

© 1991 г.

КИЗИЛОВА Н. Н., РЕГИРЕР С. А.

## МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ КРОВИ

Представлен критический обзор основной литературы по магнитогидродинамическим эффектам при движении крови.

Возросший в последние десятилетия интерес к электромагнитным явлениям в живой природе и к взаимодействию живых объектов с внешними электромагнитными полями обусловил большое число работ, в значительной части которых приведены только конспективно изложенные результаты наблюдений и медицинские рекомендации. Чтобы в этом потоке сообщений выделить достоверные данные, следует опираться на результаты точных измерений в хорошо контролируемых и воспроизведимых условиях (как правило, *in vitro*) и на теоретический анализ потенциально возможных явлений, начиная с обусловленных наиболее грубыми механизмами. Один из таких механизмов — взаимодействие крови как движущегося жидкого проводника с внешним магнитным полем, т. е. магнитогидродинамические (МГД) эффекты при движении крови.

Общий характер МГД-взаимодействий хорошо известен [1, 2] и сводится, во-первых, к индуцированию электрических полей и токов в движущейся жидкости и окружающей среде; во-вторых, — к ускорению (или торможению, в зависимости от направления силы Лоренца) потока при соответствующем изменении профилей скорости и сил вязкого трения на границах. Насколько эти явления в крови значимы физиологически и как можно их использовать в практических целях — надлежит выяснить путем предварительных теоретических оценок и чистых лабораторных экспериментов.

Экспериментальные данные о МГД-эффектах в крови пока более чем скучны, тогда как теоретических работ — не один десяток. К ним следует добавить ряд работ по магнитной гидродинамике (см., например, [3, 4]), а также работы в области электромагнитной биологии, магнитотерапии и т. п. Ниже представлен критический обзор основной литературы по МГД-эффектам в крови.

**Основные уравнения.** Теория МГД-течений для крови, как и для любой иной проводящей жидкости, основывается на решениях уравнений магнитной гидродинамики. Если индуцированным магнитным полем, т. е. полем наведенных токов, можно пренебречь по сравнению с внешним магнитным полем, а электрическое поле (в силу медленности изменений магнитного поля) считать безвихревым, то основная система (в так называемом безиндукционном приближении) для несжимаемой жидкости записывается в виде [1, 2]

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{j} = \sigma(-\nabla \varphi + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2)$$

Здесь  $p$  и  $\mathbf{v}$  — давление и скорость жидкости;  $\mu$  и  $\rho$  — ее вязкость и плотность,  $\mathbf{j}$  — плотность электрического тока,  $\varphi$  — электрический потенциал,  $\mathbf{B}$  — индукция внешнего магнитного поля,  $\sigma$  — электропроводность. Во внешней по отношению к жидкости среде справедливы уравнения

ния Максвелла (часто — в электростатическом приближении), а на границе раздела — обычные граничные условия [1, 2, 5].

*МГД-расходомеры.* Когда лоренцева сила  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  пренебрежимо мало — искажает поток, системы (1), (2) разделяются. Решая уравнения (2) совместно с уравнениями электродинамики для внешней среды, получаем в конечном счете рабочую формулу вида [1, 5]

$$\delta\phi = U_* B_* f, \quad (3)$$

где  $\delta\phi$  — разность потенциалов между двумя точками, куда могут быть помещены измерительные электроды,  $U_*$  и  $B_*$  — характерные значения скорости и индукции магнитного поля;  $f$  — коэффициент чувствительности, который зависит от геометрии системы, конфигурации магнитного поля, распределения скоростей  $\mathbf{v}$  и проводимости  $\sigma$  в жидкости, а также от характеристик внешней среды, определяющих шунтирование электрических токов. Формулы типа (3), составляющие основу теории МГД-расходомеров (флюметров), позволяют по измеренной разности потенциалов  $\delta\phi$  судить о скорости потока и расходе. Формулы типа (3) получены для широкого круга частных ситуаций, в том числе (см. [6]) для течений крови по сосуду с образованием пристенного слоя и с учетом специфических особенностей электропроводности крови [7].

