

О ВАЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ В МЕДИЦИНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРОВИ ПРИ ЕЕ ТЕЧЕНИИ ПО СОСУДАМ МАЛОГО КАЛИБРА

Ельцов Анатолий Викторович,

доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры математики, физики и медицинской информатики Рязанского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова

Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова

 a.eltsov@rsu.edu.ru

Зозуля Иван Леонидович,

студент

Рязанский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова

 zozulya02@list.ru

АННОТАЦИЯ

В статье описаны реологические свойства крови при ее течении по сосудам малого калибра. Отмечена важность изучения данного материала в курсе физики медицинского университета. Проиллюстрированы основные закономерности для течения ньютоновских и неньютоновских жидкостей по различным сосудам. Показано как меняется профиль скорости течения крови по сосудам малого калибра. Изучение свойств крови, как неньютоновской жидкости, является очень важным фактором для формирования необходимых профессиональных компетенций у студентов медицинских университетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *физика, реология, неньютоновская жидкость, кровь, эритроциты, вязкость.*

ON THE IMPORTANCE OF STUDYING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BLOOD AT THE MEDICAL UNIVERSITY DURING ITS FLOW THROUGH SMALL-CALIBER VESSELS.

Yeltsov A. V.,

*Professor, Chair of Mathematics, Physics and Medical Information Technology,
Ryazan State Medical University named after Academician Ivan Pavlov*

Zozulya I. L.,

student

Ryazan State Medical University named after academician I. P. Pavlova

ABSTRACT

The article describes the rheological properties of blood during its flow through small-caliber vessels. The importance of studying this material in the course of physics studies at the Medical University is noted. The main regularities for the flow of Newtonian and non-Newtonian fluids through various vessels are illustrated. It is shown how the profile of blood flow velocity through small-caliber vessels changes. The study of the properties of blood as a non-Newtonian fluid is a very important factor for the formation of the necessary professional competencies in medical students.

KEYWORDS: *physics, rheology, non-Newtonian fluid, blood, erythrocytes, viscosity.*

В настоящее время первое место в мире по причинам смертности населения являются заболевания сердечно-сосудистой системы, среди которых наиболее распространены ишемическая болезнь сердца и инсульт. Большинство этих заболеваний имеют в основе своей нарушение кровообращения, связанное с изменением скорости течения жидкости по сосудам различного диаметра.

В гидродинамике и гемодинамике для стационарного ламинарного течения идеальной несжимаемой жидкости (не имеющей внутреннего трения) по трубам переменного сечения справедливо два основных

уравнения гидродинамики: уравнение неразрывности $Q = V/t = vS$ где: V — объем жидкости протекающий за время t , через площадь поперечного сечения трубы S , со скоростью v , и уравнение Бернулли:

$$P + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = const$$

согласно которому, полное давление жидкости одинаково во всех точках.

В реальных жидкостях изучаемые законы закономерности течения жидкости усложняются вследствие наличия сил внутреннего трения — вязкости. В результате наличия этого трения в жидкостях происходит выравнивание скоростей движения различных слоев жидкости, если эти скорости различны и жидкость предоставлена сама себе. Это выравнивание скоростей происходит благодаря тому, что молекулы из слоя с большей скоростью переносят упорядоченный импульс этого слоя к слою, движущемуся с меньшей скоростью и, следовательно, скорость последнего увеличивается. Изменение же скорости слоя жидкости, согласно второму закону динамики, свидетельствует о подействовавшей на него силе, которую называют силой внутреннего трения. Таким образом, вязкость как физическое явление, связана с возникновением сил трения между слоями жидкости, перемещающимися друг относительно друга с различными по величине скоростями. И. Ньютон экспериментально установил, чем больше различие между скоростями этих слоев и чем больше площадь их соприкосновения, тем больше сила внутреннего трения.

Для большинства жидкостей коэффициент вязкости η зависит только от природы жидкости и температуры. Такие жидкости называются ньютоновскими, их движение описывается законом Пуазейля:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi(P_1 - P_2)R^4}{8\eta L}$$

где P_1 и P_2 давления на концах сосуда диаметром R и длиной L , η — динамический коэффициент вязкости.

У некоторых жидкостей, преимущественно высокомолекулярных коэффициент вязкости зависит также от режима течения (давления, градиента скорости и т. д.). Такие жидкости называют неньютоновскими или структурно — вязкими. Их вязкость характеризуют так называемым условным коэффициентом вязкости, который относится к определенным условиям течения жидкости. Типичная неньютоновская жидкость — это кровь. Гемореология изучает механические закономерности, в особенности как изменяются физколлоидные свойства крови при циркуляции с различной скоростью на разных участках русла сосудов. Когда линейная скорость течения крови мала, кровяные частицы перемещаются параллельно оси сосуда и друг другу. В таком случае течение слоев будет ламинарным. В случае увеличения линейной скорости крови и превышения определенной величины, различной для всех сосудов, ламинарное течение превращается в вихревое, беспорядочное, называемое турбулентным. Скорость перехода ламинарного движения в турбулентное определяет число Рейнольдса, составляющее для кровеносных сосудов приблизительно 1160. По данным о числах Рейнольдса, турбулентность возникает в тех местах, где ветвятся крупные сосуды, а также в аорте, по большинству сосудов кровь движется ламинарно.

Кровь представляет суспензию форменных элементов в белковом растворе — плазме. При течении крови по многим сосудам наблюдается концентрация форменных элементов в центральной части потока, где вязкость соответственно увеличивается. В ряде случаев при анализе гемодинамики считают коэффициент вязкости крови приблизительно постоянной средней величиной по всему сечению кровеносного сосуда. Изучение физических принципов движения крови по сердечно-сосудистой системе, в частности, по сосудам диаметром менее 200 мкм (артериолы, капилляры, вены) позволит лучше понимать причины развития некоторых патологий, а также устранять их. Вязкость крови зависит от температуры, химического состава, давления и градиента скорости. В свою очередь градиент скорости

зависит от гематокрита (объемной доли эритроцитов в крови) и организации эритроцитов в кровотоке (при скоростях сдвига $< 100 \text{ с}^{-1}$ происходит агрегация эритроцитов и образование стопок, что увеличивает вязкость крови, причем эритроциты полностью не слипаются из-за отрицательных зарядов их мембран, благодаря чему они и могут распадаться). Профиль скорости течения крови отличается от Пуазейлевского.

При движении крови по сосудам малого калибра формируется двухфазная жидкость, состоящая из пристеночного слоя плазмы, имеющего малую вязкость и свойства ньютоновской жидкости, и приосевого слоя с высоким содержанием эритроцитов, ведущего себя как неньютоновская жидкость. Изучение реологических свойств крови в сосудах разных калибров затрудняется тем, что при попытке проводить эксперименты *in vitro* в сосудах диаметром менее 40 мкм происходит закупорка стеклянных трубочек, хотя в живом организме закупорки не наблюдается даже при диаметре капилляра 5 мкм, что меньше диаметра эритроцита.

Существует множество математических моделей, описывающих движение крови по сосудам малого калибра как двухфазной жидкости. Однако все они дают результаты лишь приближительные к экспериментальным данным, поэтому не существует универсальных формул, точно описывающих реологические особенности крови в сосудах малого калибра. При движении крови по сосудам диаметром меньше 200 мкм наблюдаются аномальные эффекты течения крови. Так как рассматриваемый интервал диаметров сосудов достаточно мал, рассматриваться будет ламинарное движение крови.

Пристеночный и приосевой эффекты заключаются в образовании бесклеточного слоя вблизи стенки сосуда, и большого скопления форменных элементов вблизи оси сосуда. Помимо эритроцитов, сдвиговой диффузии и, как следствие, возрастанию концентрации клеток крови от стенки к оси сосуда подвергаются так же и другие форменные элементы, но эритроциты рассматриваются чаще всего потому, так как они представляют собой самые многочисленные

образования. Имеется формула для определения толщины безэритроцитарного слоя, выведенная из геометрических соображений. Согласно ней относительная ширина безэритроцитарного слоя не зависит от показателя гематокрита, а зависит только от диаметра сосуда:

$$h = 1 + \frac{d_{min}}{2r_0} - \sqrt{1 - \left(\frac{d_{max}}{2r_0}\right)^2},$$

где d_{min} и d_{max} — максимальный и минимальный размер эритроцита, r_0 — радиус просвета кровеносного сосуда.

Частота столкновений форменных элементов является лишь одним из возможных объяснений сдвиговой диффузии. (Рис. 1)

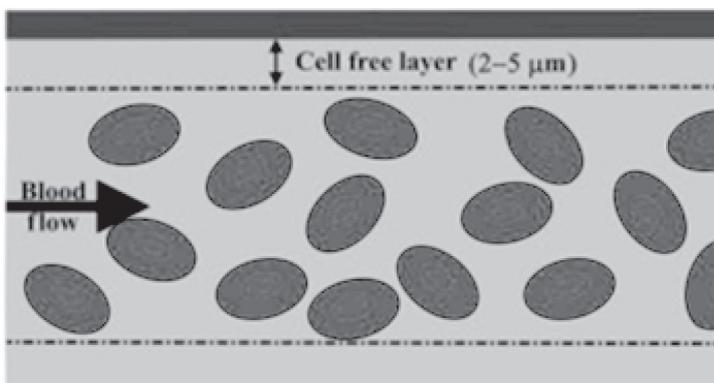


Рис. 1. Сдвиговая диффузия эритроцитов

Эффект Фареуса — явление, при котором наблюдается уменьшение показателя гематокрита с уменьшением диаметра сосуда. Объясняется это тем, что пристеночный слой крови движется быстрее, чем пристеночный, в результате чего объем красных кровяных телец в крови сосуда малого калибра уменьшается. Под влиянием градиента давления форменные элементы обгоняют плазму крови. (Рис. 2).



Рис. 2 Эффект Фареуса

Это связано с более тупой формой вершины параболы профиля скорости, по сравнению с пуазейлевским. В результате чего, довольно широкий участок центрального приосевого слоя движется примерно с одинаковой скоростью и быстрее, чем пристеночный слой плазмы, причем, чем меньше диаметр просвета сосуда, тем вершина параболы становится более тупой профиль скорости (Рис. 3).

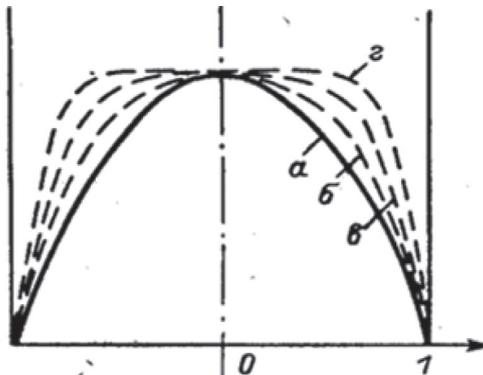


Рис. 3. Параболический профиль скорости эритроцитов, а – пуазейлевский, б, в, г — профили скорости наблюдаемые для суспензии эритроцитов в сосудах разного радиуса 40 (мкм), 25 (мкм), 15 (мкм) — соответственно.

Существует множество математических решений этого эффекта, они довольно сложны, и потому рассматривать их в данной статье мы не будем. Эффект Фареуса–Линдквиста — явная зависимость вязкости крови от диаметра кровеносного сосуда (Рис. 4).



Рис. 4. Зависимость кажущейся вязкости крови от диаметра кровеносного сосуда

Этот эффект связан с образованием пристеночного и приосевого слоев, в результате которых, вблизи стенок сосуда возникает слой безклеточной плазмы, имеющей свойства ньютоновской жидкости с достаточно малой вязкостью. Благодаря этому при уменьшении диаметра сосуда менее 200 мкм кажущаяся вязкость крови также уменьшается. Благодаря этому гидродинамическое сопротивление крови не превышает критических значений и нагрузка на сердце остается в пределах нормы. При уменьшении диаметра просвета сосуда до размеров эритроцита (7 мкм) вязкость крови возрастает, так как клетки крови начинают непосредственно контактировать со стенками капилляра. Прохождение эритроцитов по сосуду в данном случае объясняется их способностью к дефор-

мации, мы рассматриваем именно эритроциты, как самые многочисленные из всех форменных элементов крови ($4,7 \times 10^{12}$ /л у мужчин и $4,3 \times 10^{12}$ /л у женщин), когда эритроциты из-за эластичности их собственных мембран, сжимаются, складываются и проходят даже через такие капилляры, диаметр которых 5 (мкм) меньше диаметра эритроцита.

При скоростях сдвига $>100 \text{ с}^{-1}$ и динамической вязкостью порядка 1 мПа, с электродинамические силы (связанные с отрицательными зарядами на поверхности мембран эритроцитов и гликокаликса внутренней поверхности сосуда), действующие на эритроциты, становятся менее существенными, по сравнению с гидродинамическими, и потому ими можно пренебречь. Помимо этого происходит разрушение стопок эритроцитов и их движение становится похожим на движение гусеничной ленты, а также начинается деформация и вытягивание эритроцитов, и уже в результате этого кажущаяся вязкость крови начинает падать.

При движении вблизи стенок сосудов эритроциты начинают гидродинамически взаимодействовать с ними. При наличии микрорельефа стенки трубки данное взаимодействие становится более выраженным, чем при плоской стенке. На люминальной поверхности кровеносных сосудов ядра эндотелиоцитов, как правило, выбухают в просвет сосуда, в результате чего эти ядра располагаются либо в шахматном порядке, либо друг напротив друга, благодаря этому, внутренние стенки сосудов обладают микрорельефом и удовлетворяют условию указанному выше (Рис. 5).

Гидродинамическое взаимодействие деформированных эритроцитов образует подъемную силу, которая отталкивает их от стенки сосуда. Скорость подъема эритроцита от стенки сосуда можно выразить классическим соотношением:

$$v_y = UR^3 \times \frac{\dot{\nu}}{y^2}$$

где v_y — скорость подъема эритроцита,

U — безразмерный численный коэффициент,

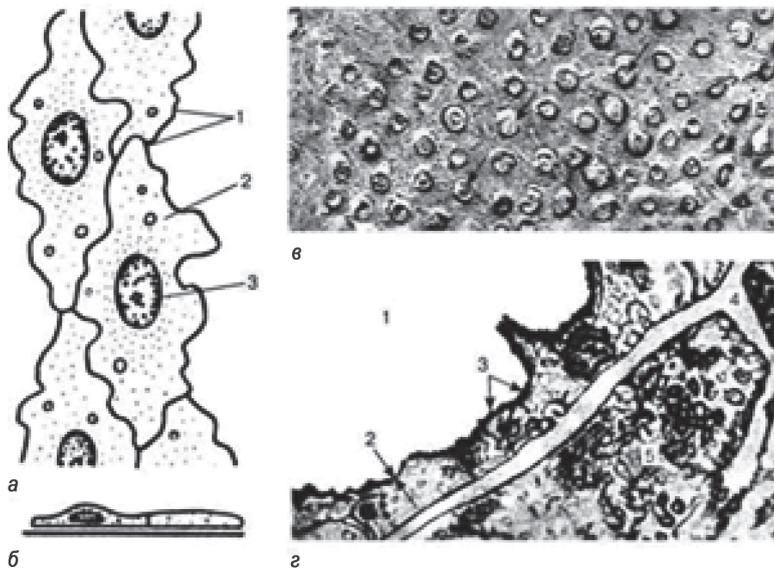


Рис. 5. Микрорельеф внутренней поверхности стенок кровеносных сосудов малого калибра.

$R = (r_{\text{rbc}}^2 \times \omega_{\text{rbc}}^2)^{1/3}$ — эффективный гидродинамический радиус клетки,

y — расстояние до поверхности,

\dot{v} — скорость сдвига.

Наиболее выражено данное взаимодействие проявляется на расстоянии 4 мкм от вершины рельефных выступов (10 мкм от самой нижней плоскости люминальной поверхности сосуда), что эквивалентно радиусу эритроцита. Сила данного взаимодействия, а следовательно, и скорость подъема эритроцита от стенки сосуда, напрямую зависит от скорости сдвига: чем больше скорость сдвига, тем выше скорость подъема. Благодаря этому эритроциты скапливаются в приосевом слое крови, и образуется обедненный форменными элементами пристеночный слой плазмы, который имеет очень малую вязкость.

Таким образом все упомянутые выше эффекты так или иначе связаны с величиной диаметра просвета сосуда. Благодаря этому, вместе с сужением сосуда наблюдается и уменьшение кажущейся вязкости, пока просвет сосуда не достигнет размеров самого эритроцита, и вязкость крови не возрастет. Существующие на данный момент формулы, в том числе и упомянутые выше, не могут абсолютно точно описать поведение крови в сосудах малого калибра, так как это довольно сложный процесс, связанный с давлением внутри сосуда, температурой, скоростью сдвига, химическим составом плазмы, возрастом организма, размерами эритроцитов, диаметром просвета сосуда, показателя гематокрита. Многие модели течения крови так или иначе используют коэффициенты, вычисленные эмпирическим путем, что также говорит лишь о приблизительности данных моделей к реальному поведению крови.

В целом данные эффекты имеют весьма важное биологическое значение, так гидродинамическое сопротивление не достигает критических значений, что позволяет сердцу прокачивать кровь по сердечно-сосудистой системе. Благодаря способности эритроцитов к деформации, в норме, не происходит закупорки капилляров даже при диаметре просвета меньшем, чем диаметр эритроцита. Так как эритроциты движутся быстрее плазмы крови, показатель гематокрита падает, что также снижает эффективную вязкость крови. Из-за тупого профиля скорости, приосевой слой эритроцитов хоть и движется быстрее пристеночного слоя плазмы, эритроциты все равно движутся равномерно относительно друг друга, что способствует правильной отдаче кислорода тканям.

Таким образом, дальнейшее изучение реологических свойств крови является довольно перспективным направлением, поскольку позволит лучше понимать причины возникновения тех или иных патологий, механизмы работы сердечно-сосудистой системы в норме. Особенно важным изучение свойств крови как неньютоновской жидкости является для студентов медицинских университетов. Ведь в основном упор в изучении крови идет на её био-химические свой-

ства, при этом изучение реологических свойств крови остается второстепенным, хотя, как было показано, особенности течения крови по сосудам, в частности по сосудам малого калибра, с физической точки зрения имеет огромный биологический смысл. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев А. Е. «Двухфазная модель течения крови» // Российский журнал биомеханики. 2013. Т. 17, № 4, С. 22–36
2. Буравцев В. Н., Николаев А. В., Украинцев А. В. «Влияние столкновений на распределение тромбоцитов в кровотоке» // Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2009. № 4, С. 81–84
3. Беляев А. В. Гидродинамическое взаимодействие клеток крови с микрошероховатой поверхностью в сдвиговом потоке жидкости // Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2017. № 5, С. 44–49
4. James H. Barbee, Giles R. Cokelet, «The Fahraeus effect» // *Microvascular Research*, Volume 3, Issue 1, 1971, Pages 6–16
5. Ельцова Л. Ф., Ельцов А. В. «О реализации принципа интеграции в организации обучения в медицинском вузе» // *Личность в меняющемся мире: здоровье, адаптация, развитие: сетевой журн.* 2019. Т. 7. № 1 (24)
6. Гистология, эмбриология, цитология: учебник / Ю. И. Афанасьев, Н. А. Юрина, Е. Ф. Котовский и др.; под ред. Ю. И. Афанасьева, Н. А. Юриной. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: ГЭОТАР — Медиа, 2012. — 800 с.: ил.