

УДК 612.13 + 004.921

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ ОТРЕЗКА СОСУДА

Гольцев М. В., Мансуров В. А., Рагунович Л. Д.

*Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Реферат. В работе рассматривается визуализация гемодинамических процессов в виртуальной численной модели гемодинамики, изучение которой представляет значительную трудность при подготовке медицинских специалистов, а также применения полученных моделей в целях прогноза динамики медико-биологических процессов и в учебном процессе при подготовке специалистов в области медицины. В данных моделях учитывается такой важный параметр гемодинамики, связанный с атеросклеротическими явлениями, как напряжение сдвига на стенке сосуда, существенно зависящее от геометрии сосудистого русла.

Ключевые слова: гемодинамика, численное моделирование, напряжение сдвига на стенке сосуда, атеросклероз.

Введение. В настоящее время одним из важнейших требований современной медицины является высокий уровень квалификации персонала медицинских организаций. Владение этими специалистами необходимыми знаниями, умениями и навыками, формирующими профессиональные компетенции, позволяют им качественно оказывать медицинские услуги населению, выполнять свои должностные обязанности. Уровень подготовки данных специалистов во многом определяется и зависит от наличия доступных и эффективных систем, форм и средств обучения, реализующих максимально приближенные к реальности примеры медицинских процессов и явлений.

Постижение гемодинамических процессов, определяющих движения крови в сосудистом русле, представляет значительную трудность при подготовке медицинских специалистов, поскольку эти процессы зависят от многих факторов, которые находятся в неразрывной связи, а именно: реологические свойства крови; механика сердечного сокращения; упругие свойства стенок различных сегментов сосудов; артериальное и венозное давление; механизмы управления гемодинамикой, ее адаптивной регуляцией.

Цель работы – создание реалистичных численных моделей гемодинамики, которые будут служить основой для эффективного, реалистичного взаимодействия пользователей с объектами и средой моделирования на основе программно-аппаратных решений. В этих моделях

необходимо учитывать важный показатель гемодинамики – напряжение сдвига на стенке сосуда, которое существенно зависит от геометрии сосудистого русла и связано с атеросклеротическими явлениями. Применить полученные модели возможно в целях прогноза динамики медико-биологических процессов и в учебном процессе подготовки специалистов в области медицины. Для визуализации гемодинамических процессов планировалось разработать виртуальные объекты, соответствующие реальным объектам.

Материалы и методы. *Виртуальная реальность.* Для достижения поставленной цели созданы и обоснованы предпосылки разработки численных медико-биологических моделей для использования их в системах виртуальной реальности, которая в настоящее время все больше и больше используется для решения практических задач медицины, а также на этапах подготовки медицинских специалистов. Объекты виртуальной реальности обычно ведут себя близко к поведению аналогичных объектов материальной реальности. Пользователь может воздействовать на эти объекты в согласии с реальными законами физики. Виртуальная реальность широко используется в медицинских целях. Она позволяет врачам-специалистам получать трехмерную информацию, что значительно повышает уровень качества оказания медицинских услуг. Основой для создания объектов виртуальной реальности является численное моделирование изучаемого объекта и процессов, происходящих в нем.

Виртуальная модель отрезка сосуда. Геометрия модели соединения передней соединительной артерией средней мозговой артерии и передней мозговой артерий состоит из трех соединяющихся каналов и различного сечения, которые переходят в один канал. Эти каналы ограничены упругой стенкой. В концах соединяющихся каналов под действием давления движется поток жидкости, в конце одиночного канала предполагается, что давление равно нулю. На стенках канала создается механическое напряжение, возникающее в результате вязкого сопротивления и давления жидкости (рисунок 1).

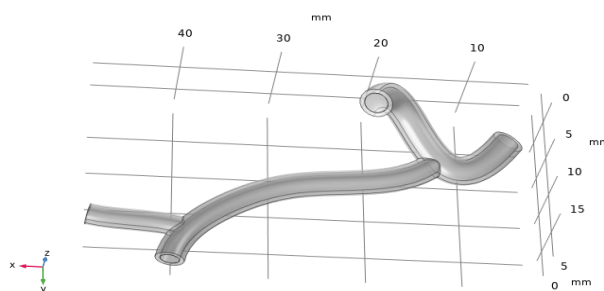


Рисунок 1 – Используемая геометрическая модель

Для расчетов использованы значения модуля упругости Юнга, вязкости крови, приведенные в научной литературе. В результате численного моделирования создается виртуальный объект с известной геометрией и заданными свойствами, который является аналогом реального объекта. Для обсуждаемого объекта свойствами являлись: механика – модуль упругости сосудистой стенки E , коэффициент Пуассона ν и реология – свойства текущей среды, описанные моделью Кросса (μ_0 – начальная вязкость, μ_∞ – конечная вязкость, n – индекс течения) [1].

