

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ КРОВИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С.Н. Мамаева<sup>1</sup>, Г.В. Максимов<sup>2</sup>, С.Р. Антонов<sup>1</sup>, Я.А. Мунхалова<sup>1</sup>, А.Н. Павлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск

<sup>2</sup> Московский государственный университет, Биологический факультет, Москва

Предложена физико-математическая модель расчёта поверхностного заряда эритроцита с учетом формы клетки, аппроксимированной геометрической фигурой, а также проведено исследование динамики движения эритроцитов под воздействием внешнего электрического поля. Рассчитан электрический поверхностный заряд эритроцита при патологии. Предположено, что изменение эритроцитов приводит к стабилизации электрического поля межклеточных взаимодействий за счет кулоновских взаимодействий. Обсуждаются результаты исследования динамики измененных эритроцитов под воздействием внешнего электрического поля в зависимости от значения их поверхностного заряда и сопротивления плазмы крови.

Ключевые слова: медицинская биофизика, эритроциты, математическое моделирование, электрическое поле

### Введение

В настоящее время математическое моделирование биологических процессов норме и при патологии является актуальным направлением биомедицины.

На сегодняшний день существует необходимость построения физико-математических моделей, описывающих явления и процессы в организме человека в норме и в патологии, в том числе моделей для исследования клеток крови. Задача определения поверхностного заряда эритроцитов крови для исследования эритроцитов крови человека, приобретающих определенные формы, их взаимодействия друг с другом с учетом их поверхностных зарядов при определенных заболеваниях, является значимой, т.к. известно, что эритроциты имеют свойство изменять свои параметры и функции в зависимости от заболевания.

Такие модели могут быть включены в комплексный метод исследований особенностей заболеваний на клеточном уровне в рамках экспериментального и теоретического подходов к решению проблемы, результаты которого могут быть применены в формировании системной дифференциальной диагностики комплексных заболеваний. Особенно это важно для диагностики заболеваний, методы выявления которых в настоящее время являются травматичными, не вполне достоверными и могут привести к некоторым осложнениям состояния исследуемых органов. Итак, в связи с этим существует необходимость создания более совершенных и менее затратных новых методов диагностики путем применения методов медицинской биофизики.

Эритроциты могут иметь различные геометрические формы в зависимости от их со-

стояния в норме или при патологии. Часто их формы можно аппроксимировать с помощью геометрических фигур, таких как сфероид, эллипсоид, параболоид, тороид, в зависимости от того, какие формы эритроцитов существуют при том или ином заболевании. В норме эритроциты могут быть наиболее близко смоделированы эллипсоидом вращения, хотя эритроциты изменяют свою форму или объем при движении по сосудам.

Известно, что наличие кулоновского взаимодействия эритроцитов [1], возникающего благодаря наличию на их поверхностях отрицательного заряда, позволяет эритроцитам в норме находиться на безопасных расстояниях друг от друга. Но при патологических состояниях изменяются поверхностный заряд эритроцитов, их формы и размеры. В данной работе предполагается, что изменение формы и размеров эритроцитов приводит к стабилизации электрического поля, обеспечивающего нормальное кулоновское отталкивание. Т.е. предполагается, что эритроциты изменяются таким образом, чтобы величина электростатического поля оставалась без изменения и чтобы расстояние между эритроцитами обуславливало отсутствие конгломераций из эритроцитов, так называемых «монетных столбиков».

Исследование изменений величины поверхностного заряда эритроцита может позволить определить заряд сиаловой кислоты эритроцита, т.к. считается, что отрицательный приповерхностный заряд эритроцита в основном определяется зарядом сиаловой кислоты [2]. Таким образом, решение проблемы определения поверхностного заряда является важной для исследования зависимости заряда сиаловой кислоты от вида заболевания и для применения этой зависимости в формировании комплексного метода диагностики заболевания.

Для экспериментального определения некоторых физических свойств крови проводятся эксперименты, в которых исследуются скорости движения эритроцитов крови под воздействием внешнего электрического поля в моделях внеклеточных взаимодействий, результаты которых могут применяться для диагностики и лечения разных видов заболеваний.

Целью данной работы является построение физико-математической модели для определения зависимости поверхностного заряда эритроцита от его формы и линейных размеров, а также исследование динамики эритро-

цитов под воздействием внешнего электрического поля.

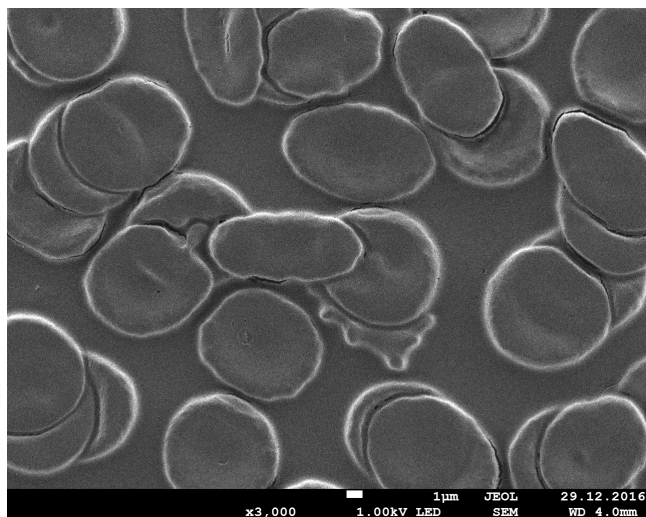
## Материал и методы

Согласно экспериментальным результатам, полученными при исследовании неокрашенных сухих мазков капиллярной крови (крови из пальца) детей, поступивших в Республиканскую больницу № 1 Национального центра медицины города Якутска с симптомами макрогематурии, на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-7800F фирмы JEOL с термодопольным эмиссионным катодом Шоттки и супергибридной объективной линзой, на поверхности эритроцита наблюдаются нанометровые частицы, размер которых соответствует размерам определенных вирусов [3–6]. В работах [3–6] предполагается, что эритроциты переносят адсорбированные на них вирусы в почечную систему, вследствие чего, возможно, запускается механизм патологического процесса в почках.

В случае хронического гломерулонефрита проводилось исследование этого явления в динамике, при котором было установлено, что в ходе терапии уменьшается количество транспортируемых наночастиц на поверхности эритроцитов, а в плазме крови их количество увеличивается и при этом в среднем увеличивается их линейный размер. Кроме того, в РЭМ-изображениях наблюдается преобладание тех или иных форм эритроцитов в зависимости от вида заболевания, изменяется их количественное соотношение в общей массе эритроцитов [3–6]. В качестве примера на рис. 1 представлены РЭМ-изображения эритроцитов различной формы из образца крови ребенка с диагнозом хронического гломерулонефрита.

Обнаруженные в ходе исследования изменения формы эритроцитов, вероятно, обусловлены изменением поверхностного заряда эритроцитов вследствие прикрепления к ним достаточно большого количества вирусных частиц противоположного знака [3–6].

Наличие при патологии большого числа связанных эритроцитов (монетных столбиков), которое снижается при терапии, также может быть расценено влиянием уменьшения электростатического поля эритроцита с отрицательно заряженной поверхностью и уменьшением кулоновского отталкивания, приводящее к образованию конгломератов эритроцитов [3–6].



**Рис. 1.** РЭМ-изображение эритроцитов крови при хроническом гломерулонефрите при увеличении  $\times 3000$

В данной работе рассматривается попытка решения проблемы определения общего заряда поверхности заряда эритроцита с учетом заряда прикрепленных вирусных частиц в зависимости от вида заболевания и задача определения взаимосвязи предполагаемых значений зарядов с формами измененных эритроцитов, которые являются необходимыми для понимания этиологии некоторых сложно диагностируемых почечных заболеваний и для формирования нового комплексного метода их диагностики.

Предполагается, что изменения формы и размеров эритроцитов происходят таким образом, чтобы поддерживать на прежнем уровне напряженность электрического поля всей системы, обеспечивающего кулоновское отталкивание, если по каким-то причинам уменьшился поверхностный заряд эритроцита, что позволило бы уменьшить вероятность склеивания и осаждения эритроцитов.

Таким образом, в модели предполагается, что при изменении поверхностного заряда при патологическом состоянии изменяется форма и размер эритроцита, чтобы электростатическое поле измененного эритроцита было таким, чтобы расстояние между эритроцитами оставалось примерно одинаковым, как при нормальном состоянии.

Изложенное ниже решение задачи исследования динамики эритроцитов получается сначала путем моделирования воздействия внешнего электрического поля на напряжен-

ность электрического поля измененного эритроцита (овалоцита). В нашем случае он аппроксимируется эллипсоидом с отличающимися геометрическими параметрами от параметров эритроцита в норме, аппроксимированного эллипсоидом вращения. Затем, используя описанное выше условие о сохранении электрического поля эритроцита при изменении формы, рассчитывается полный заряд поверхности эритроцита, аппроксимированного эллипсоидом. В ходе проведения расчетов численных значений поверхностных зарядов эритроцитов можно также оценить поверхностные заряды предполагаемых вирусов для возможной идентификации их не только по наблюдаемым на эксперименте размерам, но и по значениям их поверхностных зарядов. На основе полученных значений зарядов эритроцитов в норме и патологии определяется динамика движения эритроцита в крови при воздействии внешнего электрического поля с учетом сопротивления плазмы крови.

Дифференциальные уравнения первого порядка в частных производных, включенные в математическую модель, построенную на основе физической модели эритроцита, приводятся с применением метода разделения переменных к обыкновенным дифференциальным уравнениям первого порядка и решаются в Mathcad с использованием численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

### **Определение поверхностного заряда эритроцитов и вирусов, влияние зарядов вирусов на форму и размеры эритроцитов. Построение модели и ее решение**

В данной физико-математической модели для решения задачи определения зарядов предполагаемых вирусов допускается следующее: Значение электрического поля поверхностного заряда измененного эритроцита, аппроксимированного эллипсоидом с параметрами  $a_{\text{пат}}$ ,  $b_{\text{пат}}$ ,  $c_{\text{пат}}$  при патологическом состоянии, должно быть примерно таким же, как и значение электрического поля нормального эритроцита, аппроксимированного эллипсоидом с нормальными линейными размерами  $a_{\text{норм}}$ ,  $b_{\text{норм}}$ ,  $c_{\text{норм}}$ . При этом для численных расчетов используются значения известных линейных

размеров эритроцита, а также поверхностного заряда эритроцита в норме.

Модель реализуется по следующим этапам:

1) Зная значение поверхностного заряда эритроцитов в норме, мы можем определить напряженность электрического поля вблизи поверхности эритроцита. Известно, что для заряженного проводящего тела любой конфигурации вблизи его поверхности поверхностная плотность заряда равна:

$$\sigma = D, \quad (1)$$

где  $D$  – электрическое смещение вблизи поверхности заряженного тела. В этой модели применяем допущение, что формулу (1) можно использовать для определения электрического смещения  $\vec{D}_{\text{эп}}$  в пространстве вблизи поверхности эритроцита.

Тогда для нахождения напряженности электрического поля  $\vec{E}_{\text{эп}}$  в приповерхностной области заряженного эритроцита можно использовать следующее выражение:

$$\vec{D}_{\text{эп}} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{эп}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – фундаментальная электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость крови.

Тогда для определения заряда эллипсоидального эритроцита используем метод определения поверхностного заряда заряженного проводящего эллипсоида:

$$q_{\text{эп}} = 4\pi abc \varepsilon \varepsilon_0 E_{\text{эп}} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

полученное из предположения применения (1), где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – полудлины главных диаметров эллипсоида вращения.

Исходя из этой формулы, определяем напряженность приповерхностного электростатического поля, создаваемого поверхностным зарядом эритроцита в норме, аппроксимированного эллипсоидом с параметрами  $a_{\text{норм}}$ ,  $b_{\text{норм}}$ ,  $c_{\text{норм}}$ , по следующей формуле:

$$E_{\text{норм}} = \frac{q_{\text{норм}}}{4\pi a_{\text{норм}} b_{\text{норм}} c_{\text{норм}} \varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{\frac{1}{a_{\text{норм}}^2} + \frac{1}{b_{\text{норм}}^2} + \frac{1}{c_{\text{норм}}^2}}}. \quad (4)$$

2) Определяется заряд дисморфного эритроцита с другими параметрами  $a_{\text{пат}}$ ,  $b_{\text{пат}}$ ,  $c_{\text{пат}}$ , т.е. эритроцита при патологии, исходя из предположения что изменение формы и разме-

ров эритроцитов происходит таким образом, чтобы поддержать на прежнем уровне напряженность электрического поля по следующей формуле:

$$q_{\text{пат}} = 4\pi a_{\text{пат}} b_{\text{пат}} c_{\text{пат}} \times \times \varepsilon \varepsilon_0 E_{\text{норм}} \sqrt{\frac{1}{a_{\text{пат}}^2} + \frac{1}{b_{\text{пат}}^2} + \frac{1}{c_{\text{пат}}^2}}. \quad (5)$$

3) Считая, что на поверхности эритроцита благодаря кулоновскому взаимодействию прикрепляются предполагаемые вирусы, причем поверхностные заряды вирусов в плазме становятся положительными при определенных рН условиях крови, заряд дисморфного эритроцита можно представить, как алгебраическую сумму поверхностного заряда эритроцита в норме и суммарный заряд наночастиц на дисморфном эритроците:

$$q_{\text{пат}} = q_{\text{норм}} + N \cdot q_{\text{нано}}, \quad (6)$$

где  $N$  – это количество наноструктур на поверхности эритроцитов. Так как заряд эритроцита отрицателен, а заряд вируса положителен, поверхностный заряд дисморфного эритроцита уменьшен по сравнению с зарядом эритроцита в норме. Используя эту формулу, можно найти заряд наночастицы на поверхности эритроцита:

$$q_{\text{нано}} = (q_{\text{норм}} - q_{\text{пат}}) / N. \quad (7)$$

Для проведения численных расчетов зарядов и напряженности электрического поля вблизи поверхности эритроцитов было использовано известное численное значение поверхностного заряда нормального эритроцита, равное  $q_{\text{норм}} = 5,93 \cdot 10^{-14}$  Кл, а значения для постоянных эллипсоида в норме:  $a_{\text{норм}} = 0,20 \cdot 10^{-6}$  м,  $b_{\text{норм}} = c_{\text{норм}} = 3,75 \cdot 10^{-6}$  м, а также для наибольшего приближения к реальным результатам параметры эллипсоида в патологии берутся равными следующим численным значениям:  $a_{\text{пат}} = 5,06 \cdot 10^{-6}$  м,  $b_{\text{пат}} = 2,32 \cdot 10^{-6}$  м,  $c_{\text{пат}} = 0,20 \cdot 10^{-6}$  м, которые были определены с помощью программы JMicroVision 1.2.7 из снимков, полученных методом РЭМ (рис. 2). Также было подсчитано приблизительное количество наночастиц на поверхности эритроцита  $N$  на основе РЭМ-снимка (рис. 2), которое составило примерно 1545.

В результате расчетов поверхностный заряд дисморфного эритроцита оказался равным  $q_{\text{пат}} = 4,95 \cdot 10^{-14}$  Кл, а заряд предполагаемого вируса оказался примерно равным

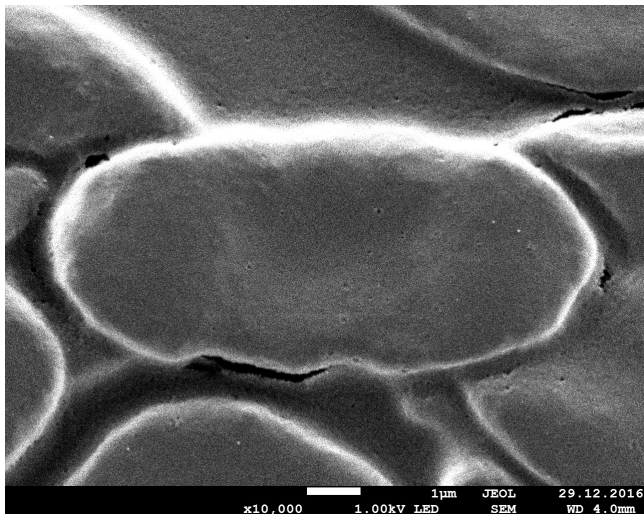


Рис. 2. РЭМ-изображение дисморфного эритроцита при увеличении  $\times 10000$

$q_{\text{нано}} = 0,63 \cdot 10^{-17}$  Кл, т.е. приблизительный заряд одного предполагаемого вируса составил  $40e$ .

### Динамика эритроцитов крови под воздействием внешнего электрического поля

Далее, в серии численных экспериментов был исследован механизм движения эритроцита в крови при воздействии внешнего электрического поля с учетом сопротивления плазмы крови. В первом приближении предполагалось, что движение эритроцита установилось во времени и происходит в тонком слое крови, находящемся на гладкой плоской поверхности между двумя плоскими электродами. Т.е. кровь представляется как бесконечная плоская структура, находящаяся под воздействием внешнего электрического поля  $\vec{E}_{\text{внеш}}$ .

В исследовании динамики движения эритроциты рассматриваются как точечные заряды, численные значения которых уже были определены на первом этапе моделирования. В данной части работы исследуются закономерности движения эритроцитов в крови под воздействием внешнего электрического поля с учетом пространственного заряда эритроцитов и сопротивления жидкости крови.

С учетом изложенных допущений расчет электрических характеристик и гемодинамики эритроцитов был выполнен с помощью математической модели, включающей:

1) уравнения движения эритроцитов с учетом вязкости и пространственного заряда эритроцитов:

$$m_{\text{эр}} \dot{\vec{v}} = q_{\text{эр}} \frac{\vec{E}_{\text{внеш}} + \vec{E}_{\text{внутр}}}{\varepsilon} - C \frac{\rho \vec{v}^2}{2} S, \quad (8)$$

где  $m_{\text{эр}}$  – масса эритроцита,  $\rho$  – плотность крови,  $C$  – коэффициент сопротивления крови,  $S$  – наибольшее поперечное сечение тела;  $q_{\text{эр}}$  – поверхностный заряд эритроцита;  $\vec{E}_{\text{внеш}}$  – внешнее электрическое поле;  $\vec{E}_{\text{внутр}}$  – внутреннее электрическое поле пространственных зарядов эритроцитов в крови,  $\vec{v}$  – скорость эритроцита;

2) уравнения для электрического смещения электрического поля пространственного заряда эритроцитов:

$$\text{div} \vec{D}_{\text{внутр}} = \rho_{\text{зар}}, \quad (9)$$

$$\text{rot} \vec{E}_{\text{внутр}} = 0, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{зар}}$  – пространственная плотность зарядов эритроцитов в крови, которое можно определить по следующей формуле:

$$\rho_{\text{зар}} = \frac{q_{\text{эр}} N}{V}, \quad (11)$$

где  $N$  – количество эритроцитов в объеме крови  $V$ ,

$$\vec{D}_{\text{внутр}} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{внутр}}, \quad (12)$$

3) уравнение непрерывности:

$$\nabla \rho_{\text{эр}} \vec{v} + \rho_{\text{эр}} \text{div} \vec{v} = 0, \quad (13)$$

где  $\frac{\rho_{\text{зар}}}{\rho_{\text{эр}}} = \frac{q_{\text{эр}}}{m_{\text{эр}}}$ .

Так как рассматривается бесконечная плоская система, то все искомые величины в данном случае зависят только от координаты  $y$ , поэтому решение ищется в виде:

$$v_x = v_x(y), \quad (14)$$

$$v_y = v_y(y), \quad (15)$$

$$\rho_{\text{зар}} = \rho_{\text{зар}}(y), \quad (16)$$

$$\vec{E}_{\text{внутр}} = E_{\text{внутр } x}(y) \vec{e}_x + E_{\text{внутр } y}(y) \vec{e}_y. \quad (17)$$

Распишем по координатным компонентам уравнение (9), учитывая уравнения (14–17):

$$\dot{v}_x = \frac{q_{\text{эр}}}{m_{\text{эр}}} \frac{E_{\text{внутр } x}}{\varepsilon} - C \frac{\rho v_x^2}{2} S, \quad (18)$$

$$\dot{v}_y = \frac{q_{\text{эр}}}{m_{\text{эр}}} \frac{E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр } y}}{\varepsilon} - C \frac{\rho v_y^2}{2} S, \quad (19)$$

Так как  $E_{\text{внутр } x}$ ,  $E_{\text{внутр } y}$  являются функциями только от  $y$ , то заменяя в уравнении (10) частную производную на полную, получаем:

$$E_{\text{внутр } x} = c_1, \quad (20)$$

где  $c_1$  – постоянная, определяемая начальным значением напряженности электрического поля.

В уравнении (10), учитывая (17), также заменяем частную производную на полную:

$$\frac{dE_{\text{внутр } y}}{dy} = \frac{\rho_{\text{зар}}}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

и умножаем его на  $\dot{y}$ . Тогда получаем:

$$\dot{E}_{\text{внутр } y} = \frac{\rho_{\text{зар}}}{\varepsilon_0 \varepsilon} \dot{y}. \quad (21)$$

Рассмотрим уравнение (13):

$$\frac{\partial \rho_{\text{зар}}}{\partial y} v_y + \rho_{\text{зар}} \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (22)$$

В уравнении (22) частные производные заменяем на полные, учитывая уравнения (14), (15), и умножаем его на  $\dot{y}$ . Тогда получаем:

$$\dot{\rho}_{\text{зар}} = \frac{\rho_{\text{зар}}}{v_y} \dot{y}. \quad (23)$$

Проинтегрировав уравнение (23), получаем:

$$\rho_{\text{зар}} v_y = c_2, \quad (24)$$

где  $c_2$  – постоянная, определяемая начальными значениями плотности заряда эритроцитов и скорости эритроцита.

Так как  $\rho_{\text{зар}} v_y = c_2$ , то из уравнения (21) следует, что:

$$\dot{E}_{\text{внутр } y} = c_3. \quad (25)$$

Таким образом, в итоге получается система из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{q_{\text{эр}}}{m_{\text{эр}}} \frac{E_{\text{внутр } x}}{\varepsilon} - C \frac{\rho v_x^2}{2} S, \\ \dot{v}_y &= \frac{q_{\text{эр}}}{m_{\text{эр}}} \frac{E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр } y}}{\varepsilon} - C \frac{\rho v_y^2}{2} S, \\ \dot{\rho}_{\text{зар}} &= \frac{\rho_{\text{зар}}}{v_y} \dot{y}, \\ \dot{E}_{\text{внутр } y} &= \frac{\rho_{\text{зар}}}{\varepsilon_0 \varepsilon} \dot{y}. \end{aligned} \quad (26)$$

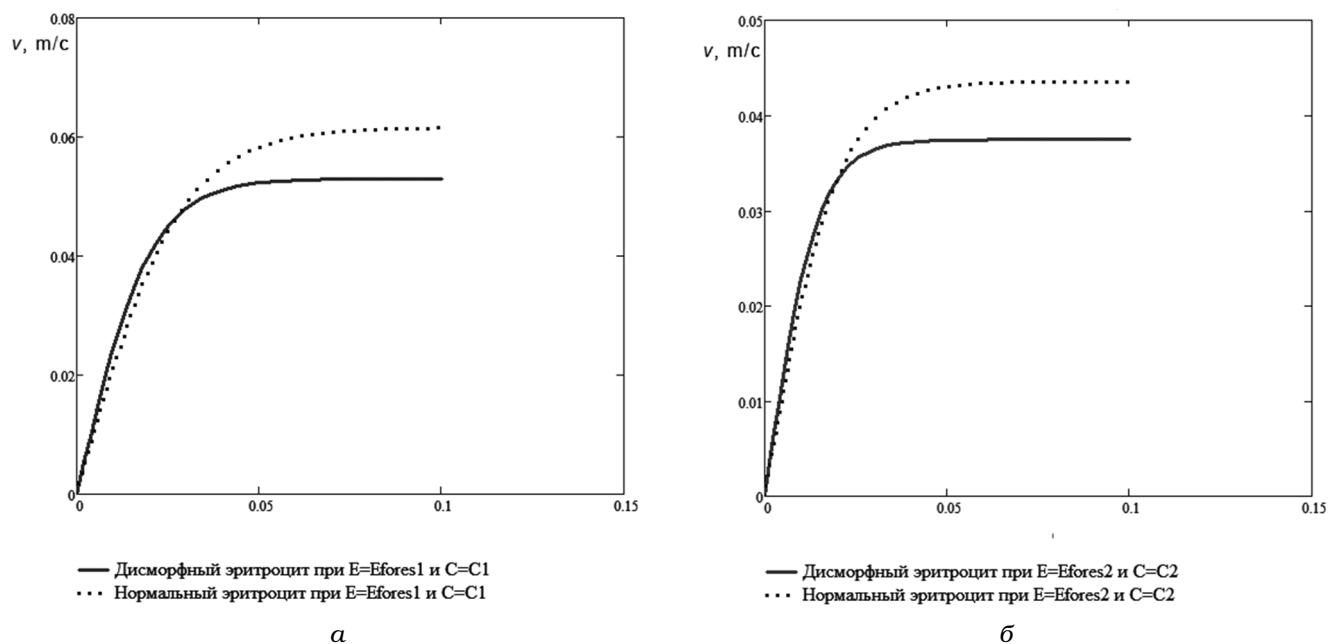
Уравнения (26) представляют собой модель динамики эритроцитов в тонком слое крови, находящемся на гладкой плоской поверхности между двумя плоскими электродами. Решение системы дифференциальных уравнений (26) производится в Mathcad с использованием численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

На рис. 3–5 представлены результаты реализации математической модели динамики эритроцитов под воздействием внешнего электрического поля с учетом сопротивления среды, в которой перемещаются эритроциты. Там же сравниваются скорости нормальных и дисморфных эритроцитов при различных внешних и внутренних условиях.

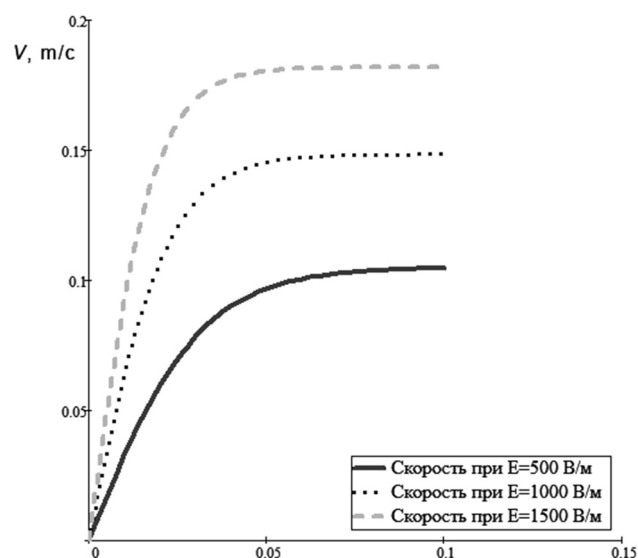
Полученные результаты зависимости скоростей эритроцитов в норме и патологии при одинаковых условиях в рамках модели показывают, что скорости дисморфных эритроцитов значительно ниже, чем скорости нормальных эритроцитов, что подтверждается в некоторых экспериментальных исследованиях [7].

## Заключение

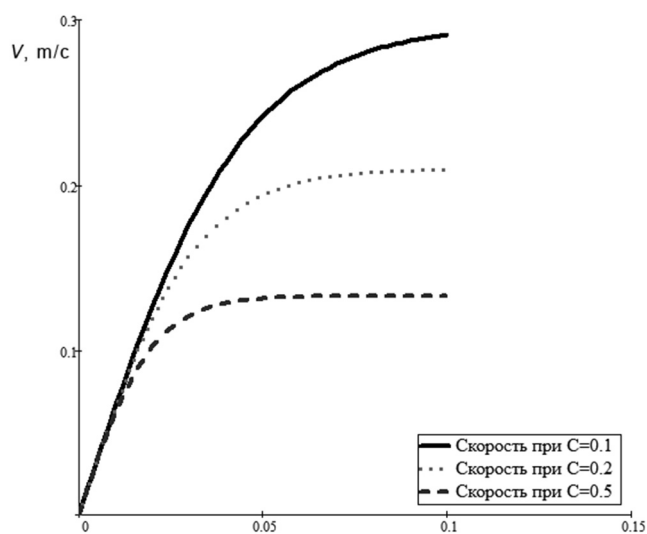
Представленная математическая модель, по которой можно оценить поверхностный заряд мембраны эритроцитов в норме и в патологии с учетом их формы и размеров, а также оценить электрические заряды предполагаемых вирусов на поверхности эритроцитов и исследовать динамику дисморфных и нормальных эритроцитов под воздействием внешнего электрического поля, а также зависимости скорости движения эритроцитов от параметров внешнего электрического поля, поверхностного заряда эритроцита и свойств среды. Это позволило получить дополнительную информа-



**Рис. 3.** Скорость движения дисморфных и нормальных эритроцитов (м/с) в зависимости от времени (с) под воздействием внешнего электрического поля  $\vec{E}_{внеш}$  (а) и коэффициента сопротивления среды (б)



**Рис. 4.** Скорость движения эритроцитов (м/с) в зависимости от времени (с) под воздействием внешнего электрического поля  $\vec{E}_{внеш}$  при различных его значениях и фиксированном коэффициенте сопротивления крови



**Рис. 5.** Скорость движения эритроцитов (м/с) в зависимости от времени (с) под воздействием внешнего электрического поля  $\vec{E}_{внеш}$  при различных значениях коэффициента сопротивления крови

цию о свойствах эритроцитов в норме и патологии, которую, возможно, полезно использовать для разработки комплексного метода диагно-

стики сложно диагностируемых почечных заболеваний.

### Список литературы

1. Чижевский А.Л. Электрические и магнитные свойства эритроцитов. – Киев: “Наукова думка”. 1973. 94 с.
2. Levine S., Levine M. Theory of the electrokinetic behavior of human erythrocytes // *Biophys. J.* 1983. Vol. 42. № 2. P. 127–135.
3. Максимов Г.В., Мамаева С.Н., Антонов С.Р. и соавт. Измерение морфологии эритроцитов методом электронной микроскопии для диагностики гематурии // *Метрология.* 2016. № 1. С. 47–52.
4. Maksimov, G.V., Mamaeva, S.N., Antonov et al. Measuring erythrocyte morphology by electron microscopy to diagnose hematuria // *Measurement Techniques.* 2016. Vol. 59. № 3. P. 327–330.
5. Мамаева С.Н., Мунхалова Я.А., Кононова И.В. и соавт. Исследование эритроцитов крови методом растровой электронной микроскопии // *Вестник Мордовского ун-та.* 2016. Т. 26. № 3. С. 381–390.
6. Мамаева С.Н., Максимов Г.В., Мунхалова Я.А. и соавт. Исследование эритроцитов крови с заболеваниями почек с синдромом гематурии с использованием растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // *Мед. физика.* 2017. № 1(73). С. 58–62.
7. Курилович С.А., Кручинина М.В. Электрические параметры и структура мембран эритроцитов при диффузных заболеваниях печени // *РЖГГК.* 2009. Т. 19. № 2. С. 30–36.

### MODELING THE DYNAMICS OF ERYTHROCYTES MOTION UNDER THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

S.N. Mamaeva<sup>1</sup>, G.V. Maksimov<sup>2</sup>, S.R. Antonov<sup>1</sup>, Ya.A. Munkhalova<sup>1</sup>, A.N. Pavlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> M.K. Ammosov North-Eastern federal university, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup> Biological Faculty of Moscow State University, Moscow, Russia

The physical-mathematical model is formed to determine the surface charge of the erythrocyte, which is approximated by geometric figure of revolution of the second order, and the investigation of the dynamics of erythrocytes is considered under the influence of an external electric field. The electrical charge of the surface of the erythrocyte is calculated in disease. Assumed that the change of red blood cells leads to stabilization of the electric field of intercellular interactions due to Coulomb interactions. The results of studies of the dynamics of modified erythrocytes under the influence of an external electric field depending on the values of their surface charge and resistance of blood plasma are discussed.

Key words: *the medical biophysics, red blood cells, the erythrocyte, the mathematical modeling, electric field*

E-mail: [sargylana\\_mamaeva@mail.ru](mailto:sargylana_mamaeva@mail.ru)