

**Волчков С.О., Бляхман Ф.А., Курляндская Г.В.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕРВЕНЦИОННОЙ
КАРДИОЛОГИИ**

Кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов
Уральский федеральный университет
Отдел биомедицинской физики и инженерии
Уральский государственный медицинский университет
Екатеринбург, Российская Федерация

**Volchkov S.O., Blyakhman F.A., Kurlyandskaya G.V.
COMPUTER MODELING METHODS FOR SOLVING THE TASKS OF
INTERVENTIONAL CARDIOLOGY**

Department of Magnetism and Magnetic Nanomaterials
Ural Federal University
Department of biomedical physics and engineering
Ural State Medical University
Yekaterinburg, Russian Federation

E-mail: stanislav.volchkov@urfu.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке технологии для компьютерной визуализации сосудов сердца и оценки морфофункциональных характеристик коронарных артерий по результатам стандартного ангиографического обследования пациентов. Рассмотрены автоматизированные методы компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов.

Annotation.

This work is devoted to the development of technology for computer visualization of cardiac vessels and assessment of the morphofunctional characteristics of the coronary arteries based on the results of standard angiographic examination of patients. Automated computer modeling methods based on the finite element method are considered.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, гемодинамика, коронарные артерии, ангиография

Keywords: computer simulation, finite element method, hemodynamics, coronary arteries, angiography

Введение

Оценка гемодинамической значимости патологических изменений в коронарном русле сердца является насущной задачей интервенционной кардиологии, от решения которой зависит выбор тактики лечения пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС). В современном арсенале врача имеются инструментальные методы, позволяющие получить дополнительную информацию о вкладе поражений коронарных артерий (КА) в коронарный кровоток и функцию миокарда. В частности, это внутрисосудистый ультразвук и внутрисосудистая манометрия КА. Данные методы обладают достаточно высокой информативной ценностью, но не нашли широкого распространения в клинической практике из-за большой стоимости и трудозатратности.

Информационные и компьютерные технологии в последние годы стали широко внедряться в различные отрасли деятельности, включая практическую медицину. С их помощью повышается точность диагностики и качество оказания медицинских услуг. Настоящая работа посвящена разработке технологии для компьютерной визуализации сосудов сердца и оценки морфофункциональных характеристик КА по результатам стандартного ангиографического обследования пациентов. Рассматривается компьютерная гидродинамическая модель на основе метода конечных элементов, которая предполагает численное решение дифференциальных нелинейных уравнений для оценки ламинарного и турбулентного потоков в КА с учетом их топологии и физико-химических параметров системы (например, упругости стенки сосуда и вязкости кровеносной жидкости).

Цель исследования – разработка автоматизированной компьютерной модели для описания тока крови в коронарных артериях со сложной морфологией.

Материалы и методы исследования

Метод конечных элементов заключается в решении дифференциальных уравнений в конечном количестве доменов. В каждом из элементов выбирается вид аппроксимирующей функции, а вне элемента аппроксимирующая функция равна нулю. При необходимости получения решения с субмикрометровым разрешением требуется разбиении трехмерной системы на конечные объемные элементы, общее количество которых может достигать $10^6 - 10^7$ единиц. В данной работе была использована вычислительная станция с объемом оперативной памяти до 128 Гбайт и 32 ядрами процессора Intel Xeon X5 с частотой 3.3 ГГц и лицензионное программное обеспечение Comsol Multiphysics. Параметры системы, на которых возможны изменения физических свойств - резкоизменяющаяся топология криволинейных границ стеноза или сосуда, предполагаемая топология вихрей, бифуркационных узлов, определяют форму и размер конечного элемента.

Структура кровеносной артерии *in vivo* для компьютерной модели была получена по данным ангиографического обследования пациентов с

последующим применением алгоритмов распознавания образов на основе Фурье-анализа растрового изображения и алгоритмов Брезенхема [1] (рисунок 1(А)). Цифровая фотография или иное растровое изображение представляет собой массив чисел, зафиксированных сенсорами уровней яркости, в двумерной плоскости. Алгоритмы обработки изображений представляют собой с математической точки зрения тонкую линзу, которая выполняет преобразование Фурье изображений, размещённых в фокальных плоскостях [2].

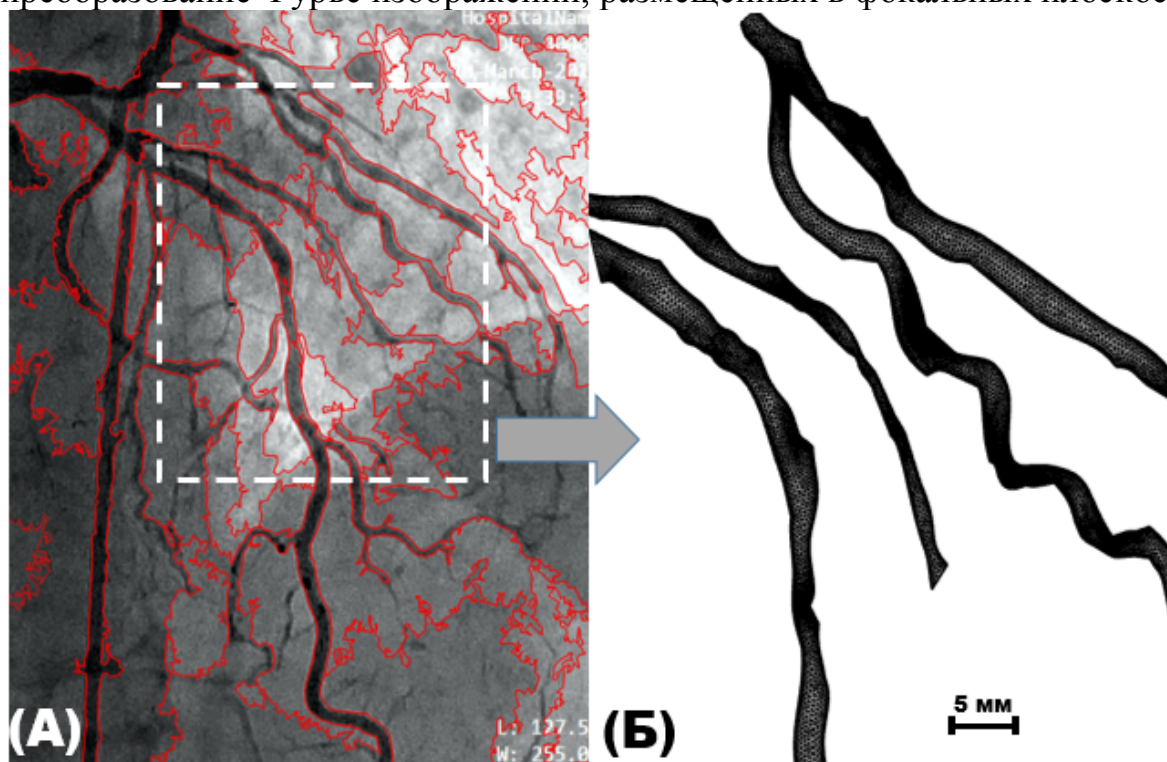


Рис. 1. (А) Распознавание образа ангиограммы коронарных артерий; (Б) Фрагмент сеточной модели коронарных артерий

В решении данной задачи была применена неструктурированная сетка из тетраэдров с неравномерной связью, которая заполняла архитектурную модель КА с помощью генератора тетраэдральных сеток на основе алгоритмов Делоне [3]. Выбор метода обусловлен присутствием большого количества доменов, где свойства кровотока анизотропны.

На рисунке 1(Б) представлено разбиение распознанных артерий. Разбиение проводилось тетраэдрами с гранями от 0,004 до 0,025 мм, однако их пространственное расположение различается по мере удаления от оси симметрии по направлению к стенке сосуда. Выбор особенностей уплотнения сетки обусловлен условиями: градиент скорости на оси симметрии равен нулю, ближе к оси градиенты скорости – маленькие, у стенки сосуда – градиенты скорости большие. Также в области «вылета» кровотока из стеноза предполагается наличие вихревых потоков, поэтому данная область имеет элементы с гранью тетраэдра порядка 0,015 мм.

Для решения гемодинамической задачи был использован ряд допущений. Значения динамической вязкости ($\eta = \text{const} = 0,00345 \text{ Па}\cdot\text{с}$) и плотности ($\rho = \text{const} = 1050 \text{ кг/м}^3$), которые приблизительно равны физико-химическим параметрам плазмы крови. Влияние температуры на вязкость жидкости не учитывалась. Вязкость не зависела от градиента скорости, т.е. была рассмотрена ньютоновская жидкость. Допущение согласуется со свойствами плазмы крови, но точно не отражает свойства крови в целом. Жидкость принималась несжимаемой, что соответствует свойствам плазмы. Стенка сосуда и стеноза являлась абсолютно жесткой и не имела своих физико-химических параметров. Свойства агрегации кровеносных тел также не учитывались.

Течение крови в объемном сосуде задавалось уравнениями Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости без временного параметра и уравнением неразрывности. Гравитационные силы не учитывались. Было применено граничное условие «Noslip» [3], то есть условие нулевой скорости на стенках сосуда.

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \nabla \cdot [-p + \eta(\nabla\vec{V} + (\nabla\vec{V})^T)], \quad \rho\nabla \cdot (\vec{V}) = 0, \quad (1)$$

где ρ - плотность жидкости, η - динамическая вязкость жидкости, p - давление, \vec{V} - вектор скорости. Для скоростей «на входе» и «на выходе» фрагмента артерии устанавливали условия параллельности потока к оси сосуда. Начальная скорость изменялась в соответствии с механическим циклом сердца [4]. Для решения систем нелинейных уравнений в стационарных и нестационарных задачах использовался демпфированный метод Ньютона, при котором система решается как полностью сопряженная. Этот метод основан на линеаризации нелинейных уравнений и решении линейных уравнений в последовательности итераций Ньютона до получения требуемой точности.

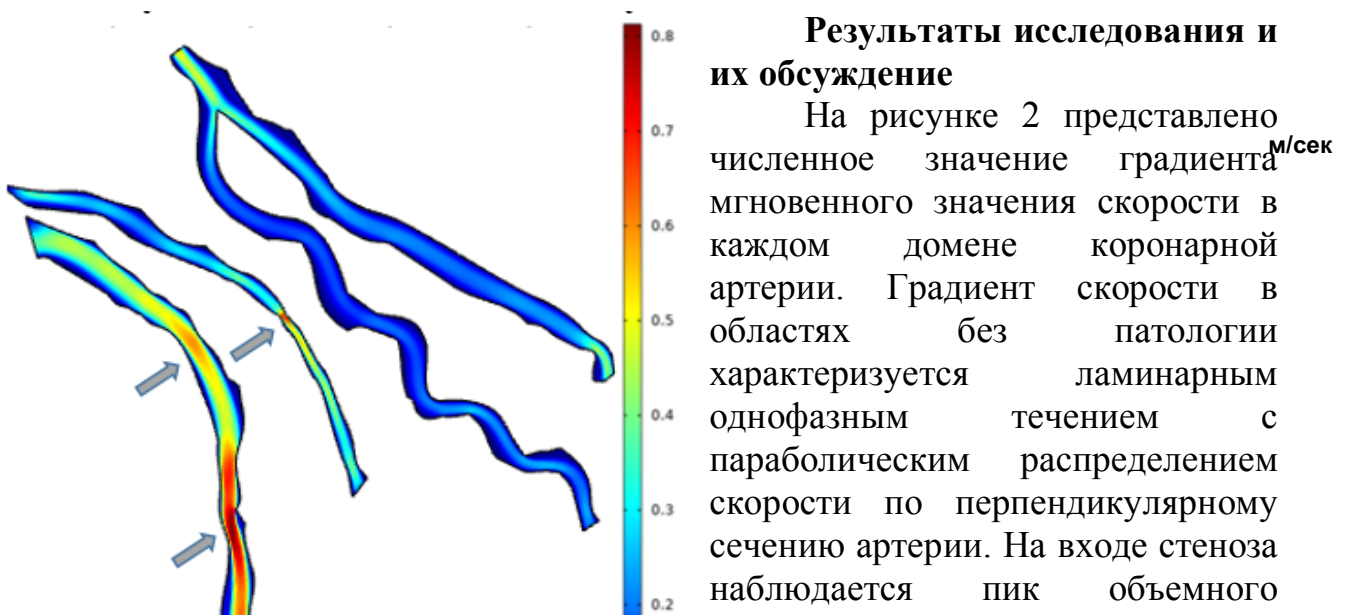


Рис. 2. Распределение градиента мгновенного значения скорости в коронарных артериях

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 2 представлено численное значение градиента мгновенного значения скорости в каждом домене коронарной артерии. Градиент скорости в областях без патологии характеризуется ламинарным однофазным течением с параболическим распределением скорости по перпендикулярному сечению артерии. На входе стеноза наблюдается пик объемного

кровотока через сечение. В центральной области стеноза, указанной на рис. 2. стрелкой, распределение скорости также имеет параболический слоистый профиль, но максимальная скорость увеличивается до 4х раз. На выходе из стеноза, то есть в районе внезапного расширения КА, профиль скорости становится отличным от параболического. Область выхода стеноза характеризуется наличием «зоны отрыва кровотока», за счет разницы давления возникают потоки поперечной циркуляции, что подразумевает наличие в данной области небольших вихревых потоков («зоны рециркуляции»). Это приводит к образованию локальной зоны возвратного течения крови, которое уменьшает средний объемный кровоток. Вместе с тем, на протяжении 2-4 мм после стеноза мгновенная скорость в центральной части КА остается повышенной. Областей рециркуляции на входе стеноза не наблюдается.

Стоит также отметить наличие «зон застоя», где скорость кровотока практически равна нулю и «зон сильной извитости КА», где наблюдаются низкие значения касательных напряжений по сравнению с напряжениями, возникающими на стенке здоровой артерии. Последнее может оказывать негативное воздействие на перенос клеток крови и указывает на вероятность образования патологий в данной области.

В зонах бифуркации кровеносных артерий также выявлены закономерности нарушения нормальной гемодинамики, где в области апикального угла наблюдаются максимальные внутренние давления на стенку сосуда, что может способствовать образованию аневризмы.

Выводы:

1. В данной работе метод компьютерного моделирования был использован для визуализации и детектирования гемодинамических свойств кровотока коронарных артерий в зависимости от их топологии.

2. На основании представленной гемодинамической модели, оцифрованной по данным ангиографии, определены потенциальные области патологических образований коронарных артерий и предсказано наличие зон турбулентности и зон застоя, то есть установлены значимые закономерности, получение которых на основе стандартного исследования невозможно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-19-00090.

Список литературы:

1. Bresenham J.E. Fundamental Algorithms for Computer Graphics / J.E. Bresenham, R.A. Earnshaw, M. L.V. Pitteway. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. – 1042 p.

2. Оптические методы обработки информации: Учебное пособие / под ред. А. Л. Дмитриев. - СПб.: СПбГУИТМО, 2005. – 46 с.

3. Baker A. J. Finite Elements: Computational Engineering Sciences 1st Edition / A. J. Baker – Wiley, 2012. – 288 p.

4. Sun Y.H. Effects of left ventricular contractility and coronary vascular resistance on coronary dynamics / Y.H. Sun, T. J. Anderson, K. H. Parker, J. V. Tyberg // *AJP-Heart and Circulatory Physiology*. – 2004. – V. 286. - H1590–H1595.

**Динисламова О.А.¹, Камалов И.А.², Сафронов А.П.², Бляхман Ф.А.^{1,2}
ТЕСТИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ НАБУХАНИЯ ГИДРОГЕЛЯ
ПОЛИМЕТАКРИЛАТА НАТРИЯ В РАСТВОРЕ ХЭНКСА: ФОКУС НА
РАЗРАБОТКУ УПРАВЛЯЕМЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ КЛЕТОЧНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

¹Кафедра медицинской физики, информатики и математики
Уральский государственный медицинский университет
Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт естественных наук и математики
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина

**Dinislamova O.A.¹, Kamalov I.A.², Safronov A.P.², Blyakhman F.A.^{1,2}
TESTING OF SWELLING DEGREE FOR SODIUM POLYMETACRYLATE
HYDROGEL IN *HANKS' SOLUTION*: FOCUS ON THE DEVELOPMENT OF
CONTROLLED SCAFFOLDS FOR CELL TECHNOLOGIES**

¹Department of medical physics, informatics and mathematics
Ural state medical university

Yekaterinburg, Russian Federation

²Institute of natural science and mathematics

Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsyn,
Yekaterinburg, Russian Federation
E-mail:ODinislamova@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены полиэлектролитные гели на основе полиметакриловой кислоты в качестве перспективных материалов подложек для культивирования клеток. Исследована равновесная степень набухания и кинетика набухания гелей в солевом растворе Хэнкса в зависимости от степени сшивки и ионизации гелей.

Annotation. This study deals with polyelectrolyte gels based on polymethacrylic acid as a promising material for the culturing scaffolds. The equilibrium degree and the kinetics of gel swelling in Hanks' salt solution depending on the extent of cross-linking density and ionization of gels were investigated.

Ключевые слова: полиэлектролитный гель, культуральная подложка, раствор Хэнкса, степень набухания.

Key words: polyelectrolyte gel, scaffold, cells culturing, *Hanks' solution*, swelling degree.