

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ ОТРЕЗКА СОСУДА ВИЛЛИЗИЕГО КРУГА

**Гольцев М.В., Лубневская Г.Г., Кляузо С.А.,
Мансуров В.А., Рагунович Л.Д.**

Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»,
Минск, Республика Беларусь
e-mail: mansurov@tut.by

Аннотация: в работе рассматриваются реалистичные численные модели гемодинамики для эффективного взаимодействия пользователей с объектами и средой моделирования на основе программно-аппаратных решений. В данных моделях учитывается важный параметр гемодинамики, связанный с атеросклеротическими явлениями— напряжение сдвига на стенке сосуда, существенно зависящее от геометрии сосудистого русла.

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

VISUALIZATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF HEMODYNAMICS OF A VESHICAL SEGMENT OF THE CIRCLE OF WILLIS

**Goltsev M.V., Lubnevskaya G.G., Kliauzo A.S.,
Mansurov V.A., Ragunovich L.D.**

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic Belarus
e-mail: mansurov@tut.by

Abstract. The paper discusses realistic numerical models of hemodynamics for effective interaction of users with objects and the modeling environment based on software and hardware solutions. In these models, take into account an important indicator of hemodynamics – shear stress on the vessel wall, which significantly depends on the geometry of the vascular bed and is associated with atherosclerotic phenomena.

Keywords: hemodynamics, numerical modeling, shear stress on the vessel wall, atherosclerosis.

Актуальность. В настоящее время одним из важнейших требований современной медицины и фармации является высокий уровень квалификации

персонала медицинских и фармацевтических организаций. Владение этими специалистами необходимыми знаниями, умениями и навыками, формирующими профессиональные компетенции, позволяют им качественно оказывать медицинские и фармацевтические 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 приближенных к реальности примерах медицинских процессов и явлений [1].

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 – это: реологические свойства крови; механика сердечного сокращения; упругие свойства стенок различных сегментов сосудов; артериальное и венозное давление; механизмы управления гемодинамикой, её адаптивной регуляцией.

Целью данной работы является 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 в целях прогноза динамики медико-биологических процессов и в учебном процессе подготовки специалистов в области медицины. Для визуализации гемодинамических процессов разработать виртуальные объекты, соответствующие реальным объектам.

Материалы и методы. 1. *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 получать трехмерную информацию, что значительно повышает уровень качества работы медработников. Основой для создания объектов виртуальной реальности является численное моделирование изучаемого объекта и процессов происходящих в нем [2].

2. *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.

Создание модели объекта. 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 (рис. 1).

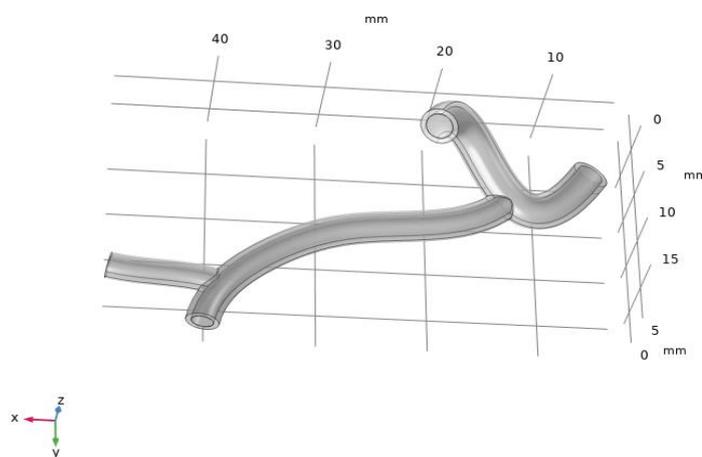


Рис 1. Геометрическая модель

Свойства. 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) [3, 4].

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 кросс-платформенный 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 [5].

Результаты. 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. В рассматриваемом отрезке сосудов виллизевого круга можно выделить две значимые бифуркации соединения передней соединительной артерией, средней мозговой артерии и передней мозговой артерий. Для сечений этих компонентов выполнена визуализации скоростей течения, градиента скорости и напряжения, возникающее в стенке этих сосудов (рис. 2 - 4). Градиент скорости важнейший параметр, характеризующий условия течения, определяющих гемодинамику в этом отрезке. В классическом представлении напряжение сдвига (*sheare stress*) — это сила, прикладываемая к верхнему слою текущей жидкости, вызывающая смещение нижележащих слоев относительно друг друга в направлении прикладываемой силы.



Рис. 2. Распределение давления



Рис. 3. Градиент скорости на стенке

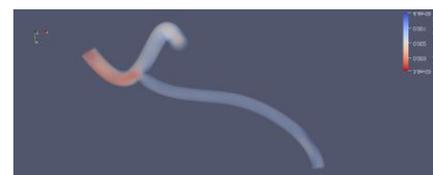


Рис. 4. Скорость течения.

Заключение. На примере моделирования гемодинамики отрезка виллизиева круга разработаны варианты визуализации при изменении механических свойств объектов модуля упругости сосудистой стенки E , коэффициента Пуассона ν , реологических свойств текущей среды, которые соответствуют модели Кросса (μ_0 - начальная вязкость, μ_∞ - конечная вязкость, n - индекс течения). В данной работе созданы и обоснованы предпосылки создания 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

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Подпрограмма 11.3 Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии — Конвергенция 2025. Задание 3.04.2 — Построение и верификация компьютерных моделей медико-биологических объектов и процессов, исследование их поведения в спроектированных средах на базе технологий виртуальной и дополненной реальности.»

Список литературы

1. Гурьянов, П. С. Внедрение мультимедийных технологий в систему дистанционного обучения фармацевтических работников / П.С. Гурьянов, Т.В. Чикин, Т.А. Сычева // Вестник Пермской государственной фармацевтической академии. – 2007. – № 3. – С. 286-290.
2. A heterogeneous approach for modelling blood flow in an arterial segment / Di. A. Carlo, P. Nardinocchi, G. Pontrelli, L. Teresi // Simulation in Biomedicine. – 2003. – Vol. 5. – P. 69–78.
3. Каро, К. Механика кровообращения / К. Каро, Т. Педли, Р. Штотер. – Москва : Мир, 1981. – 624 с.
4. Baskurt, O. K. Handbook of hemorheology and hemodynamics. – 2007. – 455 p.
5. ParaView – Open-source multi-platform data analysis. – <https://www.paraview.org/>. (дата обращения 01.02.2024)

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
Кубанский государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России



Материалы

Четырнадцатой международной учебно-методической конференции
«Инновации в образовании»



г. Краснодар, 11 апреля 2024 года