Идея индуцирования электрического поля при протекании крови по трубке или кровеносному сосуду, помещенным во внешнее поперечное магнитное поле, как и идея о возможности измерять расход по наведенной разности потенциалов возникла чуть ли не во времена Фарадея. В монографии [5] представлена довольно полная сводка ранних работ на эту тему; современные исследования отражены в [8, 9]. Электромагнитные (точнее было бы назвать их магнитогидродинамическими) расходомеры получили довольно широкое распространение в физиологических экспериментах, в качестве контролирующего прибора в системах искусственного кровообращения и непосредственно в медицинской практике [10].

При постоянных во времени  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  движение крови, как и всякого электролита, сопровождается поляризацией электродов, которая с трудом поддается учету в теоретических моделях. На практике часто используют переменные магнитные поля умеренной частоты, подразумевая, что в силу линейности системы (2) по  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\phi$  ее решение и результирующие формулы (3) верны для осредненных по времени величин.

В целом теория МГД-расходомеров может считаться хорошо развитой и не вызывающей никаких принципиальных сомнений. В модельных опытах она дает хорошее согласие с измеренными величинами.

*Влияние лоренцевой силы на движение крови.* Разумеется, никто не спорит о возможности такого влияния в принципе, и вполне естественны попытки теоретически оценить, например, характеристики экстракорпорального насоса для крови [11, 12], работающего по индукционной схеме [2]. Хотя результаты расчетов и их трактовка оказались неоднозначными и не очень обнадеживающими, дальнейшее развитие этих идей имеет смысл. Известны и некоторые другие потенциально возможные приложения МГД-эффектов к движению крови вне организма. Одно из них — перестройка картины течения с целью улучшения массопереноса в оксигенаторах [13, 14].

С наибольшей осторожностью следует подходить к исследованию возможного влияния магнитного поля на картину движения крови в сосудах и притом непосредственно за счет МГД-эффектов. Чисто поставленные эксперименты, свидетельствующие о такой возможности в условиях организма, насколько могут судить авторы, полностью отсутствуют, что не помешало возникновению ряда работ, где эффекты МГД-воздействия на кровь в сосудах обсуждаются с теоретических позиций — путем решения полной системы (1), (2) или даже более общей системы [1], в которой учитываются и индуцированное магнитное поле, и вихревая составляющая электрического поля.

Первые две работы на эту тему появились одновременно в 1965 г.— как раз во время резко усилившегося интереса к возможным приложениям магнитной гидродинамики. На основе известных решений задач о течении электропроводной жидкости в плоской щели («задача Гартмана») и в круглой трубе при наличии постоянного поперечного магнитного поля [1, 2], в [15; 16] было показано, что в крупном (диаметром 2 см) сосуде полное торможение крови достигается при напряженности поля  $H \sim 10^8$  Тл, а в сосудах диаметром  $\sim 0,2$  см уже при  $\sim 10^8$  Тл. Поля с такой напряженностью и сейчас, спустя 25 лет, очень сложно создать в объеме, который вмещал бы мелкое лабораторное животное или конечность человека. Поля же, необходимые для оказания влияния на микрососуды (диаметром  $\sim 10^{-3}$  см), вообще недостижимы, поэтому нельзя рассчитывать на наблюдение эффектов у очень малых животных, помещающихся в рабочем зазоре мощного магнита с  $H \leq 10$  Тл, но не имеющих крупных сосудов [17].

Эти простые соображения не были, к сожалению, явно и своевременно сформулированы в виде предостережения; не были осознаны и количественные оценки, содержащиеся в [15—17]. Идея торможения крови магнитным полем продолжала быть предметом обсуждения на основе решения как задачи Гартмана (см., например, [18, 19]), так и задач о более сложно организованных течениях крови. В [20] была вновь введена в рассмотрение модель стационарного течения крови по жесткому цилиндрическому сосуду, но результат, хотя и давал наравне с [15—17] правильную оценку величины ожидаемого эффекта, был тем не менее совершенно ошибочным. Ошибка, оставшаяся практически незамеченной ни критиками [21], ни продолжателями [20—25] авторов [20], состояла в том, что внешнее магнитное поле задавалось соотношениями  $B = e_r B_r$ ,  $B_r = \text{const}$ , т. е. на оси сосуда помещался линейный источник (!) поля, а магнитный поток не сохранялся ( $\text{div} B \neq 0$ ). Очевидно, что такое магнитное поле в принципе нереализуемо.

Вслед за работой [20] появились публикации, содержащие как бы «более общую» постановку задачи, учитывающую нестационарный характер потока [22—26] и упругие деформации стенки сосуда [27]. В [22, 23] была повторена та же ошибка, что и в [20]. Иная, несколько более завуалированная ошибка содержалась в работе [25], где внешнее магнитное поле считалось чисто окружным и постоянным ( $B = e_\theta B_\theta$ ,  $B_\theta = \text{const}$ ). Можно показать, что и эта конфигурация на практике не может быть реализована: мало того, что она, согласно уравнениям Максвелла, требует бесконечно большой плотности продольного тока на оси сосуда, но и вообще такое поле несовместимо с гипотезой о прямолинейном течении жидкости [1].

В [24] было рассмотрено течение в магнитном поле с реалистичной конфигурацией, а именно в постоянном поперечном поле  $B = e_r B_r + e_\theta B_\theta$ , где  $B_r^2 + B_\theta^2 = \text{const}$ . Однако и здесь решение было построено неверно, поскольку без всяких оснований во втором уравнении (1) были опущены слагаемые с компонентами индуцированного электрического поля  $E = -\Delta \phi$ , хотя при любых разумных граничных условиях

$$E = e_r E_r + e_\theta E_\theta, \quad E \times B = 0.$$

Добавим, что в работах [28, 29] внешнее магнитное поле полагалось поперечным к  $V$  и постоянным, но расчетные формулы заимствовались из решения задачи с радиальным полем [20]. Причина, по которой это противоречие не было замечено, состоит в том, что при  $vB = 0$  и упомянутом произвольном задании нулевого электрического поля получается

$$j \times B = -vB^2,$$

так что уравнение импульсов в (1) перестает «чувствовать» конфигурацию поля  $B$ , лишь бы оно лежало в плоскости, поперечной к направлению движения. Из уравнений (2) видно, что

$$\text{div} E = -\text{div}(v \times B),$$

т. е. требование  $E=0$  делает задачу переопределенной. В правильных решениях  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} - \mathbf{vB}^2$ , причем именно  $\mathbf{E}$  зависит от структуры поля  $\mathbf{B}$ . Благодаря этому течение по трубке в постоянном поперечном поле теряет осевую симметрию. Тем не менее даже переписывая из учебника [2] правильное решение задачи о стационарном МГД-течении по круглой трубе в постоянном поперечном поле, авторы [30] на словах утверждают, что течение осесимметрично.

Заметим, что указанное правильное решение задачи было известно задолго до появления обсуждаемых публикаций [1, 2]; один из вариантов его был процитирован и фактически использован в самой первой статье по МГД-эффектам в крови [15]. Это же правильное решение использовано и в хронологически последней работе [30], где рассмотрено артериальное дерево, содержащее в общей сложности  $\sim 10^2$  сосудов и помещенное в постоянное внешнее магнитное поле. В результате громоздкой вычислительной работы здесь получены лишь заранее очевидные качественные выводы и для нескольких значений магнитного поля количественные оценки тормозящего эффекта в отдельных сосудах, причем сделана попытка учсть присутствие в артериях стенозных сужений.

