

3. Нанокристаллический диоксид церия: свойства, получение, применение / В.К. Иванов, А.Б. Щербаков, А.Е. Баранчиков, В.В. Козик // Томск : Изд-во Том. ун-та, 2013. – 284 с.
4. Glossary of terms used in photocatalysis and radiation catalysis (IUPAC Recommendations 2011) / S.E. Braslavsky, A.M. Braun, A.E. Cassano [et al.] // Pure and Applied Chemistry. – 2011. – Vol. 83, № 4. – P. 931–1014.
5. Gamage, J. Applications of photocatalytic disinfection / J. Gamage, Z. Zhang // International Journal of Photoenergy. – 2010. – Vol. 2010, № 1. – P. 764870.
6. A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection / O.K. Dalrymple, E. Stefanakos, M.A. Trotz, D.Y. Goswami // Applied Catalysis B: Environmental. – 2010. – Vol. 98, № 1-2. – P. 27–38.
7. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity / H.A. Foster, I.B. Ditta, S. Varghese, A. Steele // Applied microbiology and biotechnology. – 2011. – Vol. 90. – P. 1847–1868.

Сведения об авторах

С.А. Косульникова* – студент

А.В. Киреева – кандидат физико-математических наук, доцент

Т.В. Берняева – магистрант

Information about the authors

S.A. Kosulnikova* – Student

A.V. Kireeva – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor

T.V. Bernyaeva – M.S. student

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

serafimakosulnikovaghjk@gmail.com

УДК: 61:577.3

ВЛИЯНИЕ ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ В КОРОНАРНОЙ АРТЕРИИ НА ВЯЗКОСТЬ КРОВИ В ОБЛАСТИ СТЕНОЗА

Махаева Ксения Евгеньевна¹, Стародумов Илья Олегович¹, Бляхман Феликс Абрамович^{1,2}

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

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

Аннотация

Введение. Работа посвящена изучению вклада пристеночного бесклеточного слоя (CFL) в вязкость крови коронарного сосуда в области стеноза. **Цель исследования** – методом компьютерного моделирования продемонстрировать и оценить вклад пристеночного эффекта в вязкостные свойства крови. **Материал и методы.** Рассматривается гидродинамическая модель, учитывающая кровь как двухкомпонентную среду с дискретной фазой эритроцитов и жидкой фазой плазмы, и однокомпонентная реологическая модель, в которой для описания вязкости используется формула Карро. Для описания пристеночного слоя была сформулирована сила отталкивания эритроцитов от стенки сосуда, величина которой контролируется коэффициентом отталкивания. Моделирование гемодинамики было выполнено для осесимметричного сосуда с выраженным стенозом. **Результаты.** Было обнаружено, что толщина слоя CFL неоднородна и оказывает существенное влияние на кровоток в сосуде. Сравнительный анализ результатов моделирования с однокомпонентной моделью показал, что наличие слоя CFL приводит к увеличению эффективной вязкости на величину более 100%. **Выводы.** Эффект пристеночного бесклеточного слоя – важный реологический феномен, определяющий свойства крови и играющий значительную роль в гемодинамике коронарных артерий со стенозом. Однокомпонентные гидродинамические модели, не описывающие слой CFL, нуждаются в модификации для корректного описания кровотока в коронарных сосудах.

Ключевые слова: ИБС, коронарные артерии, стеноз, эритроциты, пристеночный слой, вязкость крови, компьютерное моделирование.

EFFECT OF THE WALL LAYER IN THE CORONARY ARTERY ON BLOOD VISCOSITY IN THE AREA OF STENOSIS

Makhaeva Ksenia Evgenyevna¹, Starodumov Ilya Olegovich¹, Blyakhman Felix Abramovich^{1,2}

