

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В.Р. Цибульский, О.С. Шайдуров

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С КРОВОТОКОМ В КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ ЧЕЛОВЕКА

Рассмотрены основные модели движения крови в кровеносном сосуде, силы, действующие на процесс кровообращения, влияние электромагнитных полей на микроциркуляцию крови. Предложена гипотеза о возникновении электромагнитной индукции и самоиндукции в кровеносном сосуде и электродвижущей силе, влияющей на поток крови.

Микроциркуляция крови, электромагнитное поле, кровоток, магнитное поле, воздействие, движение, кровь, миоциты, кровеносные сосуды, гидродинамика.

Принято считать, что движение крови обусловлено разностью давлений в начале и конце сосудов. Причиной возникновения разности давлений является работа сердца, которое можно считать насосом по отношению к сосудистой системе.

Ламинарное движение без учета растяжимости сосудов описывают уравнения Бернулли и Хагена — Пуазейля [55]:

$$Q = \int_S v(r) dS = 2\pi \int_0^R v(r) r dr = \frac{\pi D^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L},$$

где Q — расход жидкости в трубопроводе; D — диаметр трубопровода; v — скорость жидкости вдоль трубопровода; r — расстояние от оси трубопровода; R — радиус трубопровода; $p_1 - p_2$ — разность давлений на входе и на выходе из трубы; η — вязкость жидкости; L — длина трубы.

Но данная модель носит скорее наглядный характер, так как имеет существенные ограничения по упругости сосудов, идеальности жидкости и ламинарности течения.

В более современных моделях учтены различные течения крови, исследованы условия распространения пульсовой волны и изменения амплитуды кровяного давления (работы Т. Педли, С.А. Регирера, А.С. Вольмира, Н.Н. Савицкого [1, 10–12]). В их основе лежат линейные и нелинейные математические модели кровообращения. Линейная модель для упругих стенок сосуда была впервые разработана Юнгом [1]:

$$c_0 = (Eh/\rho d)^{1/2},$$

если учитывать продольное растяжение, то формула выглядит следующим образом:

$$c_0 = (Eh/\rho d)^{1/2} (1 - \sigma_{x\theta} \sigma_{\theta x})^{-1/2},$$

где c_0 — скорость; E — модуль Юнга; h — толщина стенки; d — диаметр сосуда в невозмущенном состоянии; $\sigma_{x\theta} \sigma_{\theta x}$ — коэффициент Пуассона для окруж-

ных и продольных напряжений. Формула для c_0 известна также как скорость волны Моэнса — Кортвега.

Интересная модель представлена В.А. Лищуком [6]. Он предлагает использовать обобщенный участок кровеносного сосуда, состоящий из одного или нескольких сосудов, имеющий усредненные параметры движения крови, сопротивления, давления эластичности. Система уравнений состоит:

— из уравнения, связывающего объем и расход, с учетом проницаемости стенки сосуда:

$$v_i(t) = g_{i-1}(t) - g_i(t) - (p_i(t) - p_{\text{тк}})G_i^{-1},$$

где v_i — объем, p_i — давление в участке сосуда; $p_{\text{тк}}$ — тканевое давление; g_{i-1} , g_i — расход на входе и выходе сосуда;

— уравнения вязкого трения:

$$p_i(t) - p_{i+1}(t) = R_i g_i(t),$$

которое связывает перепад давлений с расходом;

— уравнение движения:

$$L_i g_i(t) + R_i g_i(t) = p_i(t) - p_{i+1}(t),$$

где L_i — инерционность крови в i -м обобщенном участке сосуда.

В математической модели Р.Д. Григоряна [14] помимо основного движущего фактора крови рассмотрено влияние гидростатического давления $P_i^G(t)$:

$$P_i^G(t) = ngl_i \sin \varphi_i,$$

где l_i — длина столба крови; φ_i — угол отклонения; ng — ускорение; n — гравитационная перегрузка.

Кроме работы сердца, влияние на движение крови также оказывает сила гравитации. В настоящее время разработаны методы гравитационной терапии (ГТ), подробно описанные в работах [8, 9], где прирост давления ΔP рассчитывается по формуле

$$\Delta P = \rho \omega^2 (R_2^2 - R_1^2) / 2,$$

где ω — частота вращения тела; ρ — плотность крови; R_1 — некоторое начальное сечение русла; R_2 — расстояние по оси x до интересующего сечения (м);

Согласно [4], помимо работы сердца движению крови способствуют сокращения скелетных мышц и отрицательное давление в плевральной полости. При сокращении скелетных мышц происходит сдавливание вен и из-за наличия клапанного механизма кровь движется в сторону сердца. Но суммарный гемодинамический эффект равен нулю, так как при ускорении притока крови по венам к сердцу так же замедляется отток крови от сердца по артериям.

Анализируя приведенные выше модели, можем назвать факторы, способствующие движению крови в кровеносных сосудах: это сердце, создающее давление, гравитация, механические воздействия на сосуды.

Кроме этого на движение крови оказывают влияние электромагнитные поля. Поскольку кровь является биологическим электролитом [15], то сосудистое русло можно принять за проводник с током, помещенный во внешнее магнитное поле. На стенке сосуда возникает поперечная ЭДС (называемая ЭДС Холла):

$$U_x = (R_x [IB]) / d,$$

где R_x — постоянная Холла, d — диаметр сосуда.

Если поместить движущуюся проводящую жидкость в магнитное поле, то в ней возникают подемоторные силы, которые направлены перпендикулярно движению проводящей среды. Это явление называют магнитогидродинамическим эффектом. Суммарно его рассматривают как увеличение вязкости движущейся проводящей среды в магнитном поле:

$$\eta = \eta_0 + \Delta\eta(B),$$

где η_0 — вязкость в отсутствии магнитного поля, $\Delta\eta(B)$ — увеличение вязкости.

Исследования [15] показывают, что при величине поля 0,1 и 0,2 Тл скорость движения крови уменьшается на 0,03 и 0,1 % соответственно. Гипотетически полная остановка кровотока может произойти в магнитном поле с индукцией ~ 200 Тл.

В работах В.Д. Бутенко [22, 23] высказано предположение, что сердце не является единственным фактором, влияющим на движение крови в сосуде: давление, создаваемое сердцем, имеющим размер с кулак, не достаточно, чтобы прокачать 100 000 км кровеносных сосудов в организме человека. По его гипотезе, кровь движется в артериях благодаря электроосмосу, а в венах — благодаря электрофорезу.

Согласно [23, 24], скорость крови при электроосмосе можно определить по формуле Гельмгольца — Смолуховского:

$$V_{э,о} = S \zeta \varepsilon E \varepsilon / 4\pi \eta L,$$

где S — сечение капилляра; ζ — электрический дзета-потенциал, зависящий от строения двойного электрического слоя; ε — диэлектрическая проницаемость крови; $E\varepsilon$ — напряжение электрической цепи, равное разности потенциалов клеток $\phi_1 - \phi_2$ в начале и конце участка движения; η — вязкость жидкости; L — длина капилляра.

При электрофорезе скорость определяется по формуле

$$V_{э,ф} = \varepsilon \xi E \varepsilon / 4 \pi \eta.$$

Воздействие электромагнитных полей (ЭМП) на микроциркуляцию крови уже долгое время является предметом изучения многих ученых. Написаны тысячи статей, осуществлены сотни экспериментов, в том числе зарубежными исследователями [32–40], но вывести единые законы воздействия ЭМП на движение крови пока не удалось. Несмотря на это в традиционной и народной медицине с успехом применяются методы магнитотерапии, известной благотворным влиянием на организм, в том числе на кровь и микроциркуляцию: снимается боль и уменьшаются отеки, нормализуется давление и укрепляется тонус сосудов.

Результаты экспериментов и мнения авторов научных публикаций существенно различаются [54]. Согласно части публикаций и экспериментов, под воздействием магнитного поля движение крови в сосудах замедляется, возрастает ее вязкость [30, 33, 47–49], другая часть говорит об уменьшении плотности и усилении кровотока [32, 41–46], в третьей утверждается, что воздействия на движение крови не происходит [34, 35, 39, 50–53].

Из проведенных исследователями экспериментов видно, что характер воздействия на микроциркуляцию меняется в зависимости от интенсивности и времени воздействия магнитных полей, частоты переменного магнитного поля и величины магнитной индукции.

Например, в опытах над крысами при воздействии импульсного магнитного тока [30] импульсами длительностью 1 мс, напряженностью 2500 кА/м, частотой 189 Гц наблюдалось увеличение вязкости крови до 51 %. А при постоянном магнитном поле 10 мТл у крыс наблюдали увеличение кровотока от 15 до 45 % [43], при 0,25 Тл у кроликов — от 10 до 40 %. Снижение кровотока также наблюдалось у человека при воздействии постоянным магнитным полем 400 мТл [45].

Таким образом, видим, что однозначную закономерность влияния магнитных полей (МП) современной науке определить пока не удалось. Возможно, для того чтобы связать воедино принципы влияния МП на микроциркуляцию, не хватает какого-то звена между кровотоком и внешними магнитными полями.

В.Д. Бутенко в своей работе [22] высказывает предположение, что в организме возникают электромагнитные колебания, но природа их возникновения до сих пор неизвестна. Возможно, эти электромагнитные колебания и являются связующим звеном в цепи от внешних полей до движущейся крови.

Известно, что сердце является генератором электрического тока в организме [25]. Согласно «теории отведений» Эйнховена, сердце представляет собой дипольный электрический генератор (токовый диполь). Именно эта теория позволяет производить диагностику работы сердечной мышцы в известном методе — электрокардиографии. Вследствие работы сердечной мышцы в клетках миокарда (миоцитах) возникает потенциал действия, который, воздействуя на мембрану клетки, высвобождает ионы калия. Поток положительных ионов калия генерирует электрический ток в миоцитах.

Предположим, что далее от сердца электрический ток распространяется по мышечным волокнам (состоящим из миоцитов) кровеносного сосуда. Для этого рассмотрим его строение. Согласно [15], стенка сосуда состоит из трех оболочек: внутренней (интимы), средней (медии), наружной (адвентиции). Строение сосуда показано на рис. 1 [19].

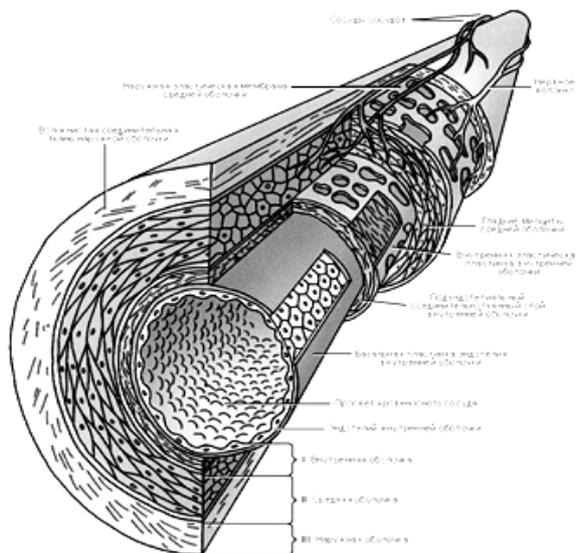


Рис. 1. Строение стенки артерии и вены среднего калибра

1. Интима состоит из эндотелия и подэндотелиального слоя с высоким содержанием эластических волокон.

2. Средняя оболочка состоит из мощного эластического каркаса, образованного эластическими мембранами. Между окончатными эластическими мембранами находится сеть эластических и ретикулярных волокон, основное вещество, гладкомышечные клетки (миоциты), расположенные по спирали, и фибробласты.

3. Адвентиция состоит из коллагена и фибробластов, а также содержит капилляры (сосуды сосудов) и окончания нейронов вегетативной нервной системы.

Согласно [20], как видно из рис. 2, гладкомышечные клетки (миоциты) присутствуют в артериях, артериолах и венах.

Сосуды	Артерия	Артериола	Капилляр	Венула	Вена
Диаметр, мм	25÷4	$30 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	5÷30
Толщина стенки, мм	2÷1	$20 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,5÷1,5
Оболочка	Эндотелий « Эластическая « Мышечная « Фиброзная «				
Схема кровеносного сосуда					

Рис. 2. Строение кровеносных сосудов различных отделов сердечно-сосудистой системы

Гладкомышечные волокна (миоциты) расположены вдоль сосудов в форме спирали. Исходя из этого и развивая мысль В. Бутенко [22], можно предположить, что соленоид, состоящий из волокон гладких миоцитов, при прохождении электрического тока создает магнитное поле. Учитывая цикличность работы сердца и частоту возникновения токов (электрических импульсов), предполагаем, что ток, протекающий через волокна в форме соленоида, будет образовывать переменное электромагнитное поле (рис. 3). Возможно, это электромагнитное поле и является дополнительной движущей силой, которая помогает сердцу двигать кровь через 100 000 км сосудов.

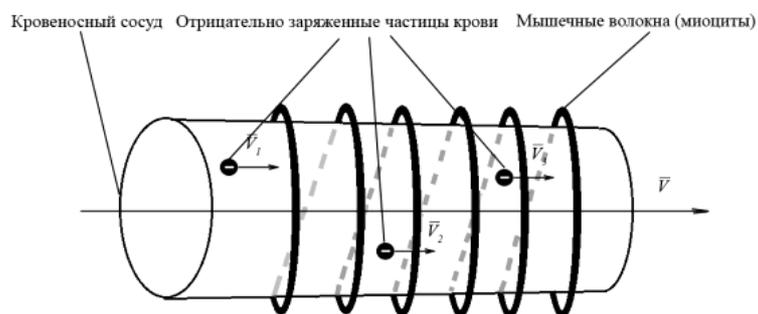


Рис. 3. Движение крови в кровеносном сосуде:
 \bar{V} — скорость кровотока; $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ — скорости движения частиц крови

Модель движения токопроводящей жидкости в магнитном поле в общем случае описывается системой уравнений [27]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\nabla p - \frac{1}{4\pi} [\vec{H} \text{rot} \vec{H}] \\ p = p(\rho), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{v} = 0, \\ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \text{rot} [\vec{v} \times \vec{H}] \\ \nabla \cdot \vec{H} = 0, \end{cases}$$

где p — давление в среде, ρ — плотность, σ — проводимость жидкости, η — сдвиговая вязкость, ζ — вторая вязкость (объемная вязкость), а \vec{v} — поле скоростей ее элементов, \vec{H} — напряженность магнитного поля.

Согласно основному закону электромагнитной индукции, сформулированному Фарадеем, при воздействии на клетки крови переменным или импульсным магнитным полем, в них будет наводиться электродвижущая сила индукции (ЭДС индукции). В 1964 г. Нейрат (Neurath) обнаружил возникновение градиента электрического потенциала в кровеносных сосудах под действием магнитного поля (магнитоэлектрический эффект) [24]. По его расчетам, в аорте при скорости кровотока 100 см/с под действием магнитного поля 500 э будет индуцироваться электрическое поле с градиентом 0.14 мв/см, а при напряженности $5 \cdot 10^5$ э — с градиентом 5 мв/см.

В случае ламинарного движения заряженных частиц крови направление их вектора скорости будет совпадать с вектором магнитной индукции и сила Лоренца, действующая на частицу, будет равна нулю. Однако движение крови не является ламинарным, так как сосуды по мере удаления от сердца сужаются, и течение крови приобретает турбулентный характер. В этом случае можно рассчитать силу Лоренца, действующую на частицу крови, в момент возникновения магнитного поля [28, 29]:

$$F_L = qVB \sin \alpha,$$

где q — заряд частицы крови, V — скорость крови, B — величина магнитной индукции, α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции.

Таким образом, во время протекания электрического тока по мышечным волокнам магнитное поле, создаваемое ими, действует на заряженные частицы крови, меняя их траекторию движения на траекторию в виде закрученной спирали внутри сосуда и придавая ускорение за счет действия силы Лоренца. Данное явление используется в ускорителях заряженных частиц.

Для доказательства возможности этой гипотезы необходимо в результате модельных и лабораторных исследований решить ряд задач:

1. Обнаружить возможность протекания тока по спиралевидным гладким мышечным волокнам.
2. Определить заряды частиц крови человека в средних кровеносных сосудах.
3. Вычислить значение индукции и самоиндукции и величину магнитного поля, возникающего в сосуде.
4. Доказать наличие вышеобозначенных электродвижущих сил.

В случае состоятельности данной гипотезы необходимо:

- разработать модель движения и движущих сил крови в кровеносных сосудах;
- провести вычислительные эксперименты;
- разработать способы искусственной стимуляции движения крови по сосудам при помощи электродвижущей силы (ЭДС).

При условии решения этих задач станет возможным создание приборов для стимуляции движения крови в организме человека и регуляции артериального давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983. 400 с.
2. Каро К., Педли Т., Штотер Р., Сид У. Механика кровообращения. М.: Мир, 1981.
3. Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике. М.: ВШ, 2004.
4. Губанов Н.И., Утепбергенов А.А. Медицинская биофизика. М.: Медицина, 1978.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
6. Лищук В.А. Математическая теория кровообращения. М.: Медицина, 1991.
7. Акулов В.А. Исследование гемодинамики нижних конечностей в условиях гипергравитации методами вычислительного эксперимента // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2000. 9. С. 61–168.
8. Котельников Г.П. Повышенная гравитационная нагрузка в системе реабилитационных мероприятий у травматолого-ортопедических больных // VI съезд травматологов-ортопедов России: Тез. докл. Н. Новгород, 1997. С. 820.
9. Яшков А.В. Клинико-экспериментальное обоснование применения гравитационной терапии у больных с нарушением репаративного остеогенеза нижних конечностей: Дис. ... д-ра мед. наук. Самара, 1998.
10. Регирер С.А. Гидродинамика кровообращения. М.: Мир, 1971. 267 с.
11. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. М.: Наука, 1976. 416 с.
12. Савицкий Н.Н. Биофизические основы кровообращения и клинические методы измерения гемодинамики. Л., 1974.
13. Астраханцева Е.В., Гидаслов В.Ю., Ревизников Д.Л. Математическое моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов // Мат. моделирование. 2005. 17 (8). С. 61–80.
14. Григорян Р.Д. Основы математической теории и имитационные исследования барорефлекторной регуляции гемодинамики: Дис. ... д-ра биол. наук. Киев, 1992. 202 с.
15. Основы взаимодействия физических полей с биологическими объектами: Учеб. пособие / В.П. Олейник. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. 61 с.
16. Малая медицинская энциклопедия. М.: Мед. энцикл., 1991–1996.
17. Первая медицинская помощь. М.: БРЭ, 1994.
18. Гистология: Учеб. для студ. мед. вузов / Под ред. Ю.И. Афанасьева, Н.А. Юриной. 5-е изд. М.: Медицина, 1999.
19. Gartner L. P., Hiatt J. M. Color Textbook of Histology. 3th ed. The McGraw-Hill Companies, 2006. 592 p.
20. Rushmer R. F. Cardiovascular Dynamics. 4th ed. W.B. Saunders Company, Philadelphia, L., Toronto, 1976.
21. Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона. СПб.: Брокгауз-Ефрон, 1890–1907.
22. Бутенко В.Д. О кровосистеме, биоэлектричестве и дуализме // ТРИЗ-Конференция-2007: Материалы конф. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://metodolog.ru/01153/01153.html>.
23. Бутенко В.Д. Электрокинетическая концепция движения крови микроциркуляционного русла // Успехи современного естествознания. 2010. № 3. С. 26–35.

24. Биркенблит М.Б., Глаголева Е.Г. Электричество в живых организмах. М.: Наука, 1988. 288 с.
25. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. М.: Дрофа, 2004. С. 207–213.
26. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М.: Наука, 1968. 288 с.
27. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Изд. 4-е, стереотип. М.: Физматлит, 2003. 656 с. (Теор. физика; Т. 8).
28. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1975. Т. 3.
29. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: ВШ, 1983.
30. Славцов Ю.Н. Вискозиметрическое исследование действия импульсного магнитного поля на изолированную периферическую кровь человека и животных // Актуальные вопр. медицинской магнитобиологии. Саранск, 1977. С. 36–38.
31. Кизилова Н.Н. Агрегация в магнитном поле // Современные проблемы биомеханики. Вып. 9: Реология крови и микроциркуляция. М., 1994. С. 118–135.
32. Smith T., Wong-Gibbons D, Maultsby J. Microcirculatory effects of pulsed electromagnetic fields // Orthop. Res. 2004. № 22. P. 80–84.
33. Ueno S., Lövsund P., Oberg P. Effects of alternating magnetic fields and low-frequency electric currents on human skin blood flow // Med. Biol. Eng. Comput. 1986. № 24. P. 57–61.
34. Effects of permanent magnet on resting skin blood perfusion unhealthy persons assessed by laser Doppler flowmetry and imaging / H. Mayrovitz, E. Groseclose, M. Markov et al. // Bioelectromagnetics. 2001. № 22. P. 494–502.
35. Mayrovitz H., Groseclose E., King D. No effect of 85 mT permanent magnets on laser-Doppler measured blood flow response to inspiratory gasps // Bioelectromagnetics. 2005. № 26. P. 331–335.
36. Effects of universal mobile telecommunications system (UMTS) electromagnetic fields on the bloodbrain barrier in vitro / H. Franke, J. Streckert, A. Bitz et al. // Radiation Research. 2005. № 164. P. 258–269.
37. Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the bloodbrain barrier in immature and young rats / M. Kuribayashi, J. Wang, O. Fujiwara et al. // Bioelectromagnetics. 2005. № 26. P. 578–588.
38. Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz / L.G. Salford, A. Brun, K. Stursson et al. // Microscopy Research and Technique. 1994. № 27. P. 535–542.
39. Extremely low frequency pulsed electromagnetic field designed for antinociception does not affect microvascular responsiveness to the vasodilator acetylcholine / C. J. McKay, M. Corbacio, K. Tyml et al. // Bioelectromagnetics. 2009. № 16. P. 138–145.
40. Role of blood flow on RF exposure induced skin temperature elevations in rabbit ears / F. Jia, A. Ushiyama, H. Masuda et al. // Bioelectromagnetics. 2006. № 26. P. 163–172.
41. Miura M. Non-thermal vasodilatation by radio frequency burst-type electromagnetic field radiation in the frog / M. Miura, J. Okada // Journ. Physiol. 1991. № 435. P. 257–273.
42. Alteration of diurnal rhythms of blood pressure and heart rate to workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields / S. Szmigielski, A. Bortkiewicz, E. Gadzicka et al. // Blood Press. Monit. 1998. № 3 (6). P. 323–330.
43. Xu S., Okano H., Ohkubo C. Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation in anesthetized mice // Bioelectrochemistry. 2001. № 53. P. 127–135.
44. Xu S., Okano H., Ohkubo C. Subchronic effects of static magnetic fields on cutaneous microcirculation in rabbits // In Vivo. 1998. № 12. P. 383–389.
45. Biological effects of static magnetic fields on the microcirculatory blood flow in vivo: A preliminary report / S. Ichioka, M. Iwasaka, M. Shibata et al. // Med. Biol. Eng. Comput. 1998. № 36 (1). P. 91–95.
46. Gmitrov J., Ohkubo C., Okano H. Effect of 0.25 T static magnetic field on microcirculation in rabbits // Bioelectromagnetics. 2002. № 23. P. 224–249.
47. Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field / S. Braune, C. Wrocklage, C. Wrocklage et al. // Lancet. 1998. № 351 (9119). P. 1857–1858.

48. *High-intensity* static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo / S. Ichioka, M. Minegishi, M. Iwasaka et al. // *Bioelectromagnetics*. 2000. № 21. P.183–188.
49. *Skin* temperature changes induced by strong static magnetic field exposure / S. Ichioka, M. Minegishi, M. Iwasaka et al. // *Bioelectromagnetics*. 2003. № 24. P. 380–386.
50. *The effects* of low-dosed and high-dosed low-frequency electromagnetic fields on microcirculation and skin temperature in healthy subjects / O. Schuhfried, G. Vacariu, H. Róchowanski et al. // *Int. Journ. Sports Med.* 2005. № 26. P. 886–890.
51. *Wenzel F., Reißweber J., David E.* Cutaneous Microcirculation is not altered by a Weak 50 Hz Magnetic Field // *Biomed. Engineering*. 2006. № 50 (1–2). P. 14–18.
52. *Effects* of acute exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain / H. Masuda, A. Ushiyama, S. Hirota et al. // *In Vivo*. 2007. Vol. 21, № 4. P. 555–562.
53. *Jauchem J. R.* Exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields and radiofrequency radiation: Cardiovascular effects in humans // *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 1997. № 70 (1). P. 9–21.
54. *Трибрат Н.С., Чуян Е.Н., Раваева М.Ю.* Влияние электромагнитных излучений различного диапазона на процессы микроциркуляции // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2010. № 3. С. 15–27.
55. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ГХИ, 1961. 831 с.

V.R. Tsibulsky, O.S. Shaidurov

**REVIEW OF INTERACTION MODELS BETWEEN ELECTROMAGNETIC FIELDS
AND BLOOD FLOW IN HUMAN BLOOD VESSELS**

The article describes basic models of blood flow in blood vessel, considering forces affecting process of blood circulation, and influence of electromagnetic fields on blood microcirculation. The article also suggests hypothesis on origin of electromagnetic induction and self-induction in blood vessel, as well as electromotive force affecting blood flow.

Blood microcirculation, electromagnetic field, blood flow, magnetic field, influence, flow, blood, myocytes, blood vessels, hydrodynamics.