

ОСОБЕННОСТИ ОСАЖДЕНИЯ СЛАБОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ФЕРРОМАГНИТНУЮ НАСАДКУ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Рассмотрено теоретическое определение магнитной восприимчивости слабомагнитных микрообъектов в зависимости от их угла осаждения на высокоградиентную ферромагнитную насадку сферической формы, помещенную во внешнее постоянное однородное магнитное поле. Показано, что из решения уравнения движения слабомагнитной примеси в окрестности сферической ферромагнитной насадки можно получить значение магнитной восприимчивости микрообъекта при известном (определенном экспериментально) значении угла осаждения его на насадку.

В настоящее время в связи с перспективностью использования магнитных технологий, большой интерес вызывает изучение процессов влияния магнитных полей на мелкодисперсные механические примеси, микроорганизмы в различных средах, в том числе и биологических. Развитие исследований влияния магнитных полей на микроорганизмы не возможно без знания их материальных констант, например, магнитной восприимчивости. Знание магнитной восприимчивости микроорганизмов дает информацию не только о физических процессах взаимодействия последних во внешнем магнитном поле, но, как показано в работе [1], несет сведения об их биологическом этапе развития и жизнеспособности [2]. Поэтому очень важно знать магнитную восприимчивость микрообъектов и правильно ее определять. На сегодняшний день нет каких-либо точных устоявшихся методов определения магнитной восприимчивости биологических объектов, поскольку последние являются заведомо неравновесными системами, состояние которых зависит не только от общепринятых физических параметров (температуры, давления и т.д.), но и от воздействия окружающей среды в форме «стрессовых воздействий», от взаимного влияния их друг на друга и т.д. [3], [4].

До сих пор определение магнитной восприимчивости для биологических объектов (микроорганизмов) проводилось на основании чистого штамма микроорганизмов относительным методом Гуи. Обычно эталоном для контроля весов служит дважды вымороженная бидистиллированная вода (магнитная восприимчивость $\chi = 0,721 \cdot 10^{-6}$), а при измерении магнитной восприимчивости – химически чистый глицерин ($\chi = -0,563 \cdot 10^{-6}$). Магнитная восприимчивость биологического объекта рассчитывается по формуле, в которой учитывается магнитная восприимчивость эталонного и исследуемого вещества, сила, с которой выталкивается исследуемое вещество из поля электромагнита, масса эталонного и исследуемого вещества. В силу трудоемкости измерений и сильного разброса полученных результатов необходима их статистическая обработка. Этот способ можно поставить под сомнение исходя из того, что при сублимации штамма микроорганизмов измеряется магнитная восприимчивость для объектов, утративших свое функциональное состояние.

Более достоверным является способ определения магнитной восприимчивости, описанный в работе [5]. Для измерения магнитной восприимчивости одиночных эритроцитов с индуцированным магнитным моментом любого знака относительно среды порядка $10^4 \dots 10^5$ магнетонов Бора использовалась техника с сильно неоднородными

магнитными полями рассеяния, возникающими вблизи поверхности тонкой магнитной проволочки при ее поперечном намагничивании. В эксперименте исследуются параметры движения клетки, обусловленные взаимодействием индуцированного внешним полем магнитного момента клетки с полем рассеяния от поперечно намагниченной тем же полем проволоки. Измеряют начальные и конечные координаты каждого эритроцита и время его движения между этими координатами. По этим параметрам рассчитывают магнитную восприимчивость клеток по формуле, в которой учитываются такие параметры, как удельная магнитная восприимчивость эритроцита относительно среды, вязкость среды, эффективный гидродинамический радиус эритроцита, радиус проволоки, вектор напряженности магнитного поля в месте нахождения эритроцита, намагниченность материала проволоки, объем эритроцита, время прохождения клеткой отрезка траектории между начальными и конечными координатами.

При этом существенными оказываются значение и знак разности между магнитными восприимчивостями частицы и буферной среды, притяжение в область наибольшей напряженности, при $\chi > 0$ наблюдается явление парамагнитного захвата – притяжение частицы в область наибольшей напряженности поля, при $\chi < 0$ наблюдается диамагнитный захват частиц (более диамагнитных, чем среда) в область наименьшей напряженности поля.

Данная работа посвящена определению магнитной восприимчивости слабомагнитных микрообъектов в зависимости от угла осаждения микрообъектов на высокоградиентную ферромагнитную насадку сферической формы, помещенную во внешнее постоянное однородное магнитное поле.

Экспериментальные исследования по определению магнитной восприимчивости микрообъектов в зависимости от угла осаждения их на сферическую насадку проводились на установке [6] в соответствии со способом, описанным в работе [7]. Установка позволяет наблюдать процесс взаимодействия насадки, имеющей форму шарика и создающей высокоградиентное магнитное поле за счет помещения ее во внешнее однородное магнитное поле со слабомагнитными мелкодисперсными частицами, находящимися во взвешенном состоянии в модельной жидкости. Модельная жидкость изготавливалась на основе полиэтиленоксида. Это экологически чистое вещество хорошо растворяется в воде и может менять свою вязкость в зависимости от концентрации в широких пределах. Высокоградиентная насадка изготавливалась из стальной проволоки по технологии, описанной в патенте [8]. В качестве слабомагнитных дисперсных частиц брались окислы: гольмия Ho_2O_3 с дисперсностью 1...3 мкм, гадолиния Gd_2O_3 с дисперсностью 2...4 мкм и неодима Nd_2O_3 с дисперсностью 1...3 мкм. Их магнитные восприимчивости – $229 \cdot 10^{-6}$, $135 \cdot 10^{-6}$, $29 \cdot 10^{-6}$ соответственно [9]. Процесс взаимодействия улавливаемых частиц с насадкой наблюдался непосредственно на экране монитора, сопряженного с телекамерой, укрепленной на микроскопе. Установка позволяет изменять внешнее магнитное поле в интервале 0...3000 Э, а также изменять направление потока модельной жидкости \vec{V}_0 по отношению к внешнему магнитному полю \vec{H}_0 на 90° (в одном случае $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$, во втором – $\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$).