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

²Ural State Medical University

Yekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. This work is devoted to the study of the contribution of the walled cell-free layer (CFL) to the hemorheology of a coronary vessel with stenosis. **The aim of the study** is to demonstrate and evaluate the contribution of the wall effect to the viscous properties of blood by computer simulation method. **Material and methods.** We consider

a hydrodynamic model that considers blood as a two-component fluid with the discrete phase of erythrocytes and a liquid plasma phase and a one-component rheological model in which the Carreau formula is used to describe viscosity. The repulsive force of erythrocytes from the vessel wall, the magnitude of which is controlled by the repulsion coefficient, was formulated to describe the wall layer. Hemodynamics modeling was carried out for an axisymmetric vessel with a pronounced stenosis. **Results.** It was found that the thickness of the CFL layer is non-uniform and has a significant effect on the blood flow in the vessel. A comparative analysis of the simulation results with a one-component model showed that the presence of the CFL layer leads to an increase in effective viscosity by more than 100%. **Conclusions.** The effect of the CFL wall layer is an important rheological phenomenon that determines blood properties and has a significant role in the hemodynamics of coronary arteries with stenosis. One-component hydrodynamic models that do not describe the CFL layer need to be modified to correctly describe blood flow in coronary vessels.

Keywords: IHD, coronary arteries, stenosis, erythrocytes, wall layer, blood viscosity, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Подтверждается, что ишемическая болезнь сердца (ИБС) остается наиболее распространенным из сердечно-сосудистых заболеваний и основным фактором смертности населения [1]. В большинстве случаев ИБС связана с развитием атеросклероза в артериях сердца (коронарных артериях, КА), проявляющегося формированием препятствий (стенозов) на пути течения крови к миокарду.

Точность математического и компьютерного моделирования гемодинамических условий в КА критически зависит от физического представления о составе и свойствах крови. В основном, в исследованиях коронарной гемодинамики кровь рассматривают как однофазную ньютоновскую или неньютоновскую жидкость, упрощая тем самым ее реологические свойства, в частности вязкостные. В тоже время значительный вклад в реологию крови вносит концентрация эритроцитов и их взаимодействие со стенкой сосуда.

Сложное реологическое поведение крови, обусловленное распределением эритроцитов, проявляется в эффектах Фареуса [2] и Фареуса-Линдквиста [3], для которых присуще формирование пристеночного бесклеточного слоя (cell-free layer, CFL) вблизи сосудистой стенки. Этот слой представляет собой обедненную эритроцитами плазму, вязкость которой значительно меньше, чем в ядре потока. Наличие этого слоя вносит существенный вклад в особенности пристеночной гемодинамики, поскольку отражает динамическое положение эритроцитов в сосуде.

Вязкость цельной крови как один из интегральных показателей гемореологии в значительной степени определяет сопротивление кровотоку (резистивность) [4], поэтому учет феномена CFL необходим при моделировании гемодинамических течений вблизи стеноза КА.

Настоящая работа посвящена оценке влияния пристеночного слоя на вязкость крови в моделируемом сосуде со стенозом. Предложенная модель рассматривала кровь как двухкомпонентную среду с дискретной фазой эритроцитов и жидкой фазой плазмы. Полученные результаты были сопоставлены с данными моделирования по однокомпонентной модели для аналогичных гемодинамических условий.

Цель исследования – методом компьютерного моделирования продемонстрировать и оценить вклад пристеночного эффекта в вязкостные свойства крови.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В ходе моделирования исследовался процесс формирования CFL и его влияние на реологию крови с использованием однокомпонентной модели с вязкостью, определяемой уравнением Карро и двухкомпонентной модели Эйлера-Эйлера с дополнительной силой отталкивания частицы от стенки F_W , масштабированной коэффициентом отталкивания C_W .

На рис. 1 представлена схема двумерной вычислительной области, используемой в компьютерных симуляциях.

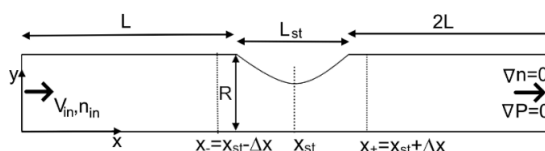


Рис. 1. Схема смоделированного сосуда со стенозом 65%. За счет симметрии задачи, рассматривается только половина сосуда. Рассматриваются $R = 1$ мм, $L = 8$ мм, $L_{st} = 3$ мм и $\Delta x = 2$ мм

Эффект пристеночного слоя был воспроизведен за счет явного учета локальных концентраций клеток крови и использования силы отталкивания эритроцитов от стенки сосуда:

$$\mathbf{F}_W = n\rho_c C_W \frac{\pi d^3}{6} \max\left\{0, \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{D_W}\right)\right\} (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d)^2 \mathbf{N},$$

где d – диаметр частицы, ρ_c – плотность сплошной фазы, $\mathbf{V}_c$ – скорость сплошной фазы, $\mathbf{V}_d$ – скорость дискретной фазы, $\mathbf{F}_W$ – сила отталкивания (сила, с которой эритроциты отталкиваются от стенки сосуда), D_W – расстояние до стенки, на котором действие силы отталкивания прекращается, C_W – коэффициент отталкивания, y – расстояние от центра частицы до стенки, $\mathbf{N}$ – нормальный вектор по отношению к стенке (направлен от стенки в сторону жидкости). Рассматривался случай $C_W = 0$, соответствующий двухкомпонентной модели без силы $\mathbf{F}_W$, и случай $C_W = 0,9$, который дает CFL с толщиной слоя, соответствующей известным экспериментальным работам.

Для сравнительного анализа была выбрана однокомпонентная модель Карро [5], которая успешно используется во многих работах по моделированию кровотока [6]. Эта модель может быть выражена с помощью уравнения для динамической вязкости:

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

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

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

где μ_{min} , μ_{max} – минимальное и максимальное значение динамической вязкости, соответственно, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, n – эмпирическая константа, λ – коэффициент релаксации, τ^* – характерное сдвиговое напряжение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена объемная доля эритроцитов в сосуде, соответствующая двухкомпонентной модели с $C_W = 0$ и $C_W = 0,9$. Видно, что на масштабах радиуса сосуда в обоих случаях распределение гематокрита схоже и близко к равномерному. Заметные отличия наблюдаются в пристеночной области шириной около 15 мкм, где при наличии $\mathbf{F}_W$ объемная доля эритроцитов резко падает, что приводит к формированию зоны CFL (рис. 2а). Непосредственно в области стеноза (рис. 2б) падение давления и ускорение кровотока приводят к истончению CFL и даже полному его исчезновению. После стеноза (рис. 2с) в зоне медленной рециркуляции вновь возникают условия для формирования пристеночного слоя. Более того, поскольку конвективные течения в этой области очень слабы, CFL становится более отчетливым и устойчивым.

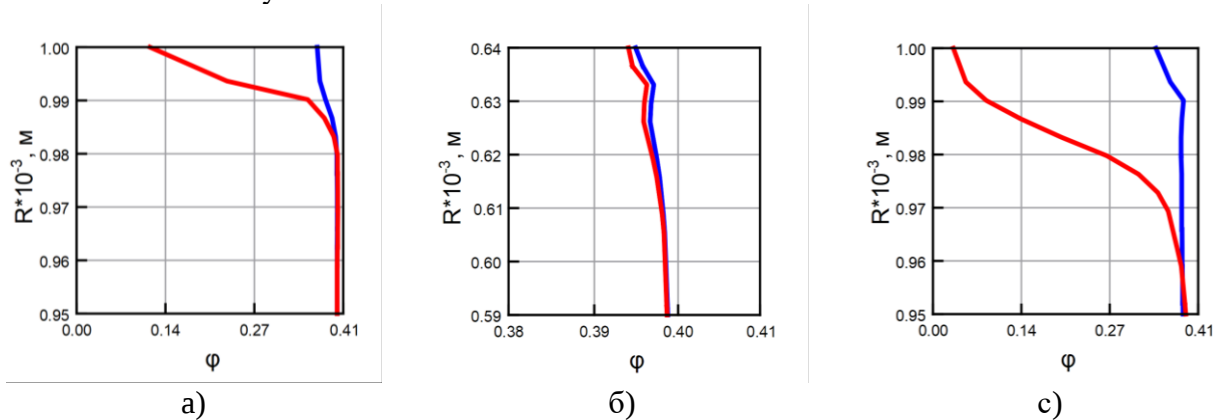


Рис. 2. Зависимость объемной доли эритроцитов ϕ от расстояния до стенки сосуда R . Голубая линия – двухкомпонентная модель с $C_W = 0$; красная линия – двухкомпонентная модель с $C_W = 0,9$. Панели соответствуют сечениям по координате x : а) $x_{st} - \Delta x$, б) x_{st} , в) $x_{st} + \Delta x$

На рис. 3 показаны различия в эффективной вязкости для однокомпонентной и двухкомпонентной моделей. В сечениях до и после стеноза (рис. 3а, в), где формируется CFL, в пристеночной области двухкомпонентная модель дает значительно меньшую вязкость, чем в ядре потока.