Плоская задача о течении в щели с волнистой стенкой (имитирующей слабый стеноз) при наличии поперечного магнитного поля и  $E=0$  приближенно решалась в [31]. Здесь же была рассмотрена и аналогичная осесимметрическая задача с окружным внешним магнитным полем, которое создается изолированным линейным током на оси сосуда. При этом, по словам авторов, обнаружилось, что гидравлическое сопротивление может убывать с ростом магнитного поля. Данное утверждение противоречит приведенным в работе формулам.

Плоское неустановившееся МГД-течение крови в плоской щели с пористой стенкой и поперечным протоком (когда втекание через одну стенку полностью компенсируется оттеканием через противоположную) при наличии поперечного магнитного поля рассмотрено в [32] (см. также [33]). Такая задача хорошо известна в магнитной гидродинамике [1], и ее постановка не вызывает сомнений, если жидкость однородна. Для суспензий же, особенно концентрированных, задача имеет смысл при условии, что взвешенные частицы (т. е. клетки крови) способны свободно проходить через поры в стенках.

В [34, 35] была сделана попытка проанализировать соответственно стационарное и нестационарное течения крови в идеализированном разветвлении (плоской щели с полубесконечной симметрично расположенной перегородкой) также в присутствии поперечного магнитного поля. Судить о решении первой задачи затруднительно вследствие конспективности изложения в [34], но вторая, нестационарная, безусловно, решена неверно. Один из признаков ошибочности — физически неоправданная несимметричность профиля скорости в ветви относительно ее оси на сколь угодно большом удалении от места разветвления [35]. Источником ошибки является неподходящий выбор функций, аппроксимирующих профиль скорости в ветви, при использовании метода интегральных соотношений. Из-за переупрощения исходных уравнений в [35] выпала из рассмотрения эволюция профиля скорости вдоль оси ветви.

Почти во всех цитированных здесь работах по МГД-течениям в крови входящее в исходные уравнения электрическое поле  $\mathbf{E}$  полагалось равным нулю, тогда как оно должно быть получено из решения, и его величина зависит в конечном счете от условий замыкания электрического тока, индуцируемого в жидкости, через внешнюю среду. Для всех плоских течений, упомянутых выше, равенство  $E=0$  допустимо, но оно равносильно условию «короткого замыкания» [1], когда электропроводность внешней среды существенно превосходит электропроводность крови. В некоторых случаях произвол в задании  $\mathbf{E}$  приводит к нарушению фундаментального закона сохранения электрического заряда (уравнения  $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$  в (2)). Примером может служить решение в [26].

*МГД-влияние на движение клеток крови.* Сведения о наличии у эритроцитов (и других клеток крови) электрического заряда и слабо выра-

женные магнитные свойства гемоглобина естественно приводили к предположению о том, что эти особенности крови должны влиять на ее движение во внешнем магнитном поле. Некоторые соображения по указанному вопросу приведены еще Чижевским (см., например, [36]), однако в целом проблема изучена слабо. Один из возможных феноменов здесь может заключаться, как справедливо отмечено в [37], в стратификации потока. Другой феномен — ларморовское вращение эритроцитов — обсуждался в [18] без количественных оценок. Если бы таковые были проведены, например, по аналогии с анализом ларморовского вращения ионов в [38], то вывод о несущественности закрутки эритроцитов вокруг силовых линий магнитного поля при течении крови по сосудам был бы неизбежен.

В экстракорпоральных устройствах, если в них используются сильные внешние поля ( $E$ ,  $B$ ), могут возникать эффекты особого рода, связанные с тем, что мембранны клеток обладают высоким электрическим сопротивлением и как бы обтекаются электрическим током. Локальные отклонения тока от основного направления при этом порождают дополнительную составляющую силы Лоренца (никак не связанную с зарядом клеток) и могут быть причиной резкого нарушения привычной картины электрофоретического движения клеток.

*Обсуждение.* Из изложенного выше нетрудно видеть, что практически все теоретические публикации, последовавшие за [15, 16] и касающиеся МГД-течений крови в физиологических условиях, за исключением, конечно, теории флюметрии, содержат трудно устранимые ошибки либо в формальной постановке задачи, либо в процедуре решения. Однако, даже если бы эти задачи были решены заново с соблюдением всех формальных требований, результаты все равно оставались бы уязвимыми для критики, поскольку физическая постановка задач неадекватна реальным физиологическим ситуациям, в том числе и указанным в цитированных работах. Ясно, например, что ни радиальное, ни сильное окружное магнитное поле не может быть создано в кровеносных сосудах *in vivo*. Задача о течении в плоской щели с пористыми стенками и попечным протоком не имеет отношения, вопреки утверждениям в [32], к капиллярам в альвеолярных стенках. Невозможно усмотреть содержательную связь между приведенными в [30, 31, 34, 35, 39] общими рассуждениями о генезисе сосудистых патологий и формальным решением модельных задач.

Но наиболее, быть может, важный вопрос, имеющий принципиальное значение для любых рассуждений о влиянии магнитного поля на кровоток в сосудистой сети и не выяснившийся до сих пор, связан с электрическим взаимодействием близкорасположенных сосудов, как артериальных, так и венозных.

Действительно, если по крупной артерии с большой скоростью движется кровь, то такой сосуд представляет собой МГД-генератор, вырабатывающий электрический ток. Электропроводность внешней среды может быть мала, но ток тем не менее будет через нее замыкаться, и поэтому проходящие рядом малые сосуды с малыми скоростями потока будут находиться в режиме МГД-насоса. Следовательно, в крупном сосуде будет иметь место торможение потока, а в мелких — его ускорение. Нет никаких оснований для априорного отрицания такой возможности; наоборот, следовало бы провести ее анализ в рамках разумно поставленных модельных задач.

Заметим в этой связи, что принимаемое в большинстве работ (кроме теории МГД-флюметрии) предположение о свободном замыкании тока через внебиологическую среду означает (вопреки действительности), что электропроводность крови намного ниже, чем окружающей среды. В теории МГД-флюметрии принимается обратное, т. е. правильное соотношение электропроводностей, которому соответствуют малые токи шунтирования.

До сих пор рассматривалось в основном воздействие на кровь постоянного во времени магнитного поля. Переменные поля могут быть в принципе источником дополнительных эффектов [40], которые до сих пор не

подвергались количественной оценке (за исключением задач об индукционных насосах [11, 12]).

Строя рассуждения относительно изменения характеристик кровотока под влиянием МГД-эффектов, желательно не упускать из вида некоторые вторичные явления, в первую очередь регуляторной природы, которые могут компенсировать или извратить до неузнаваемости непосредственный МГД-эффект. Например, в условиях перфузии сосудов с постоянным расходом, профиль скорости в них будет уплощаться, а напряжения сдвига на стенках увеличиваются [1]. Известно, что в значительной части сосудов тогда произойдут опосредованное эндотелием [41] ослабление тонуса и увеличение просвета, так что итоговое увеличение сопротивления, если оно вообще будет иметь место, окажется меньше ожидаемого по МГД-теории.

При перфузии с заданным перепадом давлений первичное снижение расхода всегда будет сопровождаться уменьшением вязкого трения на стенах, так что возникнут условия для усиления тонуса и уменьшения просвета. В результате итоговое увеличение сопротивления будет больше ожидаемого. В сосудистой сети артериолярные сосуды в силу малости диаметра вообще не будут ощущать первичного МГД-эффекта, но даже небольшие изменения давления в них, так или иначе обусловленные влиянием поля на более крупные вышележащие сосуды, немедленно запустят механизм авторегуляции [41]. Итоговое изменение сопротивления русла при этом трудно предсказать даже по знаку, не решая специальных модельных задач. Единственная известная попытка постановки такой задачи представлена в [28, 29]; предполагалось, что изменения давления на входе в сосуды мозга, обусловленные МГД-эффектами в аорте, мгновенно вызывают авторегуляторные изменения просвета сосудов, питающих мозг.

