Следовательно, важно создание биомеханических моделей, геометрия которых наиболее приближена к реальным и учитывающих механические свойства материала сосудов и показатели кровотока конкретных людей.

Список использованных источников:

1. Извитости сосудов позвоночника, шеи и мозга: причины, симптомы, лечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sosudinfo.ru/golova-i-mozg/izvitost-sosudov/>.
2. Quattlebaum, J. K. Stroke associated with elongation and kinking of the internal carotid artery: report of three cases treated by segmental resection of the carotid artery / J. K. Quattlebaum, E. T. Upson, R. L. Neville // *Ann Surg.* – 1959. – V. 150, №10. – P. 824–832.
3. Ротков, С.И. Моделирование влияния геометрии анастомоза на кровоток во внутренней сонной артерии / С. И. Ротков, Е. В. Попов, А. С. Мухин и др. // *Современные проблемы науки и образования.* – 2016. – № 2.
4. Гуляев, Ю. П. Моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов с учетом взаимодействия потока крови со стенкой / Ю. П. Гуляев, А. В. Доль // III сессия Научного совета РАН по механике деформируемого твердого тела / отв. ред. Л. Ю. Коссовича. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 2009. – 13 с.
5. Лужа, Д. Рентгеновская анатомия сосудистой системы / Д. Лужа. – Будапешт : Издательство акад. наук Венгрии, 1973, – 380 с.
6. Каро К. Механика кровообращения / К. Каро, Т. Педли, Р. Штотер. // М.: Мир, – 1981, 624с.
7. Винников В.В., Ревизников Д.Л. Применение декартовых сеток для решения уравнений Навье-Стокса в областях с криволинейной границей / В.В. Винников, Д.Л. Ревизников. // *Математическое моделирование,* – 2005, т. 17, №8, с.15–30.