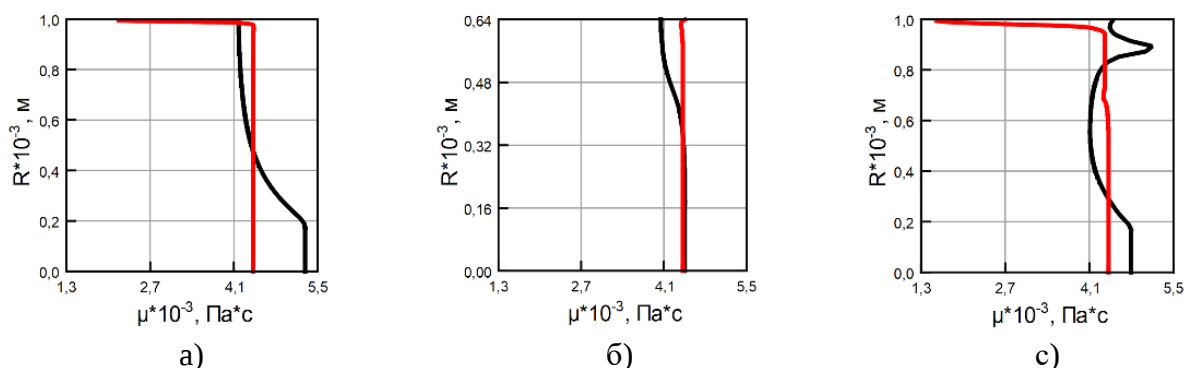


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости μ от расстояния до стенки сосуда R . **Черная линия** – однокомпонентная модель Карро; **красная линия** – двухкомпонентная модель с $C_W = 0,9$. Панели соответствуют сечениям по координате x : а) $x_{st} - \Delta x$, б) x_{st} , в) $x_{st} + \Delta x$

ОБСУЖДЕНИЕ

В нашем исследовании двухкомпонентная модель воспроизводит пристеночный эффект за счет явного учета распределения локальной концентрации эритроцитов и использования силы F_W . Сила F_W , действующая на поверхность клетки, изменяется со временем под влиянием процессов гемодинамики в плазме крови. Это приводит к временным изменениям и асимметричной структуре CFL относительно оси сосуда (рис. 2).

Однокомпонентная модель предполагает однородность среды, исключая слой CFL, поэтому не может предсказать падения вязкости в пристеночной области, поскольку этот эффект вызван локальным изменением гематокрита (рис. 3). Переменная толщина CFL приводит к большим локальным отклонениям в эффективной вязкости (рис. 3; разброс более 100%).

Это приводит как к искажению гемодинамической картины в целом (изменения профиля скорости потока, размера и формы зоны рециркуляции после стеноза, величины сдвиговой скорости и напряжения) [7], так и к альтернативной интерпретации результатов с медицинской точки зрения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная двухкомпонентная модель позволила изучить пристеночный бесклеточный слой, существование которого было отмечено во многих исследованиях. По результатам компьютерного моделирования было показано, что процесс формирования CFL неоднороден по длине сосуда и не стационарен во времени.

Сравнение результатов, полученных с помощью двухкомпонентной и однокомпонентной модели, показало значительную разницу в эффективной вязкости, основной причиной которой является вклад слоя CFL, который имеет значительно меньшую вязкость, чем основная масса крови.

По результатам работы отметим, что эффект пристеночного слоя важный феномен, определяющий реологические свойства крови и играющий существенную роль в гемодинамике КА со стенозом.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mensah, G.A. A heart-healthy and stroke-free world: using data to inform global action / G.A. Mensah, V.Fuster, G.A. Roth // Journal of the American College of Cardiology. – 2023. – Vol. 82, № 25. – P. 2343–2349.
2. Fåhræus, R. The suspension stability of the blood / R. Fåhræus // Physiological Reviews – 1929. – Vol. 9, № 2. – P. 241–274.
3. Fåhræus, R. THE VISCOSITY OF THE BLOOD IN NARROW CAPILLARY TUBES / R. Fåhræus, T. Lindqvist // American Journal of Physiology-Legacy Content – 1931. – Vol. 96, № 3. – P. 562–568.
4. Effect of blood viscosity on the hemodynamic significance of coronary artery stenosis / I. Starodumov, K. Makhaeva, I. Bessonov [et al.] // The European Physical Journal Special Topics. – 2024. – P. 1-11.
5. 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.
6. 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.

Сведения об авторах

К.Е. Махаева* – студент магистратуры

И.О. Стародумов – кандидат физико-математических наук

Ф.А. Бляхман – доктор биологических наук, профессор

Information about the authors

K.E. Makhaeva* – M.S. student

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

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

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

ksenia.makhaeva@urfu.ru

УДК: 537.86

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ: ДИАГНОСТИКА - ДОСТАВКА ЛЕКАРСТВ - КОНТРОЛЬ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Мельников Григорий Юрьевич¹, Бурбан Екатерина Андреевна¹, Свалов Андрей Владимирович¹, Курляндская Галина Владимировна^{1,2}

¹Институт естественных наук и математики

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

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

Аннотация

Введение. Научное сообщество обсуждает возможность использования многофункциональных магнитных материалов для решения биомедицинских задач. В магнитно-резонансной томографии используются препараты на основе гадолиния, обладающие высоким уровнем побочных эффектов. Препараты на основе оксидов железа обладают более высокими магнитными характеристиками, они менее токсичны, но уступают препаратам на основе Gd по характеристикам контрастности. Предпринимаются попытки создания композитов, сочетающих преимущества материалов первого и второго класса. Оценивать концентрацию магнитных частиц в зоне терапии можно с помощью детектора магнитных полей. Однако получение наночастиц типа «ядро-оболочка» (ядро Fe или оксида железа и оболочка Gd или оксида гадолиния) – сложная задача, которую можно решить путем создания многоступенчатой технологии на основе электрофизических методов и механосинтеза. **Материал и методы.** Микрочастицы Gd и наночастицы Fe были подвержены обработке в шаровой мельнице. Магнитные свойства композитов, созданных на основе магнитных частиц и эпоксидной смолы, были проанализированы с использованием вибрационного магнитометра и магнитоимпедансной спектроскопии, а также с использованием методов микромагнитного моделирования. **Результаты.** Было установлено, что для полосковых чувствительных элементов $[\text{FeNi/Cu}]_5(\text{Cu})[\text{Cu/FeNi}]_5$ существует линейная зависимость магнитоимпедансного эффекта от концентрации микрочастиц в эпоксикомпозите. **Выводы.** Методами механосинтеза получены партии магнитных композитов на основе Fe и Gd. Показано, что концентрация магнитного наполнителя в биокомпозитах на их основе может быть определена бесконтактно с использованием детектора ГМИ. Методами микромагнитного моделирования рассчитаны петли магнитного гистерезиса магнитных композитов на основе железа и гадолиния, что может быть полезно при их дальнейшем использовании в биодетекторах.

Ключевые слова: магнитные частицы, магнитное биодетектирование, микромагнитное моделирование, механосинтез.

MAGNETIC MATERIALS FOR SOLVING COMPLEX MEDICAL PROBLEMS: DIAGNOSTICS - DRUG DELIVERY - THERAPY MONITORING USING MAGNETIC FIELDS

Mel'nikov Grigory Yurievich¹, Burban Ekaterina Andreevna¹, Svalov Andrey Vladimirovich¹, Kurlyandskaya Galina Vladimirovna^{1,2}

¹Institute of Natural Sciences and Mathematics

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

²Ural State Medical University
Yekaterinburg, Russia