

УДК 544.015.4/.5 +541(64+77)+66.095.262.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ КРОВИ ПО СЕЧЕНИЮ СОСУДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭРИТРОЦИТОВ

© Виктор Борисович Федосеев

ФГБУН Институт металлорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии
наук, Нижний Новгород, Россия

ybfedoseev@yandex.ru

Аннотация. Методом численного моделирования описана зависимость стационарного распределения компонентов крови по сечению цилиндрического потока Пуазейля от содержания эритроцитов. Использован термодинамический подход, в котором дисперсные фазы представлены совокупностью клеточных компонентов (эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов), а плазма крови рассматривается как низкомолекулярная дисперсионная среда. Моделирование основано на поиске минимума полной энергии системы, включающей химические потенциалы и кинетическую энергию всех компонентов. Этому состоянию соответствует единственное решение, описывающее согласованные распределения всех компонентов многофазного потока по сечению. Смоделированы распределения компонентов, при котором содержание лейкоцитов, и тромбоцитов соответствует нормальному, нормальному, патологически низкому (эритропения) или высокому (эритроцитоз) содержанию эритроцитов. В качестве примера рассмотрено течение Пуазейля в сосуде диаметром 1 мм со скоростью сдвига 10 c^{-1} . Согласно результатам моделирования отклонение количества эритроцитов от нормы приводит к перераспределению по сечению потока других компонентов (лейкоцитов и тромбоцитов). При низком количестве эритроцитов концентрация тромбоцитов и лейкоцитов максимальна в окрестности стенок сосуда. С ростом количества эритроцитов максимумы концентрации тромбоцитов и лейкоцитов смещаются к центру сосуда и доля эритроцитов у стенок сосуда возрастает.

Ключевые слова: многофазные течения, стратификация потока, кровеносный сосуд, эритропения, эритроцитоз.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института металлоорганической химии РАН.

DISTRIBUTION OF BLOOD COMPONENTS ALONG THE CROSS-SECTION OF THE VASCULAR DEPENDING ON THE CONCENTRATION OF ERYTHROCYTES

© Victor B. Fedoseev

Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia

ybfedoseev@yandex.ru

Abstract. *The dependence of the stationary distribution of blood components over the cross section of the cylindrical Poiseuille flow on the content of erythrocytes is described by the method of numerical simulation. A thermodynamic approach was used, in which dispersed phases are represented by a set of cellular components (erythrocytes, leukocytes, platelets), and blood plasma is considered as a low molecular weight dispersion medium. The simulation is based on the search for the minimum of the total energy of the system, including the chemical potentials and kinetic energy of all components. This state corresponds to the only solution describing the consistent distributions of all components of the multiphase flow over the section. Distributions of components were simulated, in which the content of leukocytes and platelets corresponds to the normal, for cases of normal, pathologically low (erythropenia) and high (erythrocytosis) content of erythrocytes. As an example, the Poiseuille flow in a vessel 1 mm in diameter with a shear rate of 10 s^{-1} is considered. According to the simulation results, the deviation of the number of erythrocytes from the norm leads to redistribution over the cross section of the flow of other components (leukocytes and platelets). The concentration of platelets and leukocytes has maximum values in the vicinity of the vessel walls with a low number of erythrocytes. When the number of red blood cells increases, maxima concentration of platelets and white blood cells are shifted to the center of the vessel and the proportion of red blood cells near the vessel walls increases.*

Keywords: *multiphase flows, stream stratification, blood vessel, erythropenia, erythrocytosis.*

Acknowledgements. *This work was carried out within the framework of the state assignment of the Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS.*

Введение. Влияние различных факторов на реологию и структуру потока крови является предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [1–5]. Исследования однозначно показали, что концентрация клеток по сечению сосуда неоднородна, а изменение состава крови существенно влияет на распределение клеток по сечению сосуда [5–7]. Существует связь подобных эффектов с состоянием организма, обсуждается в [4,8]. Как отмечено во многих работах и обзорах, одной из основных проблем при экспериментальном и теоретическом моделировании является ограничение состава модельной среды. Обычно рассматриваются потоки плазмы крови, содержащие не более одного или двух типов клеток. Другой проблемой является неоднородность вязкости течения и существенное отклонение реального профиля скоростей в потоке крови от характерного для течения Пуазейля параболического [9–11].

