

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАК ФАКТОР ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЛАГОПЕРЕНОСА В МАКРОКАПИЛЛЯРАХ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бандеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

Большинство природных и используемых в производстве тел представляют собой влажные твердые дисперсные системы, имеющие разветвленную сеть трещин, пор и капилляров, различных форм и размеров. В таких телах, если не принять специальные меры, всегда присутствует вода в жидкой или паровоздушной фазе. Жидкая вода – активный растворитель, поэтому в порах и капиллярах всегда имеются растворы электролитов и неэлектролитов, то есть влажные твердые дисперсные системы являются многофазными и многокомпонентными системами. Поэтому внешние силовые поля должны вызывать движение незакрепленных фаз. В случае неоднородных электрических полей это четко доказано теоретически и экспериментально в работах А.В. Лыкова, Н.В. Чураева, М.К. Бологи, М.С. Панченко и других.

Наиболее существенной составляющей объемной плотности пондеромоторных сил [1], действующих на жидкость со стороны внешнего электрического поля, является слагаемое $f_e = \rho_e \vec{E}$, где ρ_e – плотность электрических зарядов (ионов и других заряженных частиц) в жидкости, \vec{E} – напряженность поля в данной точке объема жидкости или пара. Гидратированные ионы, приобретая дополнительную составляющую скорости, дрейфуют преимущественно в одном направлении, увлекая за собой воду вне гидратных оболочек и тем самым увеличивая внутренний влагоперенос в капиллярах и порах. Эта составляющая действует как в однородном, так и в неоднородном поле.

Магнитные заряды (монополи Дирака) в природе не проявляются, и нет прямого аналога силе $\rho_e \vec{E}$, действующей на влагу, как в случае постоянного однородного электрического поля. Поэтому возможное силовое воздействие на воду, как диамагнетик, может оказывать только неоднородное магнитное поле. Это отметил еще А.В. Лыков в монографии [2], где приведено выражение для плотности потока воды j_m в капиллярно-пористых коллоидных телах в постоянном неоднородном магнитном поле:

$$\vec{j}_m = -a_m^m \rho_0 \pi_m \nabla B, \quad (1)$$

где a_m^m – коэффициент магнитодиффузии влаги; ρ_0 – плотность пористой твердой фазы; π_m – магнитная поляризация образца; B – индукция магнитного поля.

Из рисунка, приведенного в [2, с. 431], видно, что наличие постоянного неоднородного магнитного поля значительно ускоряет капиллярное впитывание как элементарным капилляром, так и пористым телом. Там же указывается, что при ∇B порядка 1250 (к сожалению, не приводится единица измерения) вязкость дистиллированной воды уменьшается примерно в 1,5 раза. Однако высота капиллярного подъема, определяемая формулой Жюрена, не зависит от наличия магнитного поля. Отсюда следует, что магнитное поле влияет только на кинетику капиллярного впитывания.

Из приведенных экспериментальных данных нельзя сделать однозначного вывода, какой же фактор, силовой или вязкостный, играет решающую роль. В [3] показано, что неоднородное магнитное поле влияет на процесс диффузии молекул воды в силикагеле КСМ–5, картофельном крахмале и целлюлозе. Это влияние представлено некоторым увеличением коэффициента диффузии влаги в указанных микропористых телах. Предполагается, что причина, обуславливающая характер этих изменений, – силовое воздействие поля на отдельные молекулы воды. В [4] указывается, что коэффициенты переноса молекулярных газов, в частности теплопроводности, изменяются в постоянном магнитном или электрическом поле – эффект Сенфтлибена. В основе этого явления лежит зависимость сечения взаимодействия несферических молекул от их ориентации (от угла между направлением от-

носительной скорости сталкивающихся молекул и их моментами вращения). Внешнее магнитное или электрическое поле вызывает прецессию магнитных или дипольных моментов молекул, вследствие чего происходит эффективное увеличение сечения взаимодействия и, следовательно, изменение коэффициентов переноса. С ростом гигроскопического влагосодержания, то есть с уменьшением количества молекул пара при их адсорбции, когда образуется полимолекулярная пленка и уменьшается объем свободного пространства для их перемещения, это влияние уменьшается, и при достижении максимального гигроскопического влагосодержания оно практически исчезает. При этом состоянии микрокапилляры заполнены жидкой водой – влагой капиллярной конденсации. При силовом воздействии магнитного поля на влажное порошкообразное тело вода могла бы перетекать в макрокапилляры, увеличивая влагосодержание пористого образца при относительной влажности паровоздушной среды, равной единице. Но этого не происходит. Отсюда следует, что на движение воды в макрокапиллярах, а тем более в капиллярных трубках, где на скорость переноса воды существенно влияет гравитационное поле, воздействие неоднородного магнитного поля должно быть ничтожно малым.

С другой стороны, в [5] указывается, что еще Н.А. Умов, исследуя свободное капельное истечение диамагнитной и парамагнитной жидкостей в магнитном поле, наблюдал деформацию капель в зависимости от величины напряженности и градиента поля. Изменение скорости каплеобразования приближенно удовлетворяет равенству $\tau_0 P \approx \tau P_0$, где τ_0 , τ – время истечения равного количества капель без поля и в поле, P_0 и P – соответственно величины их веса. В этой же работе имеется ссылка на работы С.Г. Романовского, Е.А. Раскина, А.П. Замбрана, в которых отмечено, что капиллярная пропитка порошка кварца 10% раствором NaCl показала увеличение скорости пропитки в неоднородном поле и влияние на кинетику капиллярного поднятия ртути. В [5] приводятся также результаты собственных экспериментальных исследований явления деформации капель жидкости при истечении из капилляра в неоднородном магнитном поле. В [6] обобщены и проанализированы результаты исследований и широкого практического применения магнитной обработки водных систем. Отмечается увеличение поверхностного натяжения водных систем после магнитной обработки в пределах 1–3 мН/м. Но авторы по-разному интерпретируют эти изменения. В [7] отмечается, что вода – это открытая система, которая активно обменивается с внешней средой и энергией, и веществом. Например, нельзя избежать взаимодействия воды с газами – их выделения или растворения, поскольку предварительное удаление из воды газов (откачкой или кипячением) может коренным образом изменить исследуемую воду. В ней всегда имеются ионы, в том числе и в дистиллированной. Таким образом, изменчивость свойств и разнообразные опыты с водой – это ее специфические атрибуты. Можно полагать, что трудность лабораторной оценки изменений свойств воды после магнитной обработки имеет ряд причин.

Из сказанного следует, что в наибольшей мере магнитная обработка влияет на свойства гетерогенных водных систем, что, возможно, является следствием своеобразного «умножающего» действия развитой поверхности раздела фаз и, естественно, сохраняется длительное время (в ряде случаев она необратима) [6].

Наипростейшей моделью реального влажного капиллярно-пористого тела является цилиндрический капилляр, в котором движется жидкость, например при впитывании воды. Поскольку среди других соединений наиболее крупную и разнообразную группу в земной коре составляют соединения кремния с кислородом, которые активно взаимодействуют с водой по механизму физической адсорбции, ограниченно растворяясь в ней, то в качестве объекта исследования была выбрана кварцевая капиллярная трубка диаметром 0,2 мм. Опыты производили с дистиллированной водой, находящейся в равновесии с газами воздуха (удельная электропроводность воды $85 \text{ мкСм} \cdot \text{м}^{-1}$). Длина трубки составляла 1 м. Такая длина обусловлена тем, что в конце скорость впитывания очень маленькая и можно обнаружить силовое влияние магнитного поля на этот процесс. Чтобы исключить влияние гравитационного поля на движение жидкости, капиллярная трубка располагалась горизонтально. Влияние гидростатического давления жидкости в сосуде на ее движение в капиллярной трубке исключалось установлением и поддержанием на верхнем крае сосуда поверхности жидкости. На этом же уровне находилось и входное отверстие трубки. Горизонтальное положение трубки обеспечивалось ее размещением на координатном столике с микрометрическим винтом и контролировалось микрокатетометром КМ-6. Положение движущегося мениска определялось использованием автоматизированной системы, которая базируется на компьютерном анализе изображения мениска жидкости, сформированного оптической системой телекамеры. Это позволяло получать на мониторе и в записи графические зависимости $l(\tau)$ и $dl/d\tau$ (τ). Длина столбика жидкости l фиксировалась с точностью ± 1 мм и 0,1 с по времени движения жидкости. Капиллярную трубку чистили, выдерживая ее на протяжении двух суток в хромовой смеси, промывали в дистиллированной воде, затем сушили сжатым воздухом. При капил-

лярном поднятии воды в очищенной таким образом кварцевой трубке $\cos\theta \approx 0,98$. Диаметр и конусность капиллярной трубки контролировали длиннофокусным микроскопом КМ-6. Диаметр измерялся с точностью ± 3 мкм. Конусность трубки не превышала $10^{-5}-10^{-6}$.

Для создания магнитного поля использовался постоянный магнит с диаметрами полюсов $11 \cdot 10^{-2}$ м и расстоянием между ними $7 \cdot 10^{-3}$ м. Между ними по диаметру располагался концевой участок капиллярной трубки. Она заканчивалась в средней точке между полюсами. Напряженность однородного поля H по оси между ними составляла $2,16 \cdot 10^5$ А/м. Для создания резко неоднородного поля полюса раздвигались (они перемещались по салазкам) на $6 \cdot 10^{-2}$ м и на один из полюсов накладывался конусный наконечник с основой, равной площади полюса, и высотой $3 \cdot 10^{-2}$ м. Трубка входила извне магнита, перпендикулярно к оси магнита, и ее конец находился в непосредственной близости к вершине конусной насадки. Пространственное распределение напряженности магнитного поля определялось с помощью приборов ИМИ-1, Щ-30, и путем численного дифференцирования находили градиент поля ∇H для определенного расстояния, на котором располагался движущийся мениск. Градиент поля изменялся от нуля вне магнита до $2 \cdot 10^8$ А/м².

Как известно, на тело с магнитным моментом p_m в неоднородном магнитном поле действует сила, составляющая которой по оси α ($\alpha = x, y, z$) равна

$$F_{\alpha} = p_m \frac{dH}{d\alpha}. \quad (2)$$

Поскольку магнитный момент определяется формулой

$$p_m = m\chi H, \quad (3)$$

где m – масса образца, χ – магнитная восприимчивость на единицу массы образца, то соотношение (2) при $\alpha = x$ можно записать в виде ($H \cong H_x$)

$$F_x = m\chi H \frac{dH}{dx}. \quad (4)$$

Следовательно, на массу столбика воды, находящейся в неоднородном магнитном поле, должна действовать сила (4). Поскольку вода – диамагнетик, то эта сила направлена против градиента поля и должна тормозить процесс впитывания. Тогда уравнение Порхаева [8] для средней по сечению скорости \bar{v}_m движения мениска в неоднородном магнитном поле запишется в виде

$$\bar{v}_m = \frac{dl}{d\tau} = \frac{r_0^2 \rho}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos\theta}{r_0 \rho l} - \frac{f_m}{\rho} \right), \quad (5)$$

где r_0 – радиус капилляра, η – вязкость, ρ – плотность воды, σ – поверхностное напряжение; θ – краевой угол смачивания, f_m – сила, действующая со стороны поля на единицу объема вещества:

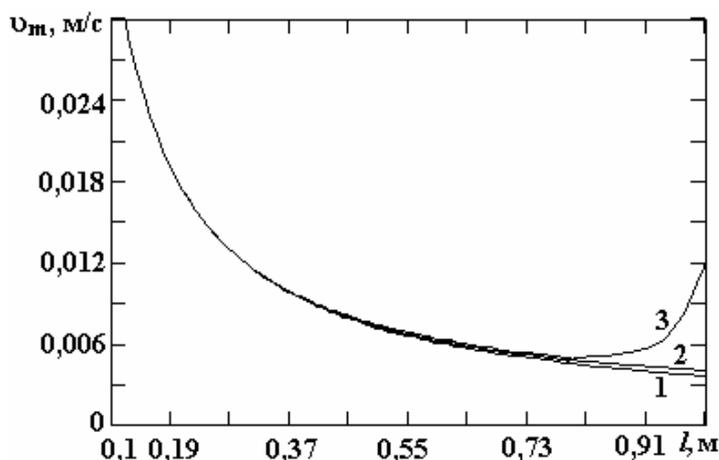
$$f_m = \rho\chi H \frac{dH}{dx}. \quad (6)$$

Таким образом, согласно (5), с учетом (6) вода в конце впитывания должна двигаться со все уменьшающейся скоростью по сравнению со скоростью без наложения поля.

Как следует из рисунка, скорость не только не уменьшается, но, наоборот, увеличивается при вхождении мениска в область неоднородного магнитного поля (кривая 3). Чем ближе мениск подходит к максимальному значению градиента поля, тем значительно увеличивается его скорости. В случае однородного магнитного поля кривая впитывания (2) незначительна, но все же не совпадает с кривой без поля (1). Это объясняется тем, что при подходе к пространству между полюсами всегда существует градиент поля, хотя он и значительно меньший, чем искусственно созданный. Это свидетельствует об особой роли градиента поля в увеличении скорости движения жидкости на заключительном

этапе впитывания. При изменении направления неоднородного поля путем перенесения конусного наконечника на другой полюс скорость впитывания не изменяется. Если от капиллярной трубки отодвигать полюс с конусным наконечником (магнит раздвижной), при этом уменьшаются градиент поля и скорость впитывания, приближаясь к значению без поля (кривая 1).

Таким образом, силовой фактор не оказывает решающего влияния на скорость впитывания воды. Очевидно, таким фактором является прежде всего уменьшение вязкости воды, поскольку величины остальных параметров (ρ , σ , θ) для гипотетически абсолютно чистой воды определяются силами взаимодействия между самими молекулами воды или молекулами воды и твердой фазы. Энергии магнитного поля далеко не достаточно, чтобы изменить силы межмолекулярных взаимодействий. Поскольку вязкость или внутреннее трение обусловлено переносом импульса тепловым движением молекул в жидкости с неоднородным распределением скоростей ее шаров, то магнитное поле также заметным образом не способно изменить тепловые скорости молекул. Но следует учесть влияние примесей. Вода всегда содержит растворенные и микрогетерогенные примеси. Даже предельно чистая вода, тщательно сохраняемая, быстро их приобретает, растворяя, казалось бы, нерастворимые стенки сосудов. Загрязнена и дистиллированная вода, не говоря уже о природной или технической воде. Например, в 1 м^3 дистиллята кроме ионов имеется приблизительно $1 \cdot 10^{10}$ частиц размером $10^{-8} - 10^{-7} \text{ м}$ [6]. Эти примеси сильно и разнообразно влияют на ее структуру и, следовательно, на физико-химические свойства. К тому же все эти частицы и пузырьки несут на себе электрические заряды [9]. Они также участвуют в тепловом движении, и значительное количество их всегда движется перпендикулярно или под углом к силовым линиям магнитного поля. На них действует сила Лоренца, которая сообщает гидратированным ионам и заряженным дисперсным частицам дополнительное движение в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} , а следовательно, изменяется и импульс движения при переходе из одного движущегося шара жидкости в другой. В магнитном поле изменяются гидратационное число ионов и частиц и их диффузионная кинетика – скорость рекомбинации ионов (собственных и примесных) и коагуляции частиц [6, 7, 9]. Такие процессы приводят к перестройке надмолекулярных структур (измельчаются микроагрегаты) воды [10], и, как следствие, увеличивается число свободных, трансляционных молекул, что также уменьшает вязкость.



Зависимость средней скорости \bar{v}_m , движения мениска в капиллярной трубке радиусом $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ от длины столбика воды l : 1 – без поля, 2 – в однородном магнитном поле, 3 – в неоднородном магнитном поле

Этому способствует и то, что вода при движении в капилляре находится в растянутом состоянии под влиянием градиента капиллярного давления. Видимо, воду с примесями в условиях наложения магнитного поля следует рассматривать как совокупность локальных сильно неравновесных подсистем. Поэтому приходится отказываться от подхода к такой системе как к сплошной среде [11] и констатировать, что в изменениях кинетических процессов большую роль играют магнитные свойства компонентов, в особенности коллоидных ферромагнитных примесей.

Отметим, что наиболее полно исследованы вопросы теплообмена в МГД-течениях, в каналах с движущейся магнитной жидкостью, в то время как проблемам влагопереноса в макрокапиллярах твердых дисперсных систем в научной литературе уделено мало внимания, чем и вызвано появление этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Полищук Н.В.* Интенсификация тепломассопереноса в макропористых телах в процессах увлажнения и сушки под воздействием сильных электрических полей. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 2006.
2. *Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. *Мосиевич А.С.* Исследование влияния электрических и магнитных полей на внутренний массоперенос в твердых дисперсных системах различной физико-химической природы. Дис. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук. Киев, 1982. 173 с.
4. *Борман В.Д., Николаев Б.И., Рябов В.А., Троян В.И.* Параметрический резонанс коэффициента теплопроводности молекулярных газов в магнитном и электрическом поле // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 3. № 2. С. 263–270.
5. *Алейников Н.А., Васильев А.Н.* Деформационный эффект и кинетика диспергирования жидкостей в магнитном поле // Инженерно-физический журнал. 1970. Т. 19. № 6. С. 1118–1121.
6. *Классен В.И.* Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 296 с.
7. *Классен В.И.* Вода и магнит. М.: Наука, 1973. 106 с.
8. *Порхаев А.П.* Кинетика впитывания жидкостей элементарными капиллярами // Коллоидный журнал. 1949. Т. 11. № 5. С. 346–353.
9. *Гамаюнов Н.И.* Коагуляция суспензий после магнитной обработки // Журнал прикладной химии. 1983. № 5. С. 1038–1047.
10. *Киргинцев А.Н.* О механизме магнитной обработки жидкостей // Журнал физической химии. 1971. Т. 45. № 4. С. 857–859.
11. *Блум Э.Я., Михайлов Ю.А., Озолс Р.Я.* Тепло- и массообмен в магнитном поле. Рига: Зинатне, 1980. 354 с.

Поступила 16.01.07

Summary

It is confirmed that nonuniform magnetic field influence on water transfer velocity in capillars. The augmentation of moisture motion velocity is not provoked by the power influence of magnetic field upon a water column in macrocapillar, but it is caused by the reduction of moisture toughness. A possible mechanism of toughness change is proposed.
