



Slovak international scientific journal

№25, 2019

Slovak international scientific journal

VOL.1

The journal has a certificate of registration at the International Centre in Paris – ISSN 5782-5319.

The frequency of publication – 12 times per year.

Reception of articles in the journal – on the daily basis.

The output of journal is monthly scheduled.

Languages: all articles are published in the language of writing by the author.

The format of the journal is A4, coated paper, matte laminated cover.

Articles published in the journal have the status of international publication.

The Editorial Board of the journal:

Editor in chief – Boleslav Motko, Comenius University in Bratislava, Faculty of Management

The secretary of the journal – Milica Kovacova, The Pan-European University, Faculty of Informatics

- Lucia Janicka – Slovak University of Technology in Bratislava
- Stanislav Čerňák – The Plant Production Research Center Piešťany
- Miroslav Výtisk – Slovak University of Agriculture Nitra
- Dušan Igaz – Slovak University of Agriculture
- Terézia Mészárossová – Matej Bel University
- Peter Masaryk – University of Rzeszów
- Filip Kocisov – Institute of Political Science
- Andrej Bujalski – Technical University of Košice
- Jaroslav Kovac – University of SS. Cyril and Methodius in Trnava
- Paweł Miklo – Technical University Bratislava
- Jozef Molnár – The Slovak University of Technology in Bratislava
- Tomajko Milaslavski – Slovak University of Agriculture
- Natália Jurková – Univerzita Komenského v Bratislave
- Jan Adamczyk – Institute of state and law AS CR
- Boris Belier – Univerzita Komenského v Bratislave
- Stefan Fišan – Comenius University
- Terézia Majercakova – Central European University

1000 copies

Slovak international scientific journal

Partizanska, 1248/2

Bratislava, Slovakia 811 03

email: info@sis-journal.com

site: <http://sis-journal.com>

PHYSIOLOGY OF ANIMALS

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭРИТРОЦИТОВ С ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Гуцол Т.Д.

*Подольский государственный аграрно-технический университет,
г. Каменец-Подольский (Украина), к.т.н., доцент, проректор*

SIMULATION OF ERYTHROCYTES INTERACTION WITH EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

Hutsol T.

*Podolsk State Agrarian Technical University
Kamenetz-Podolsky (Ukraine), Ph.D., Assist. Prof., Vice Rector*

Аннотация

В работе рассматривается движение эритроцитов в сосудах крови животных, с учетом возникающих при этом электромагнитных взаимодействий между ними. Уточнена модель равновесия электростатических, магнитостатических и гидродинамических сил, действующих на эритроцит в плазме крови. Предложенная модель эритроцита, как объемного тела, позволяет учесть силы взаимодействия между эритроцитами, которые вызваны зарядами, равномерно распределенными по всей их поверхности. Показано, что появление внешнего электромагнитного поля приводит к нарушению равновесия сил, существующих между элементами крови в норме.

Abstract

The work examines the movement of red blood cells in the blood vessels of animals, taking into account the resulting electromagnetic interactions between them. The model of equilibrium of electrostatic, magnetostatic and hydrodynamic forces acting on the erythrocyte in the blood plasma is specified. The proposed model of an erythrocyte, as a volumetric body, allows taking into account the interaction forces between erythrocytes, which are caused by charges uniformly distributed over their entire surface. It is shown that the appearance of an external electromagnetic field leads to an imbalance of forces existing between blood elements in normal conditions.

Ключевые слова: Динамика крови, электростатическое отталкивание, равенство сил, поверхностные заряды, нарушение равновесия.

Keywords: Blood dynamics, electrostatic repulsion, equality of forces, surface charges, imbalance.

Введение. Решение задач, связанных с динамикой крови, является одним из существенных вопросов при изучении физиологического портрета человека и животного. Существует достаточно большое количество работ, посвященных данной проблеме. Однако во многих из них не учитываются процессы, связанные с электромагнитным взаимодействием между форменными элементами крови (эритроцитами, тромбоцитами и т.д.). Это значительно сужает применение полученных результатов для оценки явлений, связанных с воздействием на кровоток внешних периодически изменяющихся факторов, таких, как электромагнитные поля.

Постановка задачи. При движении в русле кровотока эритроциты вращаются, что приводит к возникновению круговых токов. Величина кругового тока равняется произведению числа оборотов эритроцита в секунду n на величину его заряда Q :

$$I = nQ. \quad (1)$$

Сила магнитного взаимодействия двух эритроцитов получена как сила взаимодействия двух круговых токов I_1, I_2 [1, 2]:

$$|F_M| = 0,01\mu_0 R_3 I_1 I_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + 4R_3^2}} \right), \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость свободного пространства; R_3 - радиус эритроцита; r - расстояние между центрами эритроцитов.

Модель равновесия электростатических, магнитостатических и гидродинамических сил, действующих на эритроцит в плазме крови, приведенная в работе [1], имеет вид:

$$F_H = F(a) + 0,296(F_e - F_i) \quad (3)$$

где F_H - гидродинамическая сила; $F(a)$ - сила электростатического отталкивания между эритроцитами разных колец; F_e - сила электростатического взаимодействия между двумя эритроцитами одного кольца.

Однако, $F(a)$ - сила электростатического отталкивания между эритроцитами разных колец, существуя фактически, не должна входить в выражения равновесия (3).

Это связано с тем, что равнодействующая двух сил $F(a)$, приложенных к эритроциту некоторого кольца со стороны соседних колец, равна нулю. Иначе говоря, уточненная модель равновесия сил, действующих на эритроцит в кровотоке, должна иметь вид, представленный на рис. 1.

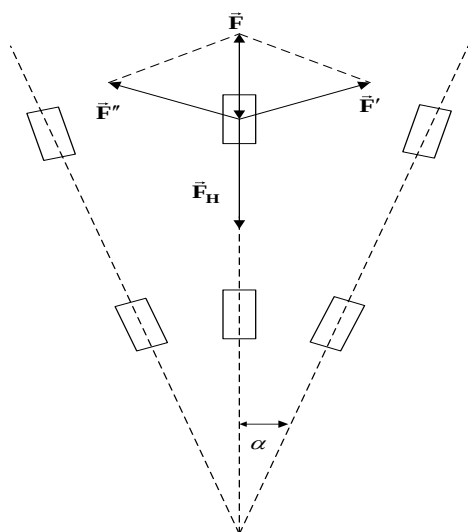


Рис. 1. Схема расположения эритроцитов в поперечном сечении сосуда

Гидродинамические силы, стремясь передвинуть отдельные эритроциты в направлении оси сосуда, сжимают кольца эритроцитов. Это приводит к уменьшению диаметра кольца и расстояния между соседними эритроцитами данного кольца, что вызывает быстрое возрастание электростатических сил отталкивания. Равнодействующая этих сил и противодействует гидродинамическим усилиям. Силы магнитного притяжения отдельных эритроцитов данного кольца также возрастают, но в меньшей мере, чем электростатические.

Рассмотрим уточненную модель равновесия сил, действующих на эритроцит в кровотоке. Схематическое расположение эритроцитов в поперечном сечении сосуда представлено на рис. 1.

Векторы $\vec{F}'$ и $\vec{F}''$ - это сумма электрических и магнитных сил, действующих на средний эритроцит со стороны левого и правого эритроцитов, соответственно. Их векторная сумма $\vec{F}$ компенсирует гидродинамическую силу $\vec{F}_H$. При $\alpha = 17^\circ$ условие равновесия в поперечном сечении сосуда выглядит следующим образом:

$$F_H = 0,296(F_e - F_i) \quad (4)$$

Схематическое расположение эритроцитов вдоль оси сосуда изображено на рис. 2.

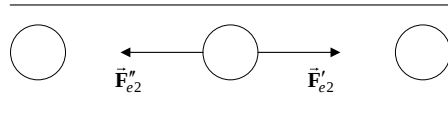


Рис. 2. Продольное сечение сосуда

Равенство электростатических сил $\vec{F}'_{e2}$ и $\vec{F}''_{e2}$ между двумя соседними эритроцитами, расположенными вдоль сосуда, дает условие равновесия вдоль его оси:

$$\vec{F}'_{e2} = \vec{F}''_{e2}. \quad (5)$$

Условия равновесия (4) и (5) свободны от недостатков модели, предложенной в работе [1].

Методы исследования. При исследовании воздействия на эритроцит внешних по отношению

к нему электромагнитных полей будем рассматривать его в виде диска с радиусом R и высотой $R/2$ (рис. 3). Электромагнитные свойства эритроцита описываются диэлектрической ϵ_2 и магнитной μ_2 проницаемостями.

Предложенная модель эритроцита, как объемного тела, позволяет учесть силы взаимодействия между эритроцитами, которые вызваны зарядами, равномерно распределенными по всей их поверхности.

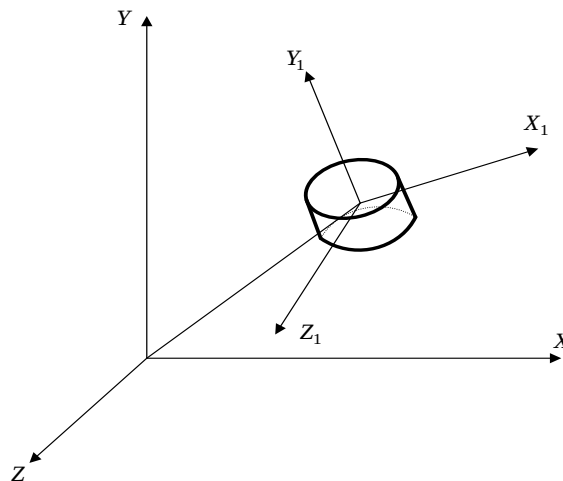


Рис. 3. Система координат эритроцита

Эритроцит помещен в жидкость, ϵ_1 и μ_1 которой равняются диэлектрической и магнитной проницаемостям плазмы крови.

Сила, действующая со стороны электромагнитного поля на тело, погруженное в жидкость, равняется [3, 4]:

$$\vec{F} = \int_S \left\{ \epsilon_1 (\vec{E}_S, \vec{n}) \vec{E}_S + \mu_1 (\vec{H}_S, \vec{n}) \vec{H}_S - \frac{1}{2} (\epsilon_1 \vec{E}_S^2 + \mu_1 \vec{H}_S^2) \vec{n} \right\} ds, \quad (6)$$

где интегрирование ведется по поверхности тела; $\vec{E}_S$ и $\vec{H}_S$ - векторы поля на поверхности тела; $\vec{n}$ - нормаль к поверхности тела.

Для определения $\vec{E}_S$ и $\vec{H}_S$ воспользуемся следующей схемой. Найдем вначале внутреннее поле диска через падающее на него поле. Затем с помощью граничных условий на поверхности тела вычислим поля на ней.

Так как размеры эритроцита значительно меньше длины падающей на него волны, то можно считать, что эритроцит находится в однородном поле. Согласно [5] внутреннее поле диска, который будем рассматривать как сплюснутый эллипсоид вращения, также будет однородно. В работе [1] были получены выражения для внутреннего поля эллипсоида через амплитуды падающей волны:

$$E_\beta^i = \frac{E_{\beta 0}}{1 + \frac{I_\beta}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)}; \quad H_\beta^i = \frac{H_{\beta 0}}{1 + \frac{I_\beta}{4\pi} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где

$$\beta = x, y, z; \quad I_x = I_z$$

$$= 2\pi R^3 \int_0^\infty \frac{ds}{(R^2 + s)(R^2 + 16s)^{0.5}};$$

$$I_y = 32\pi R^3 \int_0^\infty \frac{ds}{(R^2 + s)(R^2 + 16s)^{1.5}}. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) определяют внутреннее поле эритроцита с учетом электромагнитного поля внутри кровеносного сосуда.

Рассмотрим две различные поляризации падающего на эритроцит электромагнитного поля: E -поляризацию и H -поляризацию.

1. Пусть вектор $\vec{E}_0$ параллелен оси кровеносного сосуда OZ . Тогда в случае E -поляризации внутреннее поле диска будет равно:

$$E_z^i = \frac{E_z}{1 + \frac{I_z}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)};$$

$$H_x^i = \frac{H_\rho}{1 + \frac{I_x}{4\pi} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}; H_y^i = \frac{H_\phi}{1 + \frac{I_y}{4\pi} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}, \quad (9)$$

где E_z , H_ρ , H_ϕ - амплитуды внутренних полей в диэлектрическом цилиндре в случае, когда его оси параллельна амплитуда электрической составляющей падающего ЭМП [5, 6].

На боковой поверхности диска, моделирующего эритроцит, имеем следующие поля:

$$\vec{E}_S = E_x \vec{i} + E_z \vec{k}; \vec{H}_S = H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k}, \quad (10)$$

где

$$E_x = \frac{4\pi G}{\epsilon_1 R} x_1 + E_z^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) x_1 z_1; E_y = 0;$$

$$E_z = \frac{4\pi G}{\epsilon_1 R} z_1 + E_z^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) x_1 z_1; H_x =$$

$$= H_x^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) x_1 z_1;$$

$$H_y = H_y^i; H_z = H_z^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) x_1 z_1; \quad (11)$$

$G = Q/2\pi R^2$ - поверхностная плотность заряда эритроцита.

На торцах этого диска поля равны:

$$\vec{E}_S = E_z \vec{k}; \vec{H}_S = H_x \vec{i} + H_y \vec{j}, \quad (12)$$

где

$$E_z = E_z^i; H_x = H_x^i; H_y = \frac{\mu_2}{\mu_1} H_y^i. \quad (13)$$

Интегрируя (6), получаем составляющие силы, действующей со стороны поля на эритроцит:

$$F_x = F_y = 0;$$

$$F_z = 2R^2 \left\{ \frac{(4\pi G)^2}{2\epsilon_1} + \pi^2 G E_z^i \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + 1 \right) + \right.$$

$$+ (E_z^i)^2 \left(\frac{\epsilon_2^2}{3\epsilon_1} + \frac{\epsilon_2}{3} - \frac{\epsilon_1}{6} \right) +$$

$$+ (H_x^i)^2 \left(\frac{\mu_2^2}{6\mu_1} - \frac{\mu_2}{3} - \frac{\mu_1}{3} \right) -$$

$$\left. - \frac{\mu_1}{2} (H_y^i)^2 \right\}. \quad (14)$$

При учете только нулевой гармоники внутреннего электромагнитного поля кровеносного сосуда, а также того, что в данном случае $\mu_2 = \mu_1 \approx \mu_0$, получаем более простой вид для составляющих $\vec{F}$:

$$F_x = F_y = 0;$$

$$F_z = 2R^2 \left\{ \frac{(4\pi G)^2}{2\epsilon_1} + \pi^2 G E_z^i \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + 1 \right) + (E_z^i)^2 \left(\frac{\epsilon_2^2}{3\epsilon_1} + \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{\epsilon_2}{3} - \frac{\epsilon_1}{6} \right) - \frac{\mu_0}{2} (H_y^i)^2 \right\}. \quad (15)$$

2. Пусть теперь вектор $\vec{H}_0$ параллелен оси кровеносного сосуда. В этом случае также для компонент внутреннего электромагнитного поля используются выражения из [5, 6], но для случая, когда падающая на однородный цилиндр электромагнитная волна имеет магнитную составляющую, параллельную его оси.

Поля внутри эритроцита будут описываться выражениями:

$$E_x^i = \frac{E_\rho}{1 + \frac{I_x}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)}; E_y^i = \frac{E_\phi}{1 + \frac{I_y}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)}; H_z^i = \frac{H_z}{1 + \frac{I_z}{4\pi} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}, \quad (16)$$

где E_ϕ , E_ρ , H_z приведены в [5, 6].

Поле на боковой поверхности эритроцита в этом случае имеет вид:

$$\vec{E}_S = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}; \vec{H}_S = H_x \vec{i} + H_z \vec{k}, \quad (17)$$

где

$$E_x = \frac{4\pi G}{\epsilon_1 R} x_1 + E_x^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} x_1^2 + z_1^2 \right); E_y = E_y^i;$$

$$E_z = \frac{4\pi G}{\epsilon_1 R} z_1 + E_x^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) x_1 z_1;$$

$$H_x = H_z^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) x_1 z_1; H_y = 0; H_z =$$

$$H_z^i \frac{1}{R^2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} z_1^2 + x_1^2 \right); \quad (18)$$

x_1 , y_1 , z_1 - координаты центра эритроцита.

На торцах цилиндра соответствующие поля равны:

$$\vec{E}_S = E_x \vec{i} + E_y \vec{j}; \vec{H}_S = H_z \vec{k}, \quad (19)$$

где

$$E_x = E_x^i; E_y = \frac{4\pi G}{\epsilon_1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_y^i; E_z = 0; H_x = H_y = 0; H_z = H_z^i. \quad (20)$$

Интегрирование (6) по полной поверхности цилиндра позволяет получить составляющие силы, действующей на эритроцит в этом случае:

$$F_x = 8\pi^2 R^2 G \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + 1 \right) E_x^i; F_y = 4\pi^2 R^2 G E_y^i;$$

$$F_z = 2R^2 \left\{ \frac{(4\pi G)^2}{2\epsilon_1} + \left(\frac{\epsilon_2^2}{6\epsilon_1} - \frac{\epsilon_2}{3} - \frac{\epsilon_1}{3} \right) (E_x^i)^2 - \right.$$

$$\left. - \frac{\epsilon_1}{2} (E_y^i)^2 + \left(\frac{\mu_2^2}{3\mu_1} + \frac{\mu_2}{3} - \frac{\mu_1}{6} \right) (H_z^i)^2 \right\}. \quad (21)$$

Принимая во внимание, так же как и в случае E -поляризации, только нулевую гармонику внутреннего поля кровеносного сосуда и условие $\mu_2 = \mu_1 \approx \mu_0$, получаем:

$$F_x = 0; F_y = 4\pi^2 R^2 G E_y^i;$$

$$F_z = 2R^2 \left\{ \frac{(4\pi G)^2}{2\epsilon_1} - \frac{\epsilon_1}{2} (E_y^i)^2 + \frac{\mu_0}{2} (H_z^i)^2 \right\}. \quad (22)$$

Учитывая, что в реальной ситуации векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ падающего электромагнитного поля будут ориентированы произвольным образом относительно каждого конкретного кровеносного сосуда, возникающие внутренние поля и связанные с ними силы необходимо представить как суперпозицию E и H -поляризаций.

Анализ выражений (15), (22) показывает, что наличие внешнего электромагнитного поля нарушает баланс сил, существующих между эритроцитами в кровотоке.

Так как расстояние между соседними эритроцитами в одном кольце очень мало, то составляющую силы F_y (22) следует трактовать, как силу притяжения между ними. Она будет уменьшать радиус кольца эритроцитов. Составляющая F_x для ненулевой гармоник внутренней поля будет отлична от нуля и направлена параллельно гидродинамической силе $\vec{F}_H$. Условие равновесия в поперечном сечении сосуда (4) перейдет в следующее выражение:

$$F_H - F_x = 0,296(F_{e1} - F_i - F_y). \quad (23)$$

Если же магнитное поле падающей волны будет направлено строго перпендикулярно оси сосуда, то из (14) следует, что условие равновесия (4) в поперечном сечении сосуда не изменится.

Наличие силы F_z приведет к нарушению равновесия (5), которое имело место между эритроцитами, расположенными вдоль оси сосуда при отсутствии внешнего поля. При появлении внешнего по отношению к сосуду электромагнитного поля F_z уменьшает одну из этих сил и условие (5) переходит в условие:

$$\frac{Q^2}{(r + r_1)^2 + R_3^2} \left[1 + \frac{3R_3^2}{4[(r + r_1)^2 + R_3^2]} \right] = \frac{Q^2}{(r - r_1)^2 + R_3^2} \left[1 + \frac{3R_3^2}{4[(r - r_1)^2 + R_3^2]} \right]. \quad (24)$$

Когда $r - r_1 = 2R_3$, то эритроциты вплотную приблизятся друг к другу в продольном направлении.

Электрические и магнитные свойства компонентов крови чаще всего исследуются без учета влияния внешнего поля. Модель взаимодействия эритроцитов с внешним электромагнитным полем позволила впервые получить выражения (15), (22) для сил, действующих на эритроцит со стороны

этого поля, что объясняет изменения в кровотоке, рассмотренном без учета этих сил.

Выводы. Проведенные исследования позволили уточнить радиально-кольцевую модель кровотока в части электродинамического взаимодействия эритроцитов как объемных тел. Учтены силы взаимодействия эритроцитов, расположенных в одном кольце и в разных кольцах, с учетом взаимной компенсации некоторых их составляющих. Принято во внимание поверхностный заряд, который нависает на эритроците падающим электромагнитным излучением, на основе чего разработана модель взаимодействия эритроцитов крови с внешним электромагнитным полем. Показано, что появление внешнего электромагнитного поля приводит к нарушению равновесия сил, существующих между элементами крови в норме.

Литература

1. Пиротти Е.Л.. О влиянии электромагнитных полей на свойства эритроцитов / Е.Л. Пиротти // Радиоэлектроника и информатика. - Харьков: ХГТУРЭ. - 1997. - № 1. - С. 107 - 110.
2. Волкова С. А., Боровков Н. Н. Основы клинической гематологии: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородская государственная медицинская академия, 2013. - 400с.
3. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: ФизматГИЗ, 1959. - 529 с.
4. Жуков Н. П. Гидрогазодинамика: учебное пособие. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. - 92с.
5. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов - М.: Советское радио, 1971. - 661 с.
6. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В.Никольский, Т.И. Никольская - М.: Либроком, 2012. - 544 с.