

6. A comparison of oxide particles and silica particles for tracking organ recellularization / E. Kobes, G. I. Georgiev, A. V. Louis [et al.] // Molecular Imaging. – 2018. – Vol. 17. – P. 1–10.

Сведения об авторах

О.А. Динисламова* – младший научный сотрудник ЦНИЛ УГМУ

Ф.А. Бляхман – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦНИЛ УГМУ

Information about the authors

O.A. Dinislamova* – Researcher of CRL USMU

F.A. Blyakhman – PhD, Doctor of Sciences (Biology), Professor, chief researcher of CRL USMU

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):
ODinislamova@gmail.com

УДК 61:577.3

ВЛИЯНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СВОЙСТВ КРОВИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕЙ ЗА СТЕНОЗОМ В КРОНАРНОЙ АРТЕРИИ
Ксения Евгеньевна Махаева¹, Феликс Абрамович Бляхман^{1,2}, Сергей Юрьевич Соколов^{1,2}, Илья Олегович Стародумов^{1,2}

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

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения РФ
Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. В работе рассматривается моделирование гемодинамики внутри реальной патологически измененной коронарной артерии в приближении сплошной несжимаемой среды с постоянной вязкостью и переменной вязкостью. **Цель исследования** – методом компьютерного моделирования оценить влияние неньютоновских свойств крови на возникновение вихревых зон вблизи стеноза коронарных артерий. **Материал и методы.** Рассматривалась 3D-модель правой коронарной артерии, реконструированной по данным ангиографического обследования пациента с ишемической болезнью сердца. Моделирование было выполнено с использованием гидродинамической модели Навье-Стокса, неньютоновские свойства крови были описаны моделью Карро. **Результаты.** Установлено, что неньютоновские свойства крови существенно изменяют гемодинамику среды в целом и характер вихреобразования в области со стенозом, в частности. Показано, что в области стеноза формируется устойчивый вихревой низкоскоростной ток крови, при этом уменьшение локальной вязкости крови приводит к тому, что сдвиговые напряжения увеличиваются на 18%, а характерные числа Рейнольдса уменьшаются на величину до 50%. **Выводы.** Неньютоновские свойства крови, в частности, зависимость вязкости от сдвиговых напряжений потока, играют важную роль в формировании вихрей крови за стенозом, что искажает гемодинамическую

значимость стеноза и, следовательно, влияет на выбор тактики лечения заболеваний.

Ключевые слова: гемодинамика, коронарные артерии, стеноз, рециркуляционные зоны, компьютерное моделирование.

EFFECT OF BLOOD NON-NEWTONIAN PROPERTIES ON VORTEX FORMATION BEHIND OF CORONARY ARTERY STENOSIS

Ksenia E. Makhaeva¹, Felix A. Blyakhman^{1,2}, Sergey Yu. Sokolov^{1,2}, Иля О. Starodumov^{1,2}

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

²Ural state medical university

Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. In this work, we compare the simulation of hemodynamics inside a real pathological deformed coronary artery in terms of a continuous incompressible medium with constant viscosity and with viscosity expressed by the Carreau rheological model. **The purpose of the study** is a computer measurement method of the influence of non-Newtonian properties of blood on the exclusion of vortex zones near coronary artery stenosis. **Material and methods.** A 3D model of the right coronary artery, reconstructed according to the data of an angiographic study of a patient with coronary heart disease, is considered. The simulation was performed using the hydrodynamic Navier-Stokes model, the non-Newtonian properties were expressed by the Carreau model. **Results.** It was established that the non-Newtonian properties of blood significantly change the hemodynamics of the medium in general and the process of vortex formation in the stenosis area in particular. It is shown that a stable vortex of low-velocity current blood appears in the area of stenosis, while a decrease in blood viscosity leads to an increase in shear stress by 18%, and the Reynolds numbers decrease up to 50%. **Conclusions.** The non-Newtonian properties of the blood, in particular an affect of shear stress on the viscosity, play an important role in the formation of blood vortices, which distorts the hemodynamic significance of stenosis and, therefore, affects the choice of tactics for treating diseases.

Keywords: hemodynamics, coronary arteries, stenosis, recirculation zones, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Влияние атеросклероза на гемодинамику в коронарных артериях имеет большое клиническое значение, поскольку данный процесс способствует развитию ишемии, деформации стенок артерий, а также изменяет локальные реологические свойства крови [1].

Хорошо известно, что в области за стенозом могут возникать рециркуляционные вихревые зоны. Данные низкоскоростные зоны характеризуются малыми сдвиговыми напряжениями. Исследование [2] показало, что потоки в вихревых зонах вызывают механическое повреждение стенки сосуда и тромбоз в артериальной системе.

Математическое и компьютерное моделирование гемодинамики в системе сложной сосудистой структуры считается одним из перспективных методов исследования с высокой степенью детализации [3,4]. Особый интерес представляет возможность использования компьютерных моделей в качестве виртуального эксперимента для оценки гемодинамики при сердечно-сосудистых заболеваниях.

Настоящая работа посвящена изучению влияния неньютоновских свойств крови на гемодинамику вблизи стеноза коронарных артерий. Моделирование кровотока было выполнено с использованием гидродинамической модели Навье-Стокса, а реологические свойства крови были описаны с помощью модели Карро, которая часто используется в задачах моделирования ламинарной гемодинамики [3,4].

Цель исследования – методом компьютерного моделирования оценить влияние неньютоновских свойств крови на возникновение вихревых зон вблизи стеноза коронарных артерий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа опирается на результаты ангиографического обследования пациента с ишемической болезнью сердца. Рассматривалась аксиально-симметричная 3D-модель геометрии правой коронарной артерии со стенозом (Рис. 1). Уменьшение площади просвета составляло 50%.

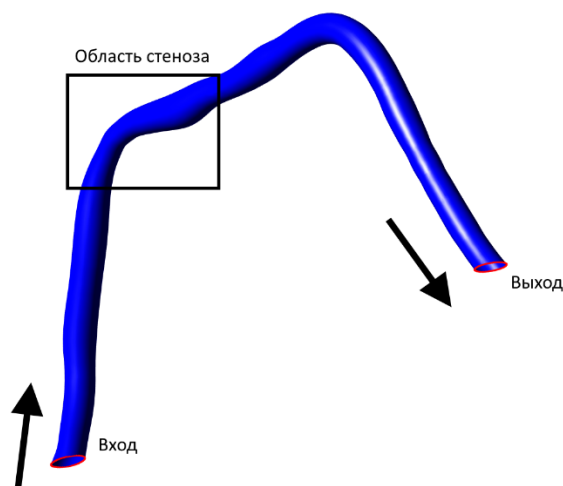


Рис. 1 Фрагмент правой коронарной артерии со стенозом, реконструированный в трехмерной системе координат по данным рентгеноконтрастной коронарографии. Стрелками показаны граничные условия. Место стеноза включено в рамку

На Рис. 1 показаны граничные условия для выбранной модели. Входная граница определялась постоянной фиксированной скоростью, направленной по нормали к поверхности. На выходной границе было задано условие нулевого градиента статического давления. В качестве граничного условия на непроницаемых несжимаемых стенках сосуда было задано условие прилипания.

Рассматривались стационарные потоки, возникающие в сосуде при фиксированных скоростях тока на входной границе 0,35 м/с и 0,5 м/с.

Для моделирования гемодинамического потока внутри артерии рассматривался ламинарный режим течения в сплошной несжимаемой среде, представляющей динамику крови в коронарной артерии. Моделирование было выполнено с использованием гидродинамической модели Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{V} &= 0, \\ \rho \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{V} \right) &= -\nabla \cdot \mathbf{P} + \nabla(2\mu\mathbf{S}), \end{aligned}$$

где t – время, \mathbf{V} – вектор скорости, ρ – постоянная плотность, \mathbf{P} – давление, \mathbf{S} – тензор скоростей деформации, μ – динамический коэффициент вязкости.

В силу нелинейной зависимости динамического коэффициента вязкости от сдвигового напряжения, кровь рассматривалась как неньютоновская жидкость, свойства которой были описаны реологической моделью Карро. Данная модель выражается следующим уравнением для динамического коэффициента вязкости:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{min} + (\mu_{max} - \mu_{min}) \cdot (1 + \lambda^2 S)^{\frac{n-1}{2}} \\ \mu_{min} &\leq \mu \leq \mu_{max} \\ \lambda &= \sqrt{\mu_{max}/\tau^*} \end{aligned}$$

где, S – модуль обобщенного градиента скорости, λ – коэффициент релаксации, μ_{min}, μ_{max} – минимальное и максимальное значение вязкости, n – эмпирическая постоянная, τ^* – характеристическое напряжение сдвига. Были использованы следующие параметры неньютоновской модели крови: $\rho = 1055$ кг/м³, $n=0,3568$, $\lambda=3,131$ с, $\mu_{min}=0,004$ Па*с, $\mu_{max}=0,056$ Па*с. В приближении постоянного коэффициента вязкости использовалась константа $\mu = \mu_{min}$.

Для решения приведенных уравнений был применен метод конечных объемов для регулярной гексагональной сетки, реализованный в программе FlowVision.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 2 представлены результаты моделирования тока крови вблизи стеноза при фиксированной скорости потока на входе 0,5 м/с для модели с постоянной вязкостью (Рис. 2б) и для модели Карро (Рис. 2а). Результаты моделирования гемодинамики для скорости 0,35 м/с на входе в артерию показаны на Рис. 3. Следует отметить, что эти скорости характерны для кровотока в коронарных сосудах в период механического цикла сердца.

На Рис. 2 и Рис. 3 видно, что для любой скорости потока неньютоновские свойства крови обуславливают увеличение вязкости в низкоскоростной вихревой зоне и это обстоятельство, в свою очередь, уменьшает размеры вихря. Более того в случае неньютоновской модели крови при меньшей скорости потока (0,35 м/с) вихрь не развивается вовсе (Рис. 3а), в то время как более

грубая модель с постоянной вязкостью дает решение с рециркуляцией потока (Рис. 3б).

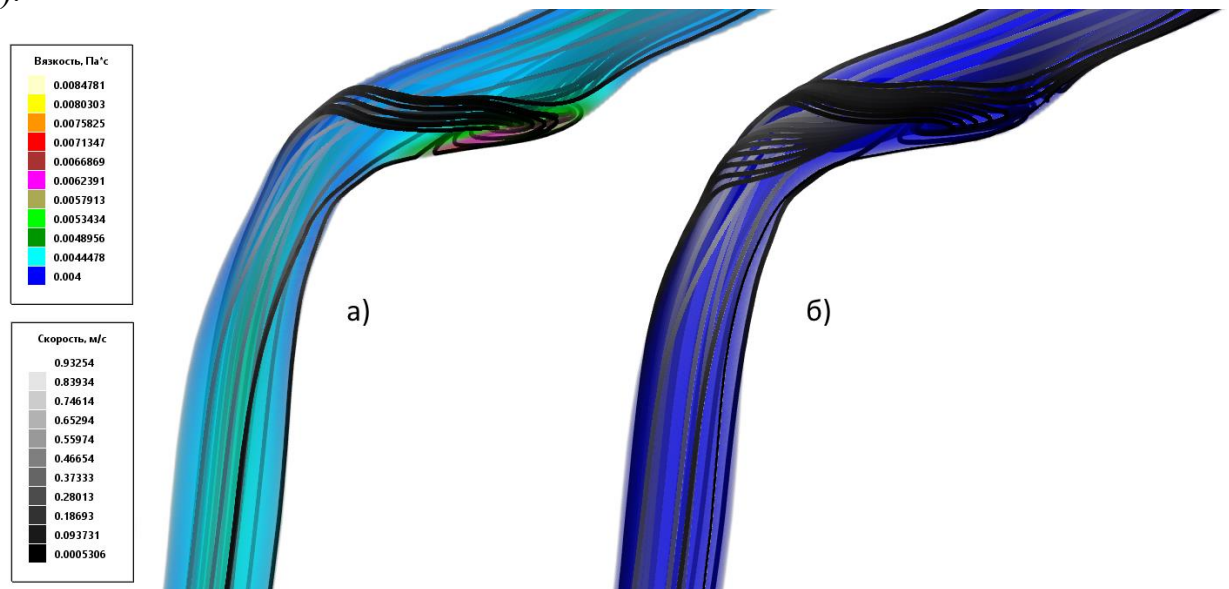


Рис. 2 Результаты моделирования потока крови на участке артерии со стенозом при скорости 0,5 м/с. а) модель с переменной вязкостью (модель Карро), б) модель с постоянной вязкостью. Линии отражают ток крови в пространстве, (цвет линий в градации серого соответствует модулю скорости). Распределение вязкости за стенозом представлено в цветовой гамме

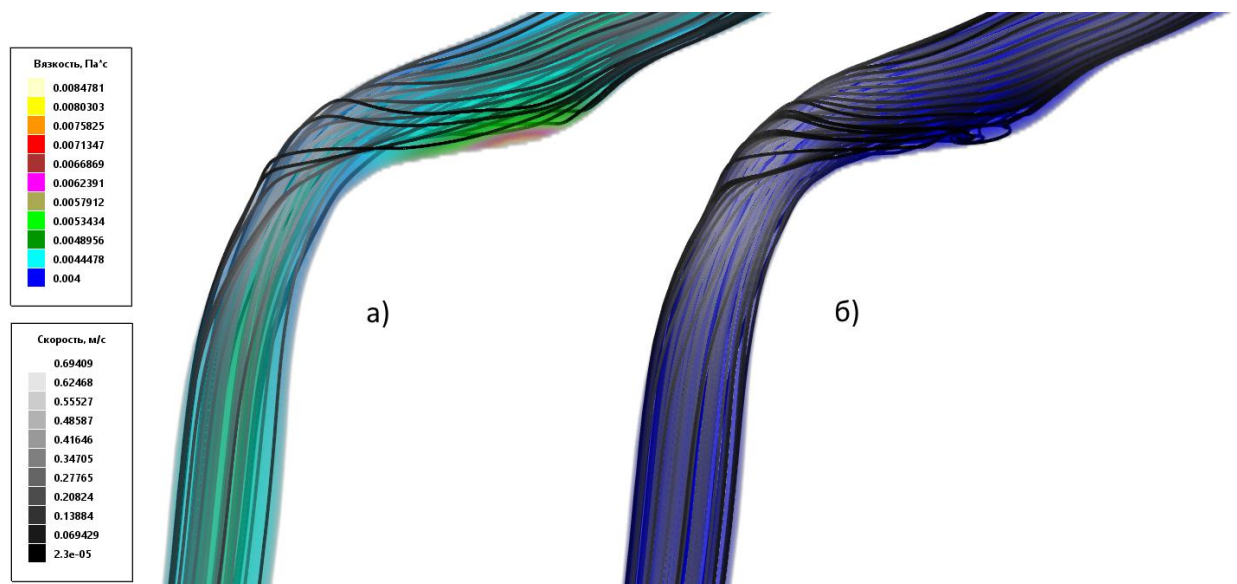


Рис. 3 Результаты моделирования потока крови на участке артерии со стенозом при скорости 0,35 м/с. а) модель с переменной вязкостью (модель Карро), б) модель с постоянной вязкостью. Линии отражают ток крови в пространстве, (цвет линий в градации серого соответствует модулю скорости). Распределение вязкости за стенозом представлено в цветовой гамме

ОБСУЖДЕНИЕ

Из полученных результатов можно отметить, что в неньютоновской модели при скорости потока 0,5 м/с, в частности, в вихревой зоне наблюдается увеличение вязкости в среднем на 45%. Качественно это отражается в

увеличении размеров вихря для ньютоновской модели крови. Учитывая зависимость между числом Рейнольдса и коэффициентом вязкости $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$, можно предположить, что с уменьшением вязкости происходит увеличение числа Рейнольдса при условии, что остальные параметры можно считать постоянными. Указанные наблюдения подтверждаются исследованием [2], в котором было экспериментально показано, что увеличение Re приводит к увеличению размеров вихревых зон.

Показано, что при скорости потока 0,5 м/с с учетом переменной вязкости напряжение сдвига на стенках сосуда изменяется на величину порядка 18% относительно значения при постоянной вязкости, что согласуется с теоретической зависимостью для модели Карро $\mu \sim 1/\sqrt{\tau}^*$ и для модели с постоянной вязкостью $\mu \sim \tau$ где, τ – напряжение сдвига.

Была проведена количественная оценка диапазона Re при скорости потока 0,5 м/с и 0,35 м/с для неньютоновской модели крови, которая составила $Re = (187 - 396)$ и для ньютоновской $Re = 396$.

ВЫВОДЫ

По данным рентгеноконтрастной коронарографии была реконструирована правая коронарная артерия со стенозом. Для этой артерии была сформулирована гемодинамическая модель кровотока, учитывающая переменную вязкость крови. Выполненные компьютерные расчеты с использованием данной модели показали, что:

1. В диапазоне скоростей кровотока, характерных для механического сердечного цикла, в области стеноза формируется устойчивый вихревой низкоскоростной ток крови.

2. Учет изменения вязкости крови в зависимости от сдвиговых напряжений среды существенно изменяет гемодинамику в области стеноза, а именно: вихреобразование наблюдается при больших скоростях кровотока; сдвиговые напряжения увеличиваются на 18%; характерные числа Рейнольдса уменьшаются на величину до 50%.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Unsteady response of blood flow through a couple of irregular arterial constrictions to body acceleration / N. Mustapha, S. Chakravarty, P. K. Mandal, N. Amin // *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. – 2008. – Vol. 8, № 03. – P. 395–420.
2. Azuma, T. Flow patterns in stenotic blood vessel models / T. Azuma, T. Fukushima // *Biorheology*. – 1976. – Vol. 13, № 6. – P. 337–355.
3. Modelling of hemodynamics in bifurcation lesions of coronary arteries before and after myocardial revascularization / I. O. Starodumov, S. Yu. Sokolov, D. V. Alexandrov [et al.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2022. – Vol. 380, № 2217. – P. 20200303.
4. In-silico study of hemodynamic effects in a coronary artery with stenosis / I. O. Starodumov, F. A. Blyakhman, S. Yu. Sokolov [et al.] // *The European Physical Journal: Special Topics*. – 2020. – Vol. 229, № 20. – P. 3009–3020.

Сведения об авторах

К.Е. Махаева* – студент

Ф.А. Бляхман – доктор биологических наук, профессор

С.Ю. Соколов – кандидат физико-математических наук, доцент

И.О. Стародумов – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Information about the authors

K.E. Makhaeva* – student

F.A. Blyakhman – Doctor of Sciences (Biology), Professor

S.Yu. Sokolov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor

I.O. Starodumov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher

***Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):**

ksyxeeenium241@gmail.com

УДК 532.5

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТА ЛЕКАРСТВА В КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ

Антон Юрьевич Мусихин, Андрей Юрьевич Зубарев

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

Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. Построена теоретическая модель течений, индуцируемых магнитным полем в канале, заполненном немагнитной жидкостью, и погруженной в нее каплей феррожидкости. **Цель исследования** - исследование проводится с целью разработки способа ускорения транспорта лекарственных средств по кровеносным сосудам. **Материал и методы.** Было показано, что при реальных значениях параметров системы токи могут развиваться в канале шириной в несколько миллиметров со скоростью порядка нескольких миллиметров в секунду. **Результаты.** Численно была решена система уравнений Навье-Стокса и получены значения амплитуды продольных компонент скоростей циркуляционных течений в тромбированном канале. **Выводы.** Данный механизм может обеспечить значительное ускорение транспорта в тромбированных сосудах с остановленным кровотоком.

Ключевые слова: магнитная жидкость, осциллирующий магнитный поток, поле-индуцированный поток, тромбоз.

APPLICATION OF MAGNETIC FLUID FOR INTENSIFICATION OF DRUG TRANSPORT IN BLOOD VESSELS OF A MAGNETIC FIELD

Anton. Yu. Musikhin, Andrey. Yu. Zubarev

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