

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

РГБ 04

14 137 1 01

ИГНАТЬЕВ Виталий Васильевич

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭРИТРОЦИТОВ В ПОТОКАХ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПО СОСУДАМ КРОВИ

Специальность 03.00.13 - физиология человека и животных

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург

2000 г.

Работа выполнена в Военно-медицинской академии

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАМН,
В.О.Самойлов

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук, доцент
П.П.Рымкевич.

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор Пушкарев Ю.П.
доктор биологических наук, старший научный сотрудник Сунгуров А.Ю.

Ведущая организация: Институт Физиологии им.И.П.Павлова РАН

16⁰⁰ Защита диссертации состоится 18 мая 2000 г. в
час. на заседании Диссертационного совета К 063.57.09. по
защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата
биологических наук в Санкт-Петербургском Государственном
Университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская
набережная дом 7/9. *аудитория № 90*

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.
А.М.Горького Санкт-Петербургского Государственного университета
и в библиотеке ЕМеДА.

Автореферат разослан "19" мая 2000 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат биологических наук *Р.И.Коваленко*

Р.И.Коваленко
1358.09, 0
F 911.2 0 1 0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основу настоящего исследования положены сформулированные и частично доказанные гипотезы Александра Леонидовича Чижевского о структурной организации движущейся *in situ* крови и электродинамических свойствах ее форменных элементов. Механические и электродинамические характеристики эритроцитов в основном определяют характер их движения по кровеносным сосудам и способность выполнять свои функции в тканях и органах. Форма эритроцитов значительно влияет на кинетику крови в целом, которая определяется уровнем обмена веществ и энергии в тканях. Свойства эритроцитов определяют также их структурно-функциональную полноценность, обуславливают величину "электростатического распора" (по Чижевскому), что может определять реакцию потока крови на действие внешних электромагнитных полей.

Исследования, направленные на аналитическое моделирование физиологических процессов в эритроцитах при их движении по сосудам, являются фундаментальными и решают ряд проблем, важных для биологии, физиологии и медицины, что обуславливает актуальность данной темы. Они выполнены в рамках Государственной научно-технической программы "Здоровье населения России" (02. "Экологически обусловленные заболевания и профилактические программы"), а также военно-медицинской проблемы "Влияние на организм неионизирующих излучений и разработка медицинских требований к защите от них".

Цель и задачи работы. Цель работы заключается в исследовании закономерностей движения крови по сосудам посредством аналитического описания и экспериментального исследования механических, а также электродинамических свойств движущихся в потоках крови эритроцитов. Для достижения этой цели решены следующие задачи: 1. Аналитическое описание механических и электродинамических свойств эритроцитов в потоках движущейся по сосудам крови. 2. Экспериментальное исследование механических и электродинамических свойств эритроцитов в потоках движущейся по сосудам крови. 3. Сопоставление результатов аналитических и экспериментальных исследований механических и электродинамических свойств движущихся эритроцитов.

Научная новизна. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект ротационной диффузии и неспецифической сорбции компонентов плазмы крови движущимися *in situ* по магистральным сосудам безъядерными эритроцитами. Получены в эксперименте данные,

подтверждающие основные положения гипотезы А.Л.Чижевского о структурной организации эритроцитов в радиально-кольцевые системы. Установлены возможные механизмы появления у движущихся клеток крови некомпенсированных отрицательных электрических зарядов. В эксперименте доказана возможность неспецифической сорбции экогенного коллоида движущимися по магистральным сосудам безъядерными эритроцитами, а также установлено, что потоки движущейся по сосудам крови являются конвекционными электрическими токами, создающими в окружающем их пространстве электромагнитные поля. Разработаны методы регистрации реакций потоков движущейся *in situ* крови на действие постоянных и низкочастотных электромагнитных полей. Материалы исследования могут явиться основой для развития нового теоретико-экспериментального направления дальнейшего изучения электромеханических свойств крови животных и человека.