После многочисленных измерений были получены усредненные значения угла осаждения кластера уловленных ферромагнитной насадкой слабомагнитных частиц. При условии, что направление внешнего магнитного поля H_0 совпадает с направлением оси Y , угол осаждения кластера уловленных ферромагнитной насадкой слабомагнитных частиц определялся: для $\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$ как угол между осью Y (для $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$ как угол между осью X) и радиусом-вектором, проходящим через центр ферромагнитной насадки и какую-либо точку на насадке, являющейся границей кластера уловленных частиц. При этом для $\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$

кластер уловленных частиц симметричен относительно оси Y , для $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$ кластер уловленных частиц симметричен относительно оси X . Эксперименты проводились при следующих значениях параметров системы: диаметр ферромагнитной насадки $d = 110$ мкм, вязкость жидкости $\eta = 10^{-5}$ м/с, внешнее магнитное поле $\vec{H}_0 = 160$ кА/м, дисперсность парамагнитных примесей – 6 мкм, скорость потока жидкости $\vec{V}_0 = 10^{-4}$ м/с. Экспериментальные результаты показали, что угол осаждения парамагнитных частиц на элемент ферромагнитной насадки во внешнем постоянном однородном магнитном поле зависит от их магнитной восприимчивости и увеличивается с уменьшением последней, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами, приведенными ниже.

Для теоретического определения магнитной восприимчивости слабомагнитных микрообъектов в зависимости от угла осаждения микрообъектов на высокоградиентную ферромагнитную насадку сферической формы, помещенную во внешнее постоянное однородное магнитное поле, было решено уравнение движения в окрестности элемента ферромагнитной насадки [10]:

$$\vec{V} = C \text{grad} \vec{H}^2 + \vec{V}_0, \quad (1)$$

где \vec{V} – скорость движения неферромагнитной частички в жидкости; $C = \frac{\chi V_{\text{нф}}}{6\pi\eta B}$, χ – восприимчивость слабомагнитной примеси; $V_{\text{нф}}$ – объем неферромагнитной частицы, равный $\frac{4}{3}\pi B^3$; η – вязкость рабочей жидкости, B – радиус неферромагнитной примесной частицы; \vec{H} – суммарное магнитное поле, равное $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_r$, \vec{H}_0 – внешнее магнитное поле, \vec{H}_r – магнитное поле, создаваемое улавливающей частицей; \vec{V}_0 – скорость движения жидкости.

В работах [10] и [11] при решении системы уравнений (1) рассматривался вопрос об улавливании слабомагнитных примесей ферромагнитной частицей шарообразной формы и уравнение (1) решалось без учета реального распределения скоростей движения жидкости. Такое приближение справедливо для вычисления размеров области улавливания, так как на достаточно больших расстояниях по сравнению с радиусом R улавливающей частицы магнитные силы малы, а искажения потока жидкости незначительны. Однако, если интересоваться не только самим фактом эффективности улавливания неферромагнитной частицы, но и формой области улавливания, а также траекторией ее движения в окрестности ферромагнитной частицы и точкой осаждения частицы на ферромагнитную насадку при определении угла осаждения, то важно учитывать реальное распределение скоростей потока жидкости в окрестности насадки.

Для этого систему уравнений (1) запишем в безразмерном виде для случая, когда направление внешнего магнитного поля фильтра (\vec{H}_0) перпендикулярно потоку жидкости (\vec{V}_0) – ($\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$):

$$\begin{cases} v_x = c \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial x} + V_x; \\ v_y = c \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial y} + V_y; \\ v_z = c \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial z} + V_z, \end{cases} \quad (2)$$

и для случая, когда направление внешнего магнитного поля фильтра параллельно потоку жидкости со слабомагнитными примесями ($\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$):

$$\begin{cases} v_x = c \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial x} + V_x; \\ v_y = c \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial y} + V_y; \\ v_z = c \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial z} + V_z, \end{cases} \quad (3)$$

где $c = \frac{2M_{\text{табл}}^2 \chi V_{\text{н.ф}}}{6\pi\eta V_0 A}$; $M_{\text{табл}} = 4\pi M$, где M – намагниченность ферромагнитной частицы;

η – динамическая вязкость; V_0 – скорость потока жидкости вдоль OZ вдали от ферромагнитной частицы; A – радиус ферромагнитной частицы; v_x, v_y, v_z – безразмерные скорости в единицах v_0 (улавливаемой частицы); V_x, V_y, V_z – безразмерные скорости в единицах v_0 потока жидкости вокруг ферромагнитной частицы.

При этом пространственные производные квадрата магнитного поля H^2 могут быть представлены следующим выражением в случае, когда $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial x} = \frac{x}{r^5} \left(\frac{3H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{x^2}{r^2} - \frac{4}{3} \frac{x^2}{r^5} \right); \\ \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial y} = \frac{y}{r^5} \left(\frac{H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{x^2}{r^5} - \frac{1}{3r^3} