

5. Синтез новых углерод-азотных нанокластеров при термическом отжиге в атмосфере азота алмазоподобных пленок углерода / И. А. Файзрахманов, В. В. Базаров, Н. В. Курбатова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 2. – С. 230–234.
6. A brief overview on antioxidant activity determination of silver nanoparticles / Z. Bedlovicova, I. Strapac, M. Balaz [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 14. – P. 3191.
7. Antiviral and Antibacterial Efficacy of Nanocomposite Amorphous Carbon Films with Copper Nanoparticles – 2023. – URL: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2023.10.13.562202v1> (дата обращения 14.03.2024) – Текст: электронный.

Сведения об авторах

П.К. Лапина* – студент магистратуры

Е.К. Городничий – студент

И.Н. Бажукова – кандидат физико-математических наук, доцент

Д.В. Райков – кандидат физико-математических наук, доцент

Information about the authors

P.K. Lapina* – M.S. student

E.K. Gorodnichiy – Student

I.N. Bazhukova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor

D.V. Raikov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

pln.lpn99@gmail.com

УДК: 61:577.3

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ КРОВИ НА РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ ГЕМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ СТЕНОЗА В КОРОНАРНОЙ АРТЕРИИ МЕТОДОМ ФРК

Махаева Ксения Евгеньевна¹, Бляхман Феликс Абрамович^{1,2}, Бессонов Иван Сергеевич³, Соколов Сергей Юрьевич^{1,2}, Стародумов Илья Олегович^{1,2}

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России Екатеринбург, Россия

³Тюменский кардиологический научный центр

ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»

Томск, Россия

Аннотация

Введение. Работа направлена на поиск потенциальных ошибок метода фракционного резерва кровотока (ФРК), широко используемого для диагностики гемодинамической значимости стеноза в коронарной артерии. **Цель исследования** – методом компьютерного моделирования количественно оценить потенциальный вклад вязких сил в крови в результат измерения ФРК. **Материал и методы.** Объектом исследования служили данные ангиографического обследования пациента с обширным стенозом левой коронарной артерии, в которой был инструментально определен ФРК перед лечением. Дополнительно, была рассмотрена модель идеального цилиндрического сосуда. Моделирование гемодинамики в реальном и идеальном сосудах было выполнено с использованием модели Навье-Стокса, вязкие свойства крови были описаны реологической моделью Карро. **Результаты.** Сравнительный анализ результатов моделирования гемодинамики в реальном и идеальном сосудах показал, что при прочих равных условиях градиент давления по методу ФРК существенно зависит от вязкости крови. Вклад вязких сил в градиент давления может составлять 21% от общей резистивности сосуда, которая в большей степени определяется его геометрией. **Выводы.** Интерпретация гемодинамической значимости стеноза по результатам ФРК должна принимать в расчет зависимость этого метода от физико-химических свойств крови конкретного пациента.

Ключевые слова: коронарные артерии, ИБС, стеноз, интервенционная кардиология, ФРК, компьютерное моделирование.

EFFECT OF BLOOD VISCOSITY ON THE VALUE OF HEMODYNAMIC SIGNIFICANCE OF CORONARY ARTERY STENOSIS OBTAINED BY FFR METHOD

Makhaeva Ksenia Evgenyevna¹, Blyakhman Felix Abramovich^{1,2}, Bessonov Ivan Sergeyevich³, Sokolov Sergey Yurievich^{1,2}, Starodumov Ilya Olegovich^{1,2}

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

²Ural State Medical University

Yekaterinburg, Russia

³Tyumen Cardiology Research Center

Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences

Tomsk, Russia

Abstract

Introduction. This work is addressed the search for potential errors in the fractional blood flow reserve (FFR) method, a widely introduced measure of the hemodynamic significance of coronary artery stenosis. The aim of this computer simulation study is to quantify the contribution of viscous forces in the blood to the FFR. **Material and methods.** The object of study was the data of angiographic and FFR examinations in a patient with extensive stenosis of the left coronary artery. Additionally, a model of an ideal cylindrical vessel was considered. Hemodynamics in both real and ideal vessels were modeled using the Navier-Stokes model, and the viscous properties of blood were described using the Carreau rheological model. **Results.** A comparative analysis of the results of hemodynamics modeling in a real and ideal vessel showed that at other things being equal, the pressure gradient obtained by FFR method significantly depends on the blood viscosity. The contribution of viscous forces to the pressure gradient along the FFR is possible up to 21% of the total resistance of the vessel, despite the fact that the resistance mainly depends on the vessel geometry. **Conclusion.** Interpretation of the hemodynamic significance of stenosis based on the results of FFR should take into account the dependence of this method on the physicochemical properties of the patients' blood.

Keywords: coronary arteries, IHD, stenosis, interventional cardiology, FFR, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Статистика показывает, что с сердечно-сосудистыми заболеваниями связана самая высокая смертность в большинстве стран мира [1]. Развитие атеросклероза коронарных артерий приводит к нарушению сократительной функции миокарда и сердца в целом.

Стеноз коронарных артерий – это основной определяющий фактор как локальной, так и системной гемодинамики сердца. Количественная оценка вклада стеноза в кровоснабжение миокарда является ключевой задачей врачей при выборе тактики лечения пациента. Для этого в клиническую практику внедрен ряд неинвазивных и малоинвазивных методов диагностики, одним из которых является подход оценки фракционного резерва кровотока (ФРК). ФРК – это показатель, отражающий зависимость внутрисосудистого давления от степени стеноза в условиях нарушенного кровотока. В основе метода лежит принцип измерения давления до и после сужения в пораженной артерии. На сегодняшний день оценка ФРК считается одним из самых информативных исследований, позволяющих оценить значимость стеноза артерии и впоследствии выбрать оптимальную стратегию лечения.

Движение крови по сосудам возникает вследствие разности давления (градиента давления) в различных участках системы кровообращения. Величина градиента давления в артерии зависит от сил сопротивления, которые определяются формой и кривизной сосуда, и от сил внутреннего трения.

Предполагается, что величина измеряемого ФРК в значительной степени зависит от геометрии сосуда, где наибольший вклад вносит размер стенозированной области. Однако во многих работах коронарной гемодинамики [2, 3] авторы демонстрируют, что кровь имеет сложную многокомпонентную структуру, за счет чего при движении по сосудам вязкость может изменяться в широком диапазоне.

Настоящая работа посвящена исследованию гемодинамической значимости стеноза пораженной коронарной артерии методом ФРК. Были предложены две модели: модель реальной коронарной артерии и модель идеального цилиндрического сосуда. Было выполнено моделирование для идеального сосуда, в котором резистивный вклад геометрии сведен к минимуму, вследствие чего величина градиента давления в большей степени определялась вязкими свойствами крови. Вклад вязких сил в крови на величину ФРК был оценен путем сопоставления с результатами, полученными для реальной модели.

Цель исследования – методом компьютерного моделирования продемонстрировать и количественно оценить вклад вязких сил в крови в измеренный ФРК стенозированной коронарной артерии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа опиралась на результаты ангиографического обследования пациента, для которого инструментально был измерен ФРК. Рассматривалась трехмерная модель левой коронарной артерии с обширным стенозом и модель идеального цилиндрического сосуда (рис. 1).

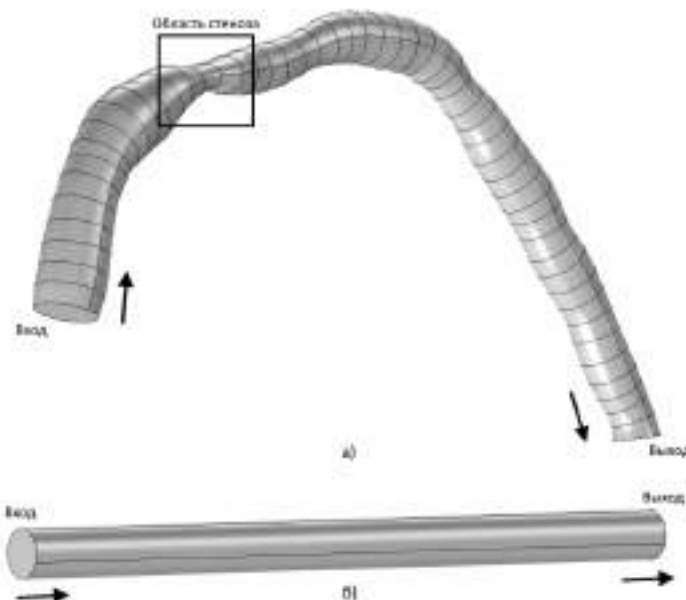


Рис.1 а) Фрагмент левой коронарной артерии со стенозом, реконструированный в трехмерной системе координат. б) Модель идеального цилиндрического сосуда. Стрелками показаны граничные условия. Место стеноза включено в рамку

На рис. 1 показаны граничные условия для выбранных моделей. Для реального сосуда на входной и выходной границе было задано периодическое давление, соответствующее оригинальной записи с датчиков ФРК (рис. 2). Для идеального сосуда на границах был задан периодический объемный расход, полученный из расчетов реальной модели. На непроницаемых несжимаемых стенках сосуда в обеих моделях было задано условие прилипания.

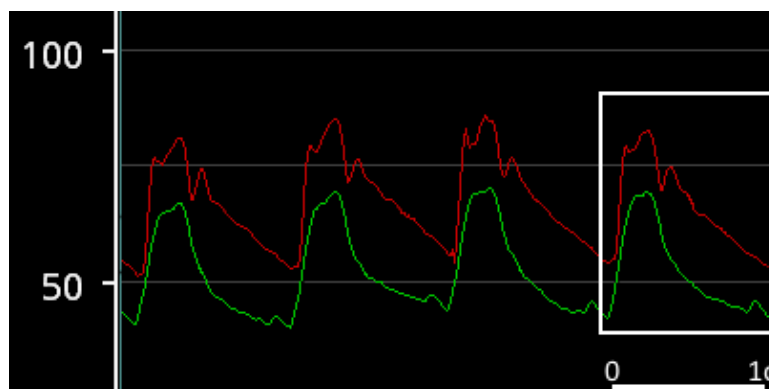


Рис.2 Фрагмент записи давления с датчиков. Ордината – давление в мм. рт. ст. Цвет кривых соответствует расположению датчиков в русле потока, где измерялось давление: красная – до стеноза, зеленая – после стеноза

Моделирование гемодинамического потока было выполнено с использованием гидродинамической модели Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) &= -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}), \end{aligned}$$

где \mathbf{u} – вектор скорости, ρ – постоянная плотность, p – давление, μ – динамический коэффициент вязкости.

Основным механизмом нелинейности состояния крови является нелинейная зависимость динамической вязкости от скорости сдвига. Таким образом, кровь можно рассматривать как неньютоновскую жидкость и описывать с помощью различных реологических моделей. В данном исследовании мы рассматриваем модель Карро [4], которая успешно использовалась для моделирования кровотока в предыдущих работах [5]. Эта модель может быть выражена при помощи следующего уравнения:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \cdot (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}},$$

$$4,7 [\text{мПа} \cdot \text{с}] \leq \mu \leq 56 [\text{мПа} \cdot \text{с}],$$

$$\lambda = \sqrt{\mu_{max} / \tau^*},$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, λ – коэффициент релаксации, μ_{inf}, μ_0 – минимальное и максимальное значение вязкости, n – эмпирическая постоянная, τ^* – характеристическое напряжение сдвига. Были использованы следующие параметры для модели крови: $\rho = 1325 \text{ кг/м}^3$, $n = 0,3568$, $\lambda = 3,131 \text{ с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлены результаты расчета для градиента давления, который обеспечивает ток крови в реальном и идеальном сосуде. На графике (рис. 3) видно, что имеется существенная разница между величинами градиента для реальной артерии и идеального сосуда. Отметим, что наибольшая разница между градиентами приходится на диастолическую фазу цикла.

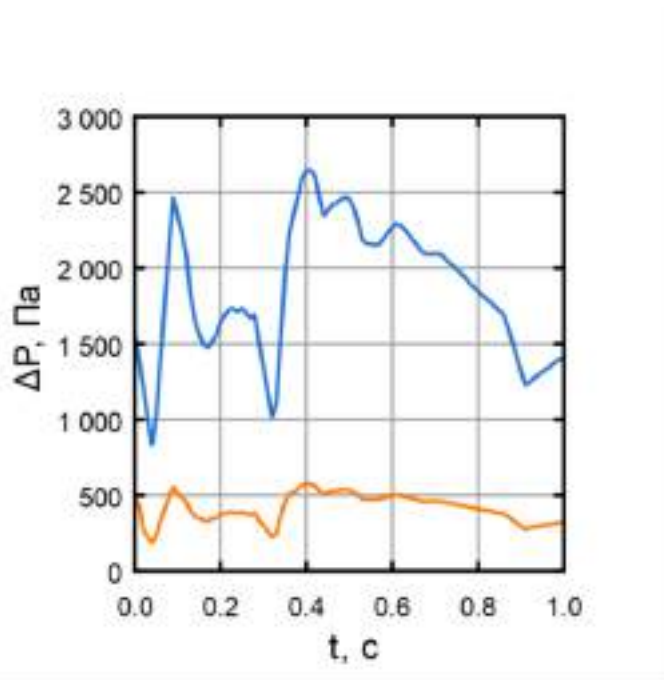


Рис.3 Зависимость градиента давления ΔP от длительности сердечного цикла t . Синяя линия – модель реальной артерии, оранжевая линия – модель идеального сосуда

ОБСУЖДЕНИЕ

Опираясь на полученные расчеты (рис. 3), можем отметить, что присутствует значительный вклад вязких сил в величину градиента давления. В период сердечного цикла разница между давлениями в реальной артерии в среднем составила 1900 Па, тогда как в идеальном сосуде, где разница определялась только вязкими свойствами крови – 400 Па. Таким образом, можно утверждать, что вязкие силы составляют 21% от градиента давления,

который был получен для реальной артерии и определялся в большей степени геометрией сосуда.

Сравнительный анализ результатов показал, что одну пятую часть от величины градиента давления в артерии, составляют вязкие силы в крови. Можно заключить, что помимо резистивного вклада геометрии сосуда в величину ФРК, имеется заметный вклад сил внутреннего трения, возникающих за счет вязких свойств крови. Значимость полученного результата имеет определяющее значение, поскольку учет вязких сил может как понизить, так и повысить первоначальное значение ФРК, что существенно повлияет на решение о проведении стентирования артерии.

Полученная разница между ФРК с учетом и без учета вязких сил в крови, вызвана нелинейным поведением среды при движении по сосудам, которое подтверждено в большинстве работ [6,7]. Поскольку вязкость крови меняется в широком диапазоне, следовательно, предположить, что и вклад вязких сил будет существенно различаться.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования было показано, что величина ФРК существенно зависит от вязких сил в крови. Было установлено, что вклад вязких свойств может достигать 21% от градиента давления в сосуде. В зависимости от физико-химических свойств крови конкретного пациента результат может заметно отличаться как в большую, так и в меньшую сторону.

По результатам работы отметим, что оценка гемодинамической значимости стеноза методом ФРК принципиально зависит от вклада вязких сил в крови, вследствие чего данная методика диагностики должна учитывать влияние этих сил для каждого пациента в отдельности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 22-71-10071).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mensah, G. A. The global burden of cardiovascular diseases and risk factors: 2020 and beyond / G. A. Mensah, G. A. Roth, V. Fuster // *Journal of the American College of Cardiology*. – 2019. – Vol. 74, № 20. – P. 2529–2532.
2. Haynes, R. H. Physical basis of the dependence of blood viscosity on tube radius / R. H. Haynes // *American Journal of Physiology-Legacy Content*. – 1960. – Vol. 198, № 6. – P. 1193–1200.
3. Modeling of Local Hematocrit for Blood Flow in Stenotic Coronary Vessels / I. Starodumov, K. Makhaeva, A. Zubarev [et al.] // *Fluids*. – 2023. – Vol. 8, № 8. – P. 230.
4. Carreau, P. J. Rheological equations from molecular network theories / P. J. Carreau // *Transactions of the Society of Rheology*. – 1972. – Vol. 16, № 1. – P. 99–127.
5. In-silico study of hemodynamic effects in a coronary artery with stenosis / I. O. Starodumov, F. A. Blyakhman, S. Y. Sokolov [et al.] // *The European Physical Journal Special Topics*. – 2020. – Vol. 229, P. 3009–3020.
6. Haynes, R. H. Physical basis of the dependence of blood viscosity on tube radius / R. H. Haynes // *American Journal of Physiology-Legacy Content*. – 1960. – Vol. 198, № 6. – P. 1193–1200.
7. Srivastava, L. M. On two-phase model of pulsatile blood flow with entrance effects / L. M. Srivastava, V. P. Srivastava // *Biorheology*. – 1983. – Vol. 20, № 6. – P. 761–777.

Сведения об авторах

К.Е. Махаева* – студент магистратуры
Ф.А. Бляхман – доктор биологических наук, профессор
И.С. Бессонов – кандидат медицинских наук
С.Ю. Соколов – кандидат физико-математических наук, доцент
И.О. Стародумов – кандидат физико-математических наук

Information about the authors

K.E. Makhaeva* – M.S. student
F.A. Blyakhman – Doctor of Sciences (Biology), Professor
I.S. Bessonov – Candidate of Sciences (Medicine)
S.Yu. Sokolov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor
I.O. Starodumov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):
ksenia.makhaeva@urfu.ru