Практическая значимость работы. Оформлены две заявки на изобретения: 1). Способ очистки жидкостей и газов от взвесей; 2). Ротационный фильтрующий элемент. На обе заявки получены положительные решения о выдаче патентов N 93016177/26 (019560) от 24.11.1994г. и N 93016176/26 (019559) от 15.01.1996г. из ВНИИГПЭ. Практическое их применение ведется в рамках Санкт-Петербургской программы "Чистый город". В основу изобретений положены обнаруженные в нашей работе свойства движущихся в потоках крови безъядерных эритроцитов. Материалы диссертации включены в учебный процесс при преподавании биомеханики и физиологии в Санкт-Петербургских государственных Техническом и Электротехническом университетах.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации выполнен отчет НИР N 26-94-В7 "Исследование механизмов влияния на организм электромагнитных излучений низкочастотного диапазона", опубликовано 7 научных работ, в том числе две статьи в "Физиологическом журнале им. И.М.Сеченова", получены два положительных решения о выдаче патентов на изобретения. Результаты выполненных исследований доложены и обсуждены на всероссийской и международной конференциях: "Ньютон и проблемы механики твердых и деформированных тел." Санкт-Петербург, Россия, март 1993 г., "Эколого-физиологические проблемы адаптации.", Москва, Россия, 1994 г, а также на международном симпозиуме по "Электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии", Санкт-Петербург, Россия, июнь 1995 г, и на семинарах в Институте Физиологии им. И.П.Павлова РАН, 1994г, 1997г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка использованных источников, приложения и содержит 125 страниц машинописного текста, 27 рисунков и 4 таблицы. Библиография к ней составляет 114 литературных источников.

Положения, выносимые на защиту.

1. Движущиеся в потоках крови эритроциты, организованные в радиально-кольцевые системы, участвуют в двух движениях - поступательном и вращательном с устойчивой осью вращения. При этом во вращающемся эритроците *in situ* существует вынужденная диффузия компонентов плазмы крови через него.

2. Движущиеся *in situ* эритроциты имеют нескомпенсированный отрицательный электрический заряд, вследствие чего потоки движущейся крови являются переменными конвекционными электрическими токами - приемниками и генераторами электромагнитных полей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна и научно-практическая значимость, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведены данные отечественных и зарубежных исследований, посвященные физическим свойствам и моделям подвижных клеточных (эритроцитарных) систем. Наиболее важными результатами, полученными к 1959 г. А.Л. Чижевским и его сотрудниками при исследовании крови, являются: 1. Математическое доказательство симметричного расположения эритроцитов в кровотоке и организация их в радиально-кольцевые системы в магистральных сосудах; 2. Учет влияния на движение крови сил электростатического отталкивания, возникающих между движущимися ее клетками. Однако предположения о том, что потоки движущейся в организме крови являются конвекционными электрическими токами, а вращающиеся в них эритроциты должны иметь собственные магнитные моменты, не имеют достаточного математического и экспериментального доказательства. Известны лишь единичные публикации, посвященные в основном экспериментальной проверке гипотезы А.Л. Чижевского о структурной организации движущейся крови. Из электромеханических свойств суспензий клеток описан только эффект электростатического отталкивания (распора) между ними, причем приводимая величина этого параметра

сильно отличается у разных авторов. Был описан также эффект возникновения разности потенциалов между сосудистой стенкой и потоком движущейся относительно нее крови. Обзор литературы свидетельствует об актуальности темы нашей диссертации.

Во второй главе рассмотрены аналитические модели электромеханических свойств эритроцитов в потоках движущейся крови. К таким свойствам, согласно нашей модели, относится неспецифическая сорбция.

Микроскопические наблюдения эритроцитов в норме показывают, что клетки по внешнему виду напоминают дискотороиды, эллипсоиды и т.п. Таким образом, эритроцит можно в первом приближении представить в виде фигуры вращения. В поле сил инерции происходит перенос частиц плазмы крови от приосевой области эритроцита к его периферии и неспецифическая сорбция их эритроцитом. Приведем без доказательства выражение, определяющее полный поток частиц класса "К" через поверхность вращающегося эритроцита:

$$Q_K = - \frac{X_K \delta_K \omega^2 4\pi K M D_K}{(2 - K) R_T} \cdot [2(r^*)^2 \cdot z(r^*) + 5 \int_{r^*}^R z(r) r dr], \quad (1)$$

где: М - молярная масса переносимого класса частиц; R_T - универсальная газовая постоянная; X_K - коэффициент прозрачности областей ротационного массопереноса частиц; δ_K - плотность областей ротационного массопереноса.

Рассмотрим ситуацию, когда микрочастица (коллоидная частица) попала внутрь эритроцита и под действием сил инерции продолжает свое движение из приосевой области к его периферии. Предполагая, что данная частица может проходить только через области ротационного массопереноса в плазмолемме эритроцита, можно приближенно определить вероятность ее выхода из него:

$$P_B \approx S_{од} / S = \delta_K, \quad (2)$$

$S_{од}$ - полная площадь областей ротационного массопереноса; S - поверхность эритроцита (если $S_{од} / S \approx 0,01$, то $P_B \approx 0,01 = \delta_K$).

Найдем количество частиц заданного класса, оседающих за единицу времени на внутренней поверхности плазмолеммы эритроцита:

$$Q_K(ос) \approx Q_K(1 - \delta_K), \quad (3)$$

Вероятность оседания частиц класса "К" в теле эритроцита будет больше, чем $(1 - \delta)$, так как в этом процессе помимо плазмолеммы принимают участие и все внутренние структуры эритроцита.

Таким образом, во вращающемся безъядерном эритроците должна

происходить сепарация по размерам и неспецифическая сорбция частиц плазмы крови, причем крупные частицы должны оседать около оси вращения его, а мелкие внутри него. Параметры этого процесса можно в первом приближении определить из уравнений (1,2,3).

Из нашей модели следуют также электромеханические свойства эритроцитов. Клеточные дисперсные системы имеют особенности, отличающие их от неживых грубодисперсных систем. Одна из них заключается в том, что отдельно ваятая клетка помимо свободной энергии сил поверхностного натяжения имеет запас свободной энергии, обусловленный работой ее метаболических систем. Так, электростатическая составляющая свободной энергии клетки, определяемая только величиной ее трансмембранной разности потенциалов, равна:

$$G_э = \frac{c}{2} U_{пп}^2 = \frac{U_{пп}^2 2\pi \epsilon \epsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

$r_2 - r_1 = l$ - толщина плазмолеммы.

Используя выражение (4), определим приближенно величину $G_э$ клетки, если $U_{пп} \approx 70$ мВ, $l \approx 10$ нм, $r_1 \approx 7$ мкм, $\epsilon_{мемб.} \approx 6$. Тогда $G_э \approx 4,3 \cdot 10^4$ эВ $= 7,08 \cdot 10^{-15}$ Дж., тогда как $G_э(кол) \approx 176 \cdot 10^{-20}$ Дж $= 10,88$ эВ. Следовательно, энергия живой клетки ($U_{пп} \approx 70$ мВ) на три порядка больше энергии коллоидной частицы, хотя удельные величины свободной энергии их электростатических полей соизмеримы.

Таким образом, одним из факторов, определяющих формирование внешних ионных оболочек живой клетки, может являться не только уход с ее поверхности ионов от групп COOH, но и привлечение из дисперсионной среды ионов, образующих внешнюю обкладку объемного конденсатора, изолятором которого является плазмолемма клетки.

В случае, когда объемный конденсатор (клетка) является сферическим, поверхностные плотности и величины зарядов по обеим сторонам плазмолеммы описываются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} |q_э| = \epsilon \epsilon_0 |U_{пп}| \frac{r}{(1-r)l} & , & |q_э| = |q_i| = \\ |q_i| = \epsilon \epsilon_0 |U_{пп}| \frac{1}{(1-r)l} & , & = 4\pi \epsilon \epsilon_0 |U_{пп}| \frac{r}{1-r} \end{cases} \quad (5)$$

r - внутренний радиус клетки, $U_{пп}$ - трансмембранная разность потенциалов, l - толщина плазмолеммы, индексы ϵ и i - обозначают внешнюю и внутреннюю стороны плазмолеммы.

Подвижности внутренних и внешних зарядов клетки различны. На

ионы, находящиеся вне клетки, действуют только кулоновские силы. Ионы в движущейся клетке (эритроците) перемещаются вместе с ней, составляя единое целое. На ионное "облако", окружающее эритроцит, помимо деформирующих его гидродинамических сил действуют электростатические силы (тормозящие ионы) со стороны эндотелиальных клеток сосуда. Следовательно, движущийся эритроцит приобретает некомпенсированный отрицательный электрический заряд. Электростатические силы отталкивания между живыми клетками крови, а также между ними и клетками эндотелия облегчают течение крови по сосудам, уменьшая силу внутреннего трения движущейся крови.

Пренебрегая деформацией эритроцита при совершении им свободных колебаний, можно утверждать, что каждый эритроцит в радиально-кольцевой системе обладает пятью степенями свободы. Для определения частот колебаний эритроцита, соответствующих его поступательному перемещению в каждой из плоскостей X, Y, Z, воспользуемся одномерной моделью. Спектр собственных частот колебаний эритроцитов в кровотоке можно определить по формуле:

$$\omega_{0j} = \frac{Q_0}{a_j} \cdot \sqrt{\frac{1 - \gamma R^2 / a_j^2 + \xi R^4 / a_j^4}{\pi \xi \varepsilon_0 m_0}}, \quad (6)$$

$a_j = 2\alpha_j \sqrt[3]{(\pi N Q)^{-1}}$, α_j - для плоскости "x" равно 0,374, а для плоскостей "y" и "z" равно 1, $Q = 0,28$, N - гематокрит.

По этой формуле (6) были рассчитаны ожидаемые средние значения собственных частот колебаний "среднего" эритроцита:

$$\omega_x = 328,614 \text{ кГц}, \quad \omega_{y,z} = 125,554 \text{ кГц}.$$

В рамках одномерной модели не учтено, что соседние эритроциты в радиально-кольцевой системе не параллельны друг другу ($\omega_y \neq \omega_z$).

Другой электродинамической характеристикой потока крови *in situ* (конвекционного электрического тока) является мгновенное значение и ориентация вектора напряженности создаваемого им магнитного поля. Она равна:

$$H = \frac{\sum i}{2\pi l}, \quad (7)$$

l - расстояние от оси цилиндра с током до коаксиальной цилиндрической поверхности, на которой находится точка наблюдения.
 $l > a$ - радиуса цилиндра.

Согласно модели А.Л. Чижевского, движущиеся в потоке крови эритроциты имеют высокие скорости вращения с устойчивой осью. Это допущение в сочетании с тем, что эритроциты в кровотоке могут

иметь нескомпенсированные электрические заряды, ведет к появлению у них магнитных моментов. Выражение (7) определяет тангенциальную составляющую магнитного поля. Магнитные моменты эритроцитов определяют ортогональную составляющую этого поля. Выражение, определяющее мгновенную напряженность этого поля, имеет вид:

$$H'_{\text{жс полн.}} = 6lhPm_j \sum_{j=1}^N \frac{[g-j(d_0+\Delta h)]^2+h^2}{\{h^2-[g-j(d_0+\Delta h)]^2\}^3} + 12lh m_j \sum_{j=1}^N \frac{i^2(d_0+\Delta h)^2+[g-j(d_0+\Delta h)]^2+h^2}{\{i^2(d_0+\Delta h)^2+[g-j(d_0+\Delta h)]^2+h^2\}^2 - \{2h[g-j(d_0+\Delta h)]^2\}^2} \quad (8)$$

где: N - номер соседнего сечения потока крови. Эритроциты, магнитные моменты которых не совпадают с направлением силовых линий внешнего поля, вынуждены ориентироваться по нему. Угол поворота эритроцита по отношению к вектору скорости потока крови определяет величину его "лобового" сопротивления потоку.

Из описанных математических моделей следует: 1. Поле центробежных сил создает условия для ускорения процесса переноса компонентов плазмы крови через эритроцит в плоскости его вращения, что ведет к неспецифической сорбции твердых коллоидных частиц плазмы в нем. Структура потоков вещества, проходящего через вращающийся эритроцит, изображена на Рис.1.

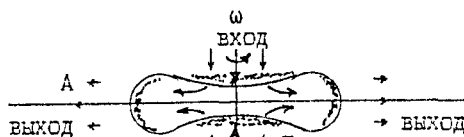


Рис.1.
Структура потоков жидкости во вращающемся эритроците. обозначения: А-низкомолекулярный осадок, В-высокомолекулярный осадок.

2. Движущаяся по сосудам кровь представляет собой поток отрицательно заряженных частиц. Этот электрический ток в окружающем пространстве создает переменные электромагнитные поля. 3. Собственное электромагнитное поле движущихся эритроцитов способствует появлению у них электромеханических колебаний. 4. Потoki движущейся крови реагируют на внешнее электромагнитное поле в соответствии с законами электро- и гидродинамики.

В третьей главе описаны методы и методики проведенных исследований. Метод аналитического моделирования позволяет посредством обработки данных опытов построить цепь логико-математических суждений, позволяющих обобщить исходную информацию об исследуемом явлении, предсказать его поведение в новых условиях опыта и опи-

сать его еще неизвестные свойства. В экспериментах были применены методы электронной и прижизненной телевизионной микроскопии. Для обнаружения электромагнитных колебаний эритроцитов в рассчитанном диапазоне частот применялся метод осциллографии с использованием специальной рамочной антенны. В исследованиях сорбционных свойств механических моделей эритроцитов использовали метод оптического светорассеивания и измеряли коэффициент поглощения водной взвеси кожаной пыли до и после взаимодействия ее с моделью эритроцита.

Четвертая глава посвящена результатам проведенных экспериментов, а пятая - их обсуждению. Эффект неспецифической сорбции коллоидных частиц (окислов железа и нерастворимых солей свинца) движущимися *in situ* эритроцитами наблюдали в опытах на десяти кроликах. Всего было выполнено 120 измерений. В первой серии опытов наркотизированным животным вводили внутривенно "магнитную жидкость" (окислы железа). Через равные промежутки времени у них брали пробы крови, которые разбавляли в 1000 раз 0,9% раствором хлорида натрия и измеряли величину перемещения эритроцитов *in vitro* по градиенту постоянного магнитного поля, создаваемого в специальной камере (Рис. 2.).

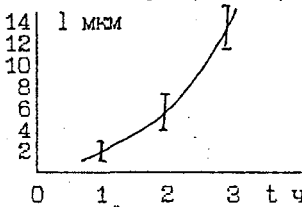


Рис. 2. Величина подъема нагруженных "магнитной жидкостью" эритроцитов в неоднородном магнитном поле $B=97,5$ мТл. l - высота подъема эритроцитов; t - время экспозиции.

Во второй серии экспериментов четырем кроликам вводили внутривенно коллоид солей свинца. После экспозиции препарата *in situ* в течение трех часов изготовили 115 срезов эритроцитов по стандартной электронно-микроскопической методике. На микроэлектронных фотографиях обнаружены частицы - крупные (20 и более нм.) снаружи в углублениях плазмолеммы эритроцита, а мелкие (около 10 нм.) внутри него. Полученные результаты хорошо совпадают с их теоретическим прогнозом (см. рис 1).

В третьей серии опытов на механических моделях эритроцитов (48 наблюдений), измеряли коэффициент поглощения раствора загрязненной кожаной пылью жидкости, после обработки ее в течение 15 минут пенопластовыми дискотороидами, моделирующими эритроциты с угловой скоростью $2,4 \text{ с}^{-1}$ (результаты измерений приведены в Табл.1).

Отмечено осаждение кожевенной пыли внутри модели на ткани, имитирующей плазмолемму эритроцита. Параметры модели соответствовали форме среднего эритроцита, увеличенного примерно 50000 раз.

Таблица 1.
Коэффициенты поглощения водной взвеси кожевенной пыли после очистки ее механической моделью эритроцита в течении 15 минут. (исходный $K_{\text{погл.}} = 0,54$)

количество измерений	коэффициент поглощения	
	бязевые мембраны	нетканые мембраны
9	$0,22 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$
8	$0,25 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,02$
8	$0,23 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$
среднее	$0,2(3) \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01(3)$

Таким образом в трех сериях опытов было доказано, что движущиеся эритроциты плазмы вследствие своего вращения.

Следующие опыты имели своей целью проверить существование собственных колебаний эритроцитов, организованных в радиально-кольцевые системы. Рамочная антенна измерителя устанавливалась вблизи лучевой артерии испытуемого. Получаемые сигналы фиксировали с экрана осциллографа. Усредненные значения собственных частот колебаний эритроцитов у испытуемых приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Средние значения измеренных собственных частот колебаний эритроцитов в кровотоке испытуемых.

номер степени свободы	1	2	3	4	5
Первая серия (мужчина)	$74,1 \pm 0,3$ кГц	$79,7 \pm 0,5$ кГц	$125 \pm 0,7$ кГц	$1,8 \pm 0,4$ МГц	$5,2 \pm 0,8$ МГц
Вторая серия (мужчина)	$55,5 \pm 0,2$ кГц	$66,6 \pm 0,3$ кГц	$166,6 \pm 0,2$ кГц	$4,2 \pm 0,4$ МГц	$5,1 \pm 0,5$ МГц
Третья серия (мужчина)	$58,8 \pm 0,3$ кГц	$60,9 \pm 0,4$ кГц	$142,2 \pm 0,2$ кГц	$2,2 \pm 0,1$ МГц	$4,7 \pm 0,3$ МГц
Четвертая серия (женщина)	$134,7 \pm 0,4$ кГц	$146,8 \pm 0,3$ кГц	$250,2 \pm 0,5$ кГц	$2,9 \pm 0,1$ МГц	$3,6 \pm 0,1$ МГц

1, 2, 3 - степени свободы поступательного движения;
4, 5 - степени свободы колебательного движения.

Анализ осциллограмм в процессе проведения опытов показал, что они соответствуют изображениям модулированных сигналов. Следовательно эритроциты в крови колеблются синхронно.

Опыты с измерением собственных частот колебаний эритроцитов, движущихся по кровеносным сосудам, свидетельствовали также о том,

что они обладают нескомпенсированным электрическим зарядом. Более убедительно это доказали исследования действия электромагнитных полей низкочастотного диапазона на микрососуды. Была применена прижизненная микроскопия пародонта человека (30 исследований на трех испытуемых) и лабораторных животных (40 исследований на 4 кроликах). Для формирования электрического поля в биообъекте токовые импульсы от генератора подавали в цепь, образованную токопроводящими частями контактного объектива микроскопа и электродом расположенным на плече испытуемого. Магнитное поле в биообъекте формировалось катушкой намотанной на контактный объектив микроскопа. Микроизображения наблюдений фиксировали на видеопленку. При подаче импульсного низкочастотного магнитного поля ($E = 0,5$ мГл и более) с частотой 0,5-2 Гц наблюдалось заметное движение петель капилляров (см. табл. 3.). Действие постоянного магнитного поля на микрососуды пародонта (диаметром 10-20 мкм.) состояло в формировании в них ассоциатов эритроцитов. При отключении магнитного поля ассоциаты движущейся крови в этих сосудах исчезали.

Табл. 3.
Средние величины отклонения петель капилляров в пародонте человека магнитной составляющей импульсного низкочастотного ЭМП (частота 0,5 - 2 Гц).

Диаметр капилляра, мкм.	Диаметр петли, мкм.	Величина магнитной индукции, мГл.	Среднее отклонение петли капилляра, мкм.	число наблюдений ед.
7,5 ± 0,5	60 ± 0,5	0,5 ± 0,1	5,6 ± 0,7	9
7,5 ± 0,5	60 ± 0,5	1 ± 0,1	9 ± 0,4	11
7,5 ± 0,5	60 ± 0,5	1,75 ± 0,1	10,25 ± 0,6	15
8,0 ± 0,5	85 ± 0,5	0,5 ± 0,1	12,8 ± 0,3	9
8,0 ± 0,5	85 ± 0,5	1 ± 0,1	15,2 ± 0,5	14
8,0 ± 0,5	85 ± 0,5	1,75 ± 0,1	17,1 ± 0,4	12
8,2 ± 0,5	83 ± 0,5	0,5 ± 0,1	15,6 ± 0,3	11
8,2 ± 0,5	83 ± 0,5	1 ± 0,1	17,2 ± 0,5	10
8,2 ± 0,5	83 ± 0,5	1,75 ± 0,1	21,1 ± 0,3	14

При изучении реакции потоков крови в микрососудах пародонта на действие постоянного электрического поля отмечено изменение скоростей движения эритроцитов в капиллярах в зависимости от его величины и полярности. Подключение контактного объектива к отрицательному полюсу источника тока с увеличением его силы вело к замедлению кровотока в капиллярах, а при плотности тока $j = 22,2 - 31,3$ мкА/см² происходила инверсия направления движения эритро-

цитов в них. Замена полярности тока на противоположную с увеличением его силы вела к полной остановке кровотока в наблюдаемых капиллярах, а при $j = 80 - 100 \text{ мкА/см}^2$ в пародонте кроликов хорошо были видны отдельные, вышедшие за пределы капиллярной стенки, эритроциты.

Следующая серия опытов была проведена с эритроцитами *in vitro*. Исследовалось их оседание в стеклянном капилляре и влияние на этот процесс магнитного поля. Основным условием проведения опытов являлось создание на внутренней стенке стеклянного капилляра клеточного слоя из эритроцитов, который имитировал сосудистый эндотелий. Далее в стеклянный капилляр вводилась порция свежеприготовленного препарата крови (разведение в 1000 раз см. стр.10). и подавалось импульсное магнитное поле. Заметим, что без создания слоя клеток магнитное поле не влияло на оседание эритроцитов. Если же эритроциты, перемещались взаимодействуя с осажденными клетками на стенке капилляра, то наблюдали изменение их траектории под действием поля ($B = 208 \text{ мТл}$). Характерная траектория одного из оседающих в поле сил тяжести эритроцитов до, в момент и после воздействия представлена на рис.4.

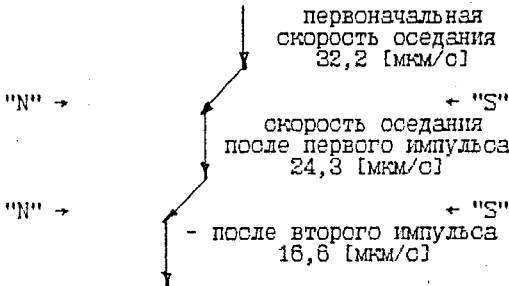


Рис.4. Характерная траектория движения оседающего в поле сил тяжести эритроцита (без воздействия и под воздействием импульсного магнитного поля).

Однообразие отклонения эритроцитов указывает на то, что все они имеют нескомпенсированный отрицательный электрический заряд. В табл.4 приведены средние скорости оседания эритроцитов в стеклянном капилляре ($B = 208 \text{ мТл}$).

Синусоидальное низкочастотное магнитное поле тоже уменьшает скорость оседания эритроцитов. Без воздействия поля средняя скорость оседания была равна 27,6 мкм/с, на частоте 160 Гц она уменьшалась в 1,47 раза, а на частоте 500 Гц ($B=57 \text{ мТл}$) - в 1,87 раза. Подвижность эритроцитов в свежеприготовленных препаратах (2 - 3 минуты после взятия крови) на порядок больше приводимой в ли-

температуре ($1,1 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$) и достигает величин $15 - 18 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ (рис 5).

Таблица 4.
Средние скорости движения оседающих эритроцитов при свободном падении и под действием импульсного магнитного поля

Интервал наблюдения	Скорость движения эритроцитов			Расстояние от стенки капиллара
	танг. сост.	норм. сост.	результ.	
I	$0,0 \pm 0,5$	$34,0 \pm 0,4$	$34,0 \pm 0,3$	126 ± 10 мкм
II	$17,3 \pm 0,6$	$18,6 \pm 0,3$	$28,1 \pm 0,3$	
III	$0,0 \pm 0,3$	$26,2 \pm 0,6$	$26,2 \pm 0,4$	

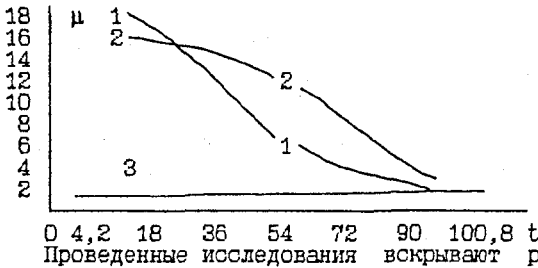


Рис. 5. Подвижность эритроцитов в электрическом поле в зависимости от времени инкубации их в изотонической среде.
Обозначения: μ - [$10^{-8} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$], t - [$10^2 \cdot \text{с}$];
1-0,9% NaCl; 2-плазма крови; 3-"тени" в 0,9% NaCl.

Проведенные исследования вскрывают ряд механизмов поведения эритроцитов в потоках движущейся крови. Они, прежде всего, указывают на неотделимость друг от друга электрических и механических процессов, имеющих место в движущейся крови. Пренебрежение одним из них ведет к серьезным теоретическим заблуждениям, вызывающим трудности в решении ряда насущных практических задач современной биологии и медицины. Исследования реологических свойств крови в настоящее время проводятся в основном *in vitro* без учета ее электрических свойств и времени, прошедшего с момента ее забора. В самом деле, при извлечении крови в "пробирку" теряется влияние на нее эндотелия кровеносных сосудов, который сильно влияет на электрогенные свойства крови.

В силу существования эффекта неспецифической сорбции все множество циркулирующих в крови эритроцитов можно условно разбить на два подмножества. Подмножество эритроцитов, имеющих малые массы и невысокие скорости вращения, вероятно, выполняет гаготранспортную функцию. Подмножество относительно крупных и массивных эритроцитов сорбирует компоненты плазмы крови. Если процесс сорбции связан в основном с грубодисперсными частицами, то при извле-

чении эритроцитов *in vitro* высока вероятность образования монетных столбиков. Стабильность коллоидной частицы в "растворе" определяется соотношением между ее массой и энергией сил поверхностного натяжения. Эритроциты, как грубодисперсные частицы, имеющие большую массу, не могут быть стабилизированы в крови только за счет энергии сил поверхностного натяжения. Между одноименно заряженными клетками крови и клетками эндотелия появляются силы электростатического отталкивания, которые противостоят их агрегации. Резонансное поглощение эритроцитами движущейся крови внешних электромагнитных полей ведет к увеличению амплитуды их колебаний и может уменьшить текучесть крови.

В заключении подведен общий итог многопланового теоретического и экспериментального материала, полученного в результате нашей работы.

ВЫВОДЫ

1. Эритроциты в процессе движения по магистральным сосудам фильтруют плазму крови за счет вращения и сорбируют её компоненты: крупнодисперсные - на внешней стороне плазмолеммы, а мелкодисперсные - внутри эритроцита (на периферии тороида).

2. Эритроциты, сорбировавшие экзогенные частицы "магнитной жидкости" перемещаются по градиенту магнитного поля.

3. Эритроциты, движущиеся относительно эндотелия, приобретают нескомпенсированный отрицательный электрический заряд, что придает потоку крови свойства конвекционного электрического тока - "мишени" внешних электромагнитных полей, которые могут изменить скорость кровотока, повернуть его вспять, вызвать перемещения капиллярных петель в тканях.

4. Эритроциты, движущиеся по магистральным сосудам, организованы в радиально-кольцевые системы, о чем свидетельствует совпадение расчетных и измеренных значений частот их собственных колебаний.

5. Низкочастотное импульсное магнитное поле замедляет скорость оседания эритроцитов (отрицательно заряженных частиц) в стеклянном капилляре только при наличии сорбированных на стенках капилляра клеток крови за счет появления у оседающих эритроцитов тангенциальной составляющей вектора скорости.

6. Экспериментальное исследование подтвердило основные положения аналитического описания механических и электродинамических

свойств эритроцитов в потоках движущейся крови.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Игнатъев В.В., Рымкевич П.П. Вякоупругость деформированных живых клеток крови. // Теа. док. Международная конференция "Ньютон и проблемы механики твердых и деформированных тел". - С.Пб., 22-27 марта 1993. - С.8.

2. Кидалов В.Н., Коваль Ю.Ф., Суббота А.Г., Игнатъев В.В. Трансформация эритроцитов, их ультраструктура, изменение в агутках крови под влиянием инфракрасного лазерного излучения // Теа. док. на конференции "Оптика лазеров 93" РАН и др. - С.Пб. 1993. - С.610.

3. Игнатъев В.В. Неспецифические сорбционные свойства эритроцитов млекопитающих как основа построения динамических ротационных фильтров очистки жидкостей и газов от взвесей. // Теа. док. Седьмого Всероссийского симпозиума "Эколого-физиологические проблемы адаптации." - М. 1994. - С.134.

4. Игнатъев В.В., Кидалов В.Н., Самойлов В.О., Суббота А.Г., Суховецкая Н.Б., Сясин В.И. Реакция эритроцитов движущейся крови млекопитающих на действие постоянных и импульсных электромагнитных полей низкочастотного диапазона. // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. - 1995. - Т.81. N 12. - С.155-120.

5. Игнатъев В.В., Кидалов В.Н., Рымкевич П.П., Самойлов В.О. Массоперенос компонентов плазмы крови через плазмолемму эритроцитов в поле ротационных сил. // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. - 1996. - Т.82. N 5-6. - С.72-75.

6. Игнатъев В.В., Кидалов В.Н. Образование эхиноцитов как релаксационный процесс. // Теа. док. IV международной конференции "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов." ЭМС-96. - С.Пб. 1996. - С.493-495.

7. Игнатъев В.В., Кидалов В.Н. Способ оценки изменений неспецифической резистентности организма по скорости перехода дисконидных эритроцитов в эхиноциты (по релаксации) // Сборник усовершенствования методов и аппаратуры, применяемых в учебном процессе, медико-биологических исследованиях и клинической практике. - С.Пб. ЕМедА. 1996. вып. 27. - С.39.