Предлагаемый термодинамический подход позволяет решить эти проблемы. Прежде всего он предлагает описание стационарных распределений компонентов в ламинарных потоках произвольного состава с разными профилями скорости [12–14]. Это снимает ограничения на качественный состав компонентов крови и, в перспективе, позволяет учесть распределение по размерам для клеток разного типа. Этот подход ранее был использован для описания поведения многокомпонентных систем с химическими и фазовыми превращениями в условиях центробежного, гравитационного, акустического полей [15–17] и двухфазных течений в геологии [18]. Термодинамический подход основан на инвариантности суммы химического потенциала и потенциальной энергии компонентов во внешнем поле. Гиббс показал, что инвариантность этой суммы является одним из критериев термодинамического равновесия [19]. Для ламинарных потоков инвариантность механохимических потенциалов компонентов по сечению потока соответствует компенсации сил, вызывающих

поперечную миграцию частиц, которые определяются градиентом химических потенциалов и градиентом кинетической энергии [13,14].

Кровь является многокомпонентной дисперсной системой, содержащей компоненты с разными размерами, с близкими к нейтральной плавучестями (плотность клеток и плазмы крови сопоставима). Моделирование структуры потока крови методами гидродинамики является весьма сложной, трудоёмкой и пока не решённой задачей. Термодинамический подход [12–14] к задачам гемодинамики может быть использован как самостоятельно, так и в качестве дополнения к методам гидродинамики. Основным преимуществом термодинамического подхода является возможность рассмотрения взаимного распределения произвольного множества дисперсных и низкомолекулярных компонентов крови, включая чужеродные. Это делает доступной постановку задач разной сложности, связанных с моделированием реакции кровеносной системы на изменение состава крови и условий течения.

Применение термодинамического подхода для моделирования течения крови в сосудах описано в [12]. Результатом расчёта являются распределения компонентов крови по сечению сосуда, учитывающие множество факторов, включающих свойства компонентов (размер, плотность) и характеристики потока (скорость сдвига, диаметр сосуда). Характеристики потока использованы как параметры расчёта. В отличие от них свойства компонентов, используемые при моделировании (плотность и размеры клеток) не являются однозначными параметрами расчёта, так как различаются в зависимости от пола, возраста и состояния организма и могут меняться в заметных пределах [20,21]. Это осложняет обобщение результатов моделирования, но позволяет анализировать дополнительные закономерности, связанные с вариацией свойств отдельных компонентов крови.

Выявление простых закономерностей является одной из стратегий при анализе столь сложного и многофакторного объекта как кровеносная система. В данной работе рассматривается влияние на структуру потока крови количества эритроцитов. Другой задачей работы является демонстрация результатов применения термодинамического подхода [12] при моделировании течения многокомпонентного потока на примере достаточно хорошо исследованной дисперсной системы.

Параметры, использованные при моделировании потока крови. Отклонение количества эритроцитов от нормы (эритропения и эритроцитоз) является признаком ряда заболеваний, результатом стресса или высоких нагрузок. Модель [12] позволяет описать реакцию кровеносной системы на изменение количества эритроцитов. Переход между нормальными и патологическими состояниями моделируется изменением количества эритроцитов при условии, что количество остальных компонентов удерживается в пределах нормы. Рассматривается цилиндрический поток Пуазейля со скоростью сдвига 10 с^{-1} в сосуде диаметром 1 мм.