Далее, нельзя исключать возможность влияния индуцированного электрического поля в потоке и в окружающей сосуды среде на возбудимые клетки, входящие в состав стенки микрососудов, хотя ожидаемые значения токов ( $\sim 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>) меньше нормальных пороговых [9].

Обращаясь к экспериментам, следует констатировать, что за исключением опытов по МГД-флюметрии, нет однозначных свидетельств прямых МГД-эффектов в реальном сосудистом русле. Едва ли можно привлечь к обсуждению беглые упоминания, например, о помещении головы животного в зазор между полюсами магнита [18], и другие не удовлетворяющие общепринятым в физике и биологии стандартам описания опытов. Можно делать выводы лишь о том, что в целом организм теплопроводного может реагировать на магнитное поле и что механизмы реакций (они весьма многообразны), как правило, остаются неизвестными [42]. Опасность артефактов здесь очень велика; она хорошо иллюстрируется результатами опытов [43], где картина потока через МГД-флюметр подвергалась искажению, но вовсе не вследствие МГД-воздействия, а благодаря механическому ограничению движения сосудистой стенки.

Таким образом, приходится сделать вывод, что при рассмотрении исследований МГД-воздействия на движение крови, имело место некритическое (часто недостаточно квалифицированное) восприятие работ [15, 16, 20], без цитирования которых не обходилась практически ни одна из последующих публикаций. В результате создалась преемственно бесодержательная литература, обладающая для несведущего читателя всеми внешними признаками теории. Этим примером хорошо иллюстрируется один из механизмов возникновения мифов в науке. Не менее важно, что в некоторых из упомянутых здесь работ выдвигались конкретные идеи о практическом использовании МГД-эффектов (помимо измерения расхода) при воздействии внешнего магнитного поля на организм. Назывались в числе возможных: остановка кровотечения при операциях, усиление притока крови к сердцу и т. п. [15, 16, 44, 45]. В свете изложенного выше кажется очевидным, что столь далеко идущие предложения, будучи принципиально допустимыми, не могут быть подкреплены существующими результатами экспериментальных и теоретических исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970. 672 с.
2. Cramer K. P., Pai S.-I. Magnetofluid Dynamics for Engineers and Applied Physicists. Washington, DC: Scripta, 1973. X+350 p.
3. Sudou K., Tomita Y., Takami T., Oushima S.//Trans. JSME. 1980. V. B46. P. 862.
4. Sudou K., Tomita Y., Takami T., Oushima S.//Bull JSME. 1981. V. 24. P. 90.
5. Шерклиф Д. Теория электромагнитного измерения расхода. М.: Мир, 1965. 268 с.
6. Руткевич И. М.//Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1981. № 3. С. 114.
7. Левцов В. А., Регирер С. А., Шадрина Н. Х. Реология крови. М.: Медицина, 1982. 272 с.
8. Wyatt D. G.//Trans. Inst. Meas. and Contr. 1982. V. 4. P. 61.
9. Wyatt D. G.//Med. and Biol. Eng. and Comput. 1984. V. 22. P. 193.
10. Зарецкий В. В., Князев М. Д., Сандриков В. А., Выховская А. Г. Электромагнитная флюметрия. М.: Медицина, 1974. 128 с.
11. Roberts V. C.//Med. and Biol. Eng. 1972. V. 10. P. 57.
12. Sud V. K., Sekhon G. S., Mishra R. K.//Bull. Math. Biol. 1977. V. 39. P. 385.
13. Kubair V. G.//Rheology. V. 3. New York; L., 1980. P. 483.
14. Deshikachar K. S., Ramachandra R. A.//Int. J. Eng. Sci. 1985. V. 23. P. 1121.
15. Белоусова Л. Е.//Биофизика. 1965. Т. 10. С. 365.
16. Корчевский Э. М., Марочник Л. С.//Там же. 1965. Т. 10. С. 371.
17. Дорфман Я. Г.//Влияние магн. полей на биол. объекты. М.: 1971. С. 15.
18. Лихачев А. И.//Электрон. обработка материалов. 1968. № 1. С. 75.
19. Лихачев А. И. Влияние поля постоянного электромагнита на скорость оседания эритроцитов у кроликов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Баку, 1971. 24 с.
20. Варданян В. А.//Биофизика. 1973. Т. 18. С. 491.
21. Абашин В. М., Евтушенко Г. И.//Там же. 1974. Т. 19. С. 1107.
22. Sud V. K., Suri P. K., Mishra R. K.//Stud. Biophys. 1974. B. 46. S. 163.
23. Kumar V.//Ibid. 1978. B. 72. S. 43.
24. Singh N. P.//J. MACT. 1974. V. 15. P. 119.
25. Chen I. I. H., Saha S.//J. Bioelec. 1984. V. 3. P. 293.
26. Chen I. I. H., Saha S.//Ibid. 1985. V. 4. P. 55.
27. Sud V. K., Suri P. K., Mishra R. K.//Stud. Biophys. 1978. B. 69. S. 175.
28. Захаров Е. В., Перегудова Т. В.//Биофизика. 1979. Т. 24. С. 568.
29. Перегудова Т. В. Математическое моделирование гемодинамики артерий основания головного мозга: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: 1984. 103 с.
30. Sud V. K., Sekhon G. S.//Phys. Med. Biol. 1989. V. 34. P. 795.
31. Chandrasekhara B. C., Rudraiah N.//Indian J. Pure and Appl. Math. 1980. V. 11. P. 1105.
32. Singh N. P., Sharma G. C.//Indian J. Technol. 1986. V. 24. P. 139.
33. Rao P. S., Rao J. A.//J. Biomed. Eng. 1988. V. 10. P. 293.
34. Verma P. D. S., Suri P. K.//Stud. Biophys. 1981. B. 85. S. 137.
35. Suri P. K., Suri P. B.//Indian J. Pure and Appl. Math. 1981. V. 12. P. 907.
36. Чижевский А. Л. Электрические и магнитные свойства эритроцитов. Киев: Наук. думка, 1973. 94 с.
37. Энния Г. И., Черняков В. А., Айде Г. Б., Стразда И. А.//Актуальные вопросы магнитобиологии и магнитотерапии. Ижевск, 1981. С. 87.
38. Лишинц В. А., Рубинштейн А. И., Кузнецов А. Н.//Биофизика. 1983. Т. 28. С. 524.
39. Иванов-Муромский К. А., Лихачев А. И.//Влияние искусственных магнитных полей на живые организмы. Баку, 1972. С. 3.
40. Берлин Ю. В., Бувин Г. М., Белькович В. И., Гак Е. З.//Реакции биологических систем на магнитные поля. М., 1978. С. 39.
41. Хаюгин В. М., Рогоза А. Н.//Физиология кровообращения. Регуляция кровообращения. Л., 1986. С. 37.
42. Кихут Р. П.//Реакции биологич. систем на магнитные поля. М., 1978. С. 149.
43. Grant B. J. B. et al.//J. Appl. Physiol. 1988. V. 65. P. 1885.
44. Sud V. K., Mishra R. K.//Phys. and Chem. Bases Biol. Inform. Transfer. New York; L. 1975. P. 427.
45. Suri P. K.//Stud. Biophys. 1983. B. 93. S. 111.

Харьковский государственный университет;

Поступила в редакцию

Институт механики Московского государственного  
университета им. М. В. Ломоносова

15.02.90

## MAGNETOHYDRODYNAMIC EFFECTS IN BLOOD FLOWS

KIZILOVA N. N., REGIRER S. A.

*Kharkov University; Institute of Mechanics, M. V. Lomonosov*

*Moscow State University*

Theoretical investigations of magnetohydrodynamic (MHD) effects in flowing blood are briefly reviewed in their formal and physiological aspects. It is shown that the great part of published works contain serious errors, as well as groundless practical propositions without any satisfactory explanation.