Численное моделирование. Основным методом моделирования взаимодействия течения с упругой стенкой сосуда был метод конечно-разностного интегрирования уравнения Навье-Стокса и условий механического равновесия сосудистой стенки для связанных задач расчета течения вязкой жидкости и деформации упругой среды. Поток жидкости может деформировать стенку, поэтому для численного моделирования профиля течения в непрерывно деформируемой геометрии необходимо использовать метод Лагранжа-Эйлера (ALE – arbitrary Lagrange-Euler). Метод ALE использует динамику деформирующей геометрии и движущихся границ с помощью движущейся сетки (moving mesh). Стенка канала является деформируемым материалом, который может упруго деформироваться под воздействием

нагрузки. Следовательно, поток жидкости также следует новому пути, поэтому течение в исходной геометрии будет отличаться от течения деформируемой геометрии [2].

Трансформация результатов численного моделирования для анализа и визуализации. Сценарии трансформации скалярных и векторных полей результатов исследований, проведенных на основе медико-биологических моделей, представляют собой важный инструмент для анализа и визуализации полученных данных. При использовании таких сценариев происходит переход от исходного пространства исследования к новому представлению данных в виде виртуального объекта с неструктурируемой сеткой. В результате получается новый набор данных, содержащий информацию о точках, их координатах, свойствах и их связях.

Далее следует этап трансформации облака точек в форматы, удобные для визуализации. Это включает в себя изменение структуры данных и представление информации в таком виде, чтобы она могла быть эффективно отображена на экране или других устройствах вывода. На этом этапе также проводится фильтрация и обработка данных, чтобы убрать шумы или сглаживать значения. Это позволяет более наглядно представить результаты и получить новые инсайты из существующих медико-биологических моделей.

Неструктурируемая сетка. Интерполяция Делоне. Интерполяция Делоне основана на понятии триангуляции Делоне – это деление плоскости на непересекающиеся треугольники, которые полностью охватывают заданный набор точек. Принцип интерполяции Делоне заключается в том, что для заданных исходных данных, например, значений функции в некоторых точках, находится такая функция, которая в этих точках совпадает с исходной и достаточно гладкая на остальной плоскости. Метод достигается путем аппроксимации исходных данных с использованием треугольной сетки, создаваемой триангуляцией Делоне [3].

Одним из преимуществ интерполяции Делоне является ее высокая точность и эффективность. Однако следует отметить, что интерполяция Делоне также имеет некоторые ограничения и особенности. В некоторых случаях может возникать проблема прокола, когда создание треугольной сетки и поиск соседних точек становятся трудозатратными задачами.

Влияние патологий на гемодинамику в виртуальной модели. Гипертензия – сложный патофизиологический процесс. Особенно развитые формы гипертензии обычно связаны с

сосудистыми повреждениями, и эти повреждения служат причиной изменения гемореологического статуса. Ухудшение гемореологических показателей приводит к изменению гемодинамики по причине увеличения давления, связанного с увеличением периферического кровообращения. *Диабет* – еще одно важное заболевание, которое сопровождается общими циркуляторными нарушениями, увеличением вязкости крови и плазмы, нарушениями агрегации эритроцитов и изменением эритроцитарной деформируемости [4, 5]. Наиболее сильные изменения общего гомеостаза происходят при *сепсисе*. При этом обнаруживаются значительные изменения гемореологических показателей при этом заболевании. И клинические и лабораторные исследования указывают, что сепсис характеризуется значительным ухудшением деформируемости эритроцитов и усилением агрегативной способности [6]. Такие изменения в эритроцитах могут оказать значительное влияние на сосудистые проблемы, встречающиеся при сепсисе. Также необходимо отметить *гематологические заболевания*, в которых гемореологические изменения могут служить причиной проблем тканевой перфузии. Серповидная анемия является наиболее ярким примером, для которого клинические проявления могут быть непосредственно отнесены к сильным реологическим изменениям в эритроцитах и, следовательно, гемодинамическим изменениям.

Не только патологические процессы, но и *физиологические условия* могут быть также охарактеризованы изменением гемореологических показателей. Интенсивные утомительные физические упражнения оказывают значительное влияние на гемореологические параметры [7].

Визуализация наиболее значимых морфологических участков. В рассматриваемом отрезке сосудов можно выделить две представляющих интерес бифуркации (рисунок 2).

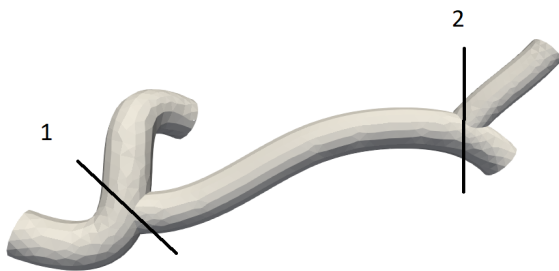


Рисунок 2 – Участки бифуркации в использованной геометрической модели

Для сечений этих компонентов выполнена визуализация скоростей течения, градиента скорости и напряжения, возникающее в стенке этих сосудов. Рассматривается градиент скорости (формула 1) в двух бифуркациях данного отрезка сосудов. Градиент скорости – важнейший параметр, характеризующий условия течения, определяющих гемодинамику в этом отрезке и является одной из главных причин атеросклероза [1]:

$$\dot{\gamma} = \Delta v / \Delta x, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости; v – вектор скорости течения в данной точке; x – поперечная координата.

В классическом представлении напряжение сдвига (shear stress) – это сила, прикладываемая к верхнему слою текущей жидкости, вызывающая смещение нижележащих слоев относительно друг друга в направлении прикладываемой силы. При этом разность в скорости движения слоев по отношению к глубине их залегания определяется градиентом скорости (формула 2):

$$\tau_w = \eta \cdot \left. \frac{\Delta v}{\Delta x} \right|_{x=r_w}, \quad (2)$$

где τ_w – напряжение сдвига на стенке сосуда; η – вязкость при заданном градиенте скорости; v – вектор скорости течения в данной точке; x – поперечная координата; r_w – размер сосуда.

Для всех рассматриваемых бифуркаций в месте соединения отрезков бифуркации возникает выпуклая деформация сосудистой стенки, что является причиной изменения гемодинамики. Для анализа результатов использовалось максимальное напряжение фон Мизеса. Максимальное напряжение по Мизесу основывается на теории Мизес–Хенки (Mises–Hencky), также известной как теория энергии формоизменения (формула 3).

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{2}}, \quad (3)$$

где σ_{1-3} – главные напряжения тензора напряжений.

Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению.

Инструменты визуализации результатов численного моделирования. Большую пользу для

визуализации может оказать программный пакет PyVista (ранее VTK) – это адаптируемый вспомогательный модуль и API высокого уровня для набора инструментов визуализации (VTK).

Этот пакет имеет оптимизированный интерфейс для VTK, который обеспечивает анализ сетки на основе Python и построение трехмерных фигур. PyVista используется для выполнения 3D-интерполяции с изменяемым параметром альфа, который управляет расстоянием между двумя смежными точками.

В данной работе применялся ParaView – открытый графический кроссплатформенный пакет для интерактивной визуализации в исследовательских целях, разрабатываемый Национальной Лабораторией Сандиа, компанией Kitware и Национальной Лабораторией Лос-

Аламоса. Пакет ParaView предоставляет пользователю возможности интерактивной визуализации и исследования больших массивов данных для качественного и количественного анализа.

Результаты и их обсуждение. Методом конечно-разностного численного моделирования были произведены расчеты зависимости абсолютной деформации стенки сосуда для 3D моделей соединения передней соединительной артерией средней мозговой артерии и передней мозговой артерий (рисунки 3–5).

На рисунках 6–11 приведены скорости течения градиента скорости и напряжения фон Мизеса для бифуркаций, представленных на рисунке 2.

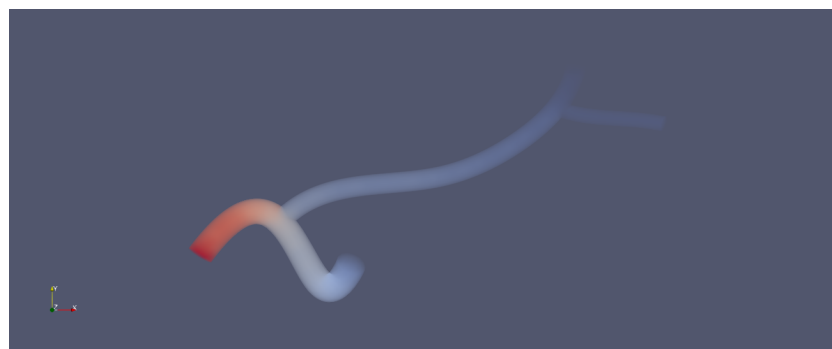


Рисунок 3 – Распределение давления в использованной геометрической модели



Рисунок 4 – Градиент скорости на стенках использованной геометрической модели

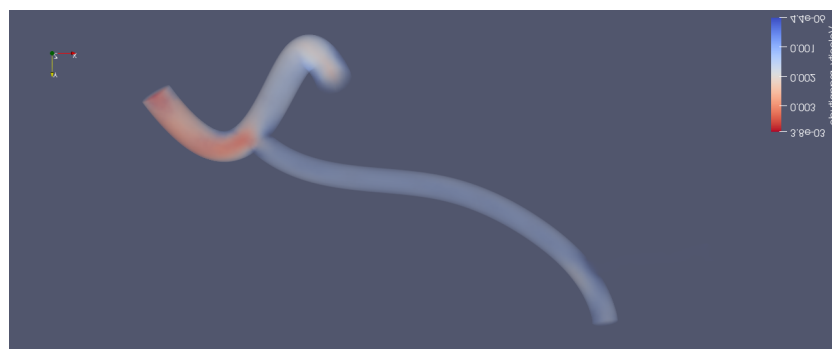


Рисунок 5 – Скорость течения в использованной геометрической модели

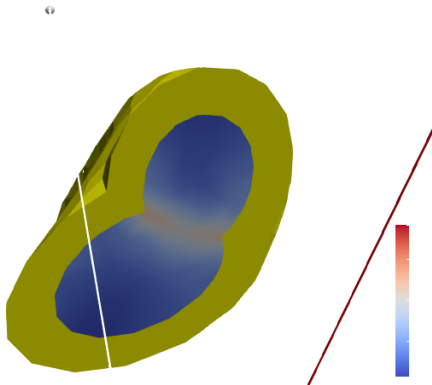


Рисунок 6 – Градиент скорости течения для бифуркации 1

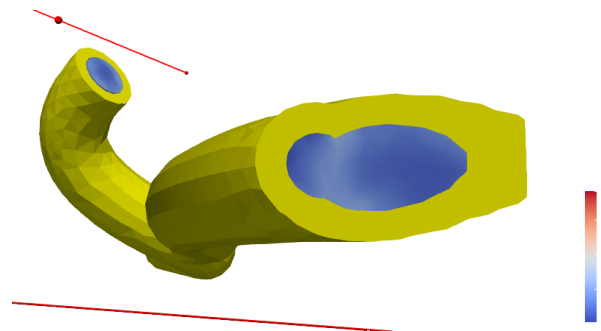


Рисунок 9 – Градиент скорости течения для бифуркации 2

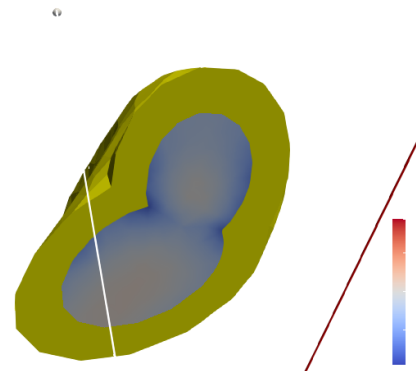


Рисунок 7 – Скорость течения для бифуркации 1

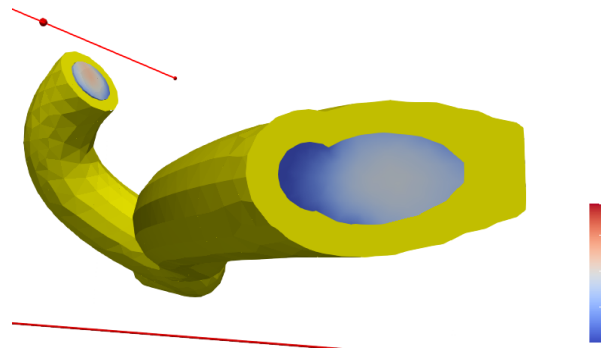


Рисунок 10 – Скорость течения для бифуркации 2

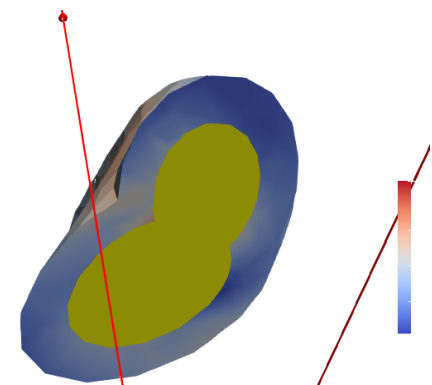


Рисунок 8 – Напряжение фон Мизеса для бифуркации 1

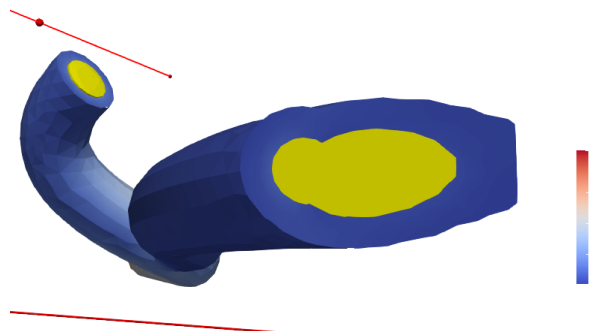


Рисунок 11 – Напряжение фон Мизеса для бифуркации 2

Заключение. На примере моделирования гемодинамики отрезка сосуда разработаны варианты визуализации при изменении механических свойств объектов модуля упругости сосудистой стенки.

В работе применялся ParaView – открытый графический кроссплатформенный пакет.

В работе созданы и обоснованы предпосылки создания численных медико-биологических моделей для использования их в системах виртуальной реальности, которые в настоящее время все больше и больше используются для решения практических задач медицины, а также на этапах подготовки медицинских специалистов.

Список цитированных источников

1. Handbook of hemorheology and hemodynamics: Biomedical and Health Research / O. K. Baskurt [et al.]. – Berlin. – IOS Press, 2007. – Vol. 69. – 455 p.
2. Bungartz, J. Fluid-Structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimization : Lecture Notes in Computational Science and Engineering / ed. by H. J. Bungartz, M. Schäfer. – London: Springer, 2006. – Vol. 53. – 388 p.
3. Скворцов, А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
4. McMillan, D. E. Hemorheological studies in the diabetes control and complications trial / D. E. McMillan // Clin. Hemoreol. – 1993. – Vol. 13 – P. 147–154.
5. Гемореологические профили у пациентов с артериальной гипертензией в сочетании с синдромом гипервязкости / А. В. Муравьев [и др.] // Физиология человека. – 1998. – Т. 24, № 4. – С. 113–117.
6. Baßkurt, O. K. Red blood cell aggregation in experimental sepsis / O. K., Baßkurt, A. Temiz, H. J. Meiselman // Clin. Med. – 1997. – Vol. 130 – P. 183–190.
7. Effects of swimming exercise on red blood cell rheology in trained and untrained rats / O. Yalcin [et al.] // J. Appl. Physiol. – 2000. – Vol. 88 – P. 2074–2080.

Visualization of the vascular section hemodynamics numerical modeling

Goltsev M. V., Mansurov V. A., Ragunovich L. D.

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

Visualization of hemodynamic processes in virtual hemodynamics numerical models has been discussed as well as the application of the models developed for predicting the dynamics of the processes in medicine and biology and modelling for students. The learning of this topic experiences a lot of difficulties. These models take into account such an important hemodynamic parameter associated with atherosclerotic phenomena as shear stress on the blood vessel wall, which significantly depends on the geometry of the vascular bed.

Keywords: hemodynamic, numerical modeling, atherosclerosis, vascular sheerstress.

Поступила 05.06.2024