Характеристики компонентов крови не являются константами, поэтому при моделировании использованы средние значения; плотность плазмы – 1,026 г/мл, плотность клеток для тромбоцитов эритроцитов моноцитов лимфоцитов нейтрофилов соответственно – 1,058, 1,1, 1,062, 1,07, 1,082 г/см³. Диаметр клеток в той же последовательности составляли 3, 7, 10,5, 7, 10,5 микрон. В отличие от [12], где объём клеток был грубо оценен как диаметр клетки в кубе, используется более точная оценка объёма, предполагающая сферическую форму всех клеток кроме эритроцитов, которые представлены как диски толщиной 2,5 мкм. Других отличий использованная модель не имеет. Концентрация клеток считалась нормальной, если интегральное по сечению количество клеток попадало в интервал для тромбоцитов 280–500

$\times 10^9$, для эритроцитов $3500\text{--}5400 \times 10^9$, для моноцитов $300\text{--}600 \times 10^6$, для лимфоцитов $1000\text{--}4000 \times 10^6$, для нейтрофилов $3000\text{--}6000 \times 10^6$ клеток на литр [21].

Результаты моделирования. Результаты моделирования представлены на рисунках 1–4. Они демонстрируют состояния, соответствующие нормальному составу крови, эритропении и эритроцитозе. Все приведённые на графиках распределения нормированы на максимальное значение концентрации и ограничены минимальным, при этом величина Δn (как и Δx на рис. 4) безразмерна и ограничена условием $0 \leq \Delta n \leq 1$. Координата $q = r/d$ соответствует радиусу r , также нормированному на диаметр сосуда d . Это позволяет сопоставлять между собой результаты, полученные для разных условий. Отношение минимальной и максимальной по сечению сосуда концентрации характеризует неоднородность распределения и подчиняется ранее описанной закономерности [13]: оно тем больше, чем крупнее движущиеся в потоке частицы. В соответствии с этим тромбоциты имеют более однородное распределение (отношение минимальной концентрации к максимальной выше) и приближается к 1 для ещё более мелких компонентов (вирусов, макромолекул, низкомолекулярных соединений).

Для нормального состава крови распределение компонентов имеет вид, показанный на рисунке 1.

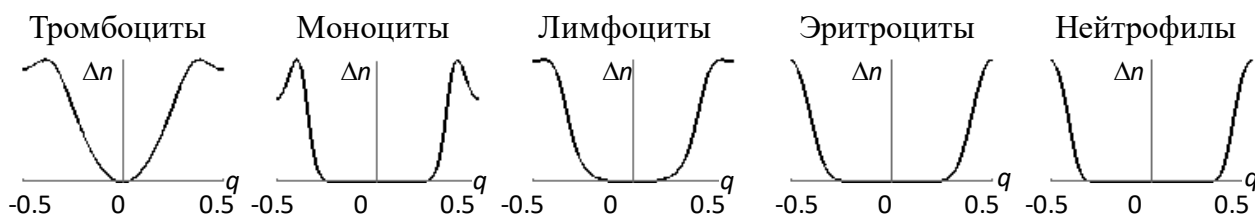


Рис. 1. Распределение клеток крови по сечению сосуда при нормальном количестве эритроцитов (3800×10^9 /л)

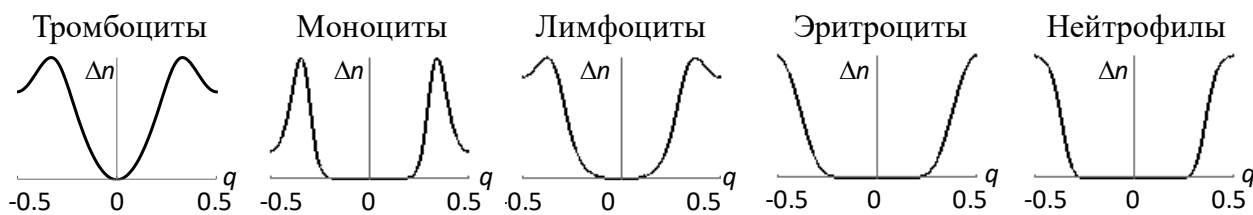


Рис. 2. Распределение клеток крови по сечению сосуда при высоком количестве эритроцитов (7000×10^9 /л)

При увеличении количества эритроцитов распределения меняют вид (см. рис. 2). Максимумы концентрации тромбоцитов, моноцитов и лимфоцитов становятся более высокими и удаляются от стенок сосуда. При этом в результате расхождения максимумов распределения лейкоцитов разного типа лейкоцитарная формула по сечению сосуда меняется.

При снижении количества эритроцитов (см. рис. 3) концентрация всех компонентов максимальна в окрестности стенок сосуда.

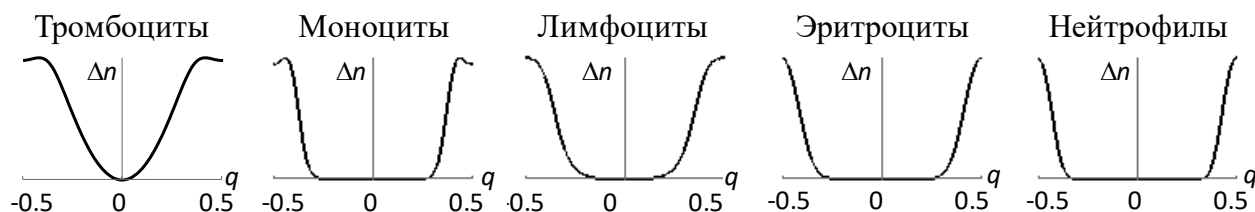


Рис. 3. Распределение клеток крови по сечению сосуда при низком количестве эритроцитов (2400×10^9 /л)

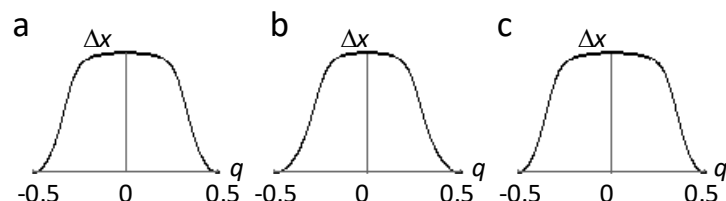


Рис. 4. Относительное изменение концентрации (мольной доли) плазмы крови по сечению сосуда при нормальном содержании эритроцитов (а), эритроцитозе (б) и эритропении (с)

Концентрация плазмы как низкомолекулярного компонента практически отличается от 1 на исчезающе малую величину, поэтому на рис.4 приведена величина $-\lg(1-x)$, где x – мольная доля. При эритроцитозе (рис. 4,б) вытеснение тромбоцитов и лейкоцитов от стенок (см. рис. 2) суживает это распределение, при эритропении (рис. 4,с) распределение чуть шире, чем при нормальном состоянии (рис. 4,а). Следствием различий концентрации плазмы должны быть соответствующие отклонения реального профиля скорости от параболического (для течения Пуазейля).

На основе ряда предположений о зависимости вязкости от градиента скорости в работе [10] показано, что распределение скорости жидкости в поперечном сечении существенно отличается от параболического профиля ньютоновской жидкости. Указывается, что при течении неньютоновской жидкости ее особенности не исчезают никогда, лишь область неньютоновского течения сужается, локализуясь в окрестности максимума скорости. Смоделированные в работах [10,11] профили скорости течения неньютоновской жидкости со свойствами крови коррелируют с распределениями концентрации плазмы (см. рис. 4), на основе которых при моделировании вычисляется распределение давления (вязких напряжений) по сечению сосуда [12]. Это позволяет моделировать течения крови с более сложными профилями скорости, чем течение Пуазейля.

Список литературы

1. Медведев И.Н., Савченко А.П., Завалишина С.Ю., и др. Методические подходы к исследованию реологических свойств крови при различных состояниях // Российский кардиологический журнал. – 2009. – Т. 5, № 79. – С. 42-45.
<https://russjcardiol.elpub.ru/jour/article/view/1385/1109>
2. Minetti C., Audemar V., Podgorski T., et al. Dynamics of a large population of red blood cells under shear flow. // J Fluid Mech. – 2019. – V. 864. – P. 408-448. DOI:10.1017/jfm.2019.42.
3. Ku D.N. Blood flow in arteries // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1997. – V. 29, № 1. – P. 399-434. DOI:10.1146/annurev.fluid.29.1.399.

4. Токарев А.А., Бутылин А.А., Атауллаханов Ф.И. Транспорт и адгезия тромбоцитов в сдвиговом потоке крови: роль эритроцитов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 185-200.
http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=crm&paperid=479&what=fullt&option_lang=rus
5. Goldsmith H.L. Poiseuille Medal Award Lecture: From papermaking fibers to human blood cells // Biorheology. – 1993. – Vol. 30, № 3-4. – P. 165-190. DOI:10.3233/BIR-1993-303-404.
6. Gijzen F.J.H. Mechanical aspects of blood-wall int effraction: wall shear stress measurement. WFW-report. – 1995. – 40 p. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4258771/449457.pdf>
7. Aarts P.A., van den Broek S.A., Prins G.W., et al. Blood platelets are concentrated near the wall and red blood cells, in the center in flowing blood // Arteriosclerosis – 1988. – V. 8, № 6. – P. 819-824. DOI:10.1161/01.ATV.8.6.819.
8. Токарев А.А. Реология тромбоцитарного звена гемостаза: вытеснение тромбоцитов из ядра потока к стенкам сосудов обеспечивается рикошетными столкновениями с эритроцитами // Тромбоз, гемостаз и реология. – 2007. – № 4(32). – P. 39-47.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=13058834>
9. Медведев А.Е. Двухфазная модель течения крови в крупных и мелких кровеносных сосудах // Математическая биология и биоинформатика. – 2011. – Т. 6, № 2. – P. 228-249.
<http://mi.mathnet.ru/rus/mbb/v6/i2/p228>
10. Приданов В.Г., Хоничев В.И. К вопросу о течении неньютоновской жидкости // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 11. – P. 11-14.
<https://journals.ioffe.ru/articles/10739>
11. Пак В. В. Комплексная численная модель медленного течения многофазной жидкости //Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, №. 2. – С. 150-160.
DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.2.12](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.12).
12. Федосеев В.Б.. Распределение компонентов крови в потоке Пуазейля // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 3. – P. 390-397.
DOI:10.15593/RZhBiomeh/2020.3.10.
13. Федосеев В. Б. Стратификация двухфазной монодисперсной системы в плоском ламинарном потоке // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 149, №. 5. – С. 1057-1067. DOI:10.7868/S004445101605014X.
14. Федосеев В. Б. Поведение тела, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, в плоском потоке Куэтта и Пуазейля // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, №. 4. – С. 13-19. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41647>.
15. Абакумов Г. А., Федосеев В. Б. Влияние центробежных (гравитационных) полей на гомогенное химическое равновесие. Эффект формы сосуда // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 365. – С. 608-610.
16. Абакумов Г.А., Федосеев В.Б. Равновесие жидкость-пар в центробежном поле. Бинарные системы в сосудах с общей газовой фазой // Журнал физической химии. – 2004. – Т. 78, №. 3. – С. 563-570.
17. Абакумов Г.А., Федосеев В.Б. Экстракция в условиях сильного центробежного поля // Журнал физической химии. – 2005. – Т. 79, № 9. – С. 1705–1708.
18. Савельев Д. Е., Федосеев В. Б. Твёрдофазное перераспределение минеральных частиц в восходящем мантийном потоке как механизм концентрации хромита в офиолитовых ультрамафитах (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) //Георесурсы. – 2019. – Т. 21, №. 1 – С:31–46. DOI:10.18599/grs.2019.1.31-46.

19. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substances // American Journal of Science. – 1878. – Vols. 3-16, № 96. – P. 441-458. DOI:10.2475/ajs.s3-16.96.441.
20. NAPIER. Guide to the Preparation, Use and Quality Assurance of Blood Components. – 2017. 540 p. DOI:10.1046/j.1365-3148.1998.00155.x.
21. Kim E. Barrett, Brooks H.L., Barman S.M., et al. Ganong's Review of Medical Physiology. 26th ed. // Journal of Chemical Information and Modeling. – McGraw-Hill Education; – 2019 – 1792 p. <https://www.pdfdrive.com/ganongs-review-of-medical-physiology-24th-edition-e165947167.html>.
22. Baskurt O. K., Meiselman H. J. Blood rheology and hemodynamics // Seminars in thrombosis and hemostasis. – Copyright© 2003 by Thieme Medical Publishers, Inc., 333 Seventh Avenue, New York, NY 10001, USA. Tel.:+ 1 (212) 584-4662, 2003. – V. 29, №. 05. – P. 435-450. DOI:10.1055/s-2003-44551.
23. Ирискулов Б.У., Юлдашева Д.Д. Скорость сдвига потока крови и ее динамическая вязкость при экспериментальном гипертиреозе // Международный эндокринологический журнал. – 2011. – № 4. – С. 70-72. <https://cyberleninka.ru/article/n/skorost-sdviga-potoka-krovi-i-ee-dinamicheskaya-vyazkost-pri-eksperimentalnom-gipertireoze/pdf>
24. Рахимов А. А., Бурдюк Ю. В., Ахметов А. Т. Особенности течения крови в капиллярах при малых перепадах давления // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №. 3. – С. 416-424. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17822656>.
25. Чумакова С. П. и др. Особенности физиологии эритроцитов. Гемолиз и эриптоз // Гематология и трансфузиология. – 2018. – Т. 63, №. 4. DOI:10.25837/HAT.2019.51.80.003.

References

1. Medvedev I.N., Savchenko A.P., Zavalishina S.Yu., et al. Methodology of blood rheology assessment in various clinical situations. Russian Journal of Cardiology. – 2009. – V.5, № 79: – P. 42–45. <https://russjcardiol.elpub.ru/jour/article/view/1385/1109>. (In Russian)
2. Minetti C., Audemar V., Podgorski T., et al. Dynamics of a large population of red blood cells under shear flow. // J Fluid Mech. – 2019. – V. 864. – P. 408-448. DOI:10.1017/jfm.2019.42.
3. Ku D.N. Blood flow in arteries // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1997. – V. 29, № 1 – P. 399-434. DOI:10.1146/annurev.fluid.29.1.399.
4. Tokarev A.A., Butylin A.A., Ataullakhanov F.I. Platelet transport and adhesion in shear blood flow: the role of erythrocytes. Computer Research and Modeling, – 2012 – V.4, №1 – P. 185–200. DOI: 10.20537/2076-7633-2012-4-1-185-200. (In Russian)
5. Goldsmith H.L. Poiseuille Medal Award Lecture: From papermaking fibers to human blood cells // Biorheology. – 1993. – V. 30, № 3-4. – P. 165-190. DOI:10.3233/BIR-1993-303-404.
6. Gijzen F.J.H. Mechanical aspects of blood-wall int effraction: wall shear stress measurement. WFW-report. – 1995. – 40 p. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4258771/449457.pdf>
7. Aarts P.A., van den Broek S.A., Prins G.W., et al. Blood platelets are concentrated near the wall and red blood cells, in the center in flowing blood // Arteriosclerosis – 1988. – V. 8, № 6. – P. 819-824. DOI:10.1161/01.ATV.8.6.819.
8. Tokarev A.A. Platelet haemostasis rheology: platelet displacement from flow core to vessel walls is the result of rebound collisions with erythrocytes. Tromboz, gemostaz i reologiya. – 2007 – 4 – 32: – P. 39–47. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13058834> (In Russian).
9. Medvedev A. E. A two-phase model of blood flow in large and small blood vessels // Matematicheskaya Biologiya i Bioinformatika. – 2011. – V. 6, №. 2. – P. 228-249.. DOI:10.17537/2011.6.228. 2011;6(2):228–49. (In Russian)
10. Pridanov V. G., Khonichev V. I. Flow of a non-Newtonian fluid // Technical Physics. – 2012. – T. 57, №. 11. – С. 1475-1478. DOI: 10.1134/S1063784212110229.

11. Pak V.V. Numerical coupled model of creeping flow of multi-phase fluid Computational Continuum Mechanics. – 2020. – V. 13, №. 2. – P. 150-160. DOI:10.7242/1999-6691/2020.13.2.12. (In Russian)
12. Fedoseev V.B. Distribution of blood components in the poiseuille flow. Russ J Biomech. – 2020 – V. 24, №3. – P. 336–342. DOI:10.15593/RJBiomech/2020.3.10.
13. Fedoseev V. B. Stratification of a two-phase monodisperse system in a plane laminar flow // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2016. – V. 122, №. 5. – P. 915-924. DOI:10.1134/S1063776116040142.
14. Fedoseev V. B. Behavior of a solid rectangular parallelepiped in the 2D Couette and Poiseuille flows // Technical Physics. – 2015. – V. 60, №. 4. – P. 489-496. DOI:10.1134/S106378421504009X.
15. Abakumov G. A., Fedoseev V. B. The effect of centrifugal (gravitational) fields on a homogeneous chemical equilibrium: The vessel-shape effect // Doklady Physics. – 1999. – V. 44, №. 4. – P. 205-208.
16. Abakumov G. A., Fedoseev V. B. Liquid-vapor equilibrium in a centrifugal field: Binary systems in vessels with common gas phase // Russian journal of physical chemistry – 2004. – V. 78, №. 3. – P. 472-479.
17. Abakumov G.A., Fedoseev V.B. Extraction in a Strong Centrifugal Force Field // Russian journal of physical chemistry –. 2005. – V. 79(9). - P. 1514–7.
18. Saveliev D.E., Fedoseev V.B. Solid-state redistribution of mineral particles in the upwelling mantle flow as a mechanism of chromite concentration in the ophiolite ultramafic rocks (by the example of Kraka ophiolite, the Southern Urals). Georesursy = Georesources, 2019;21(1):31–46. DOI:10.18599/grs.2019.1.31-46
19. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substances // American Journal of Science. – 1878. – Vols. 3-16, № 96. – P. 441-458. DOI:10.2475/ajs.s3-16.96.441.
20. NAPIER. Guide to the Preparation, Use and Quality Assurance of Blood Components. – 2017. 540 p. DOI:10.1046/j.1365-3148.1998.00155.x.
21. Kim E. Barrett, Brooks H.L., Barman S.M., et al. Ganong's Review of Medical Physiology. 26th ed. // Journal of Chemical Information and Modeling. – McGraw-Hill Education; – 2019 – 1792 p. <https://www.pdfdrive.com/ganongs-review-of-medical-physiology-24th-edition-e165947167.html>.
22. Baskurt O. K., Meiselman H. J. Blood rheology and hemodynamics // Seminars in thrombosis and hemostasis. – Copyright© 2003 by Thieme Medical Publishers, Inc., 333 Seventh Avenue, New York, NY 10001, USA. Tel.:+ 1 (212) 584-4662, 2003. – V. 29, №. 05. – P. 435-450. DOI:10.1055/s-2003-44551.
23. Iriskulov B.U, Iuldasheva. D. D. Skorost` sdviga potoka krovi i ee dinamicheskaya vyzkost` pri e`ksperimental`nom gipertireoze // Mezhdunarodny`i e`ndokrinologicheskii` zhurnal. – 2011. – № 4. – P. 70-72. (In Russian) <https://cyberleninka.ru/article/n/skorost-sdviga-potoka-krovi-i-ee-dinamicheskaya-vyazkost-pri-eksperimentalnom-gipertireoze/pdf>
24. Rakhimov A.A., Burdyuk Yu.V., Akhmetov A.T. Features of blood flow in capillaries at low differential pressure. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – 2012 – № 3 – P. 415-424. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17822656>
25. Chumakova S.P., Urazova O.I., Zima A.P., Novitskiy V.V. Features of the physiology of erythrocytes. Hemolysis and eryptosis. Russian journal of hematology and transfusiology – 2018 – V. 63, № 4 – P. 343–351. DOI:10.25837/HAT.2019.51.80.003. . (In Russian)

Дата поступления: 10 сентября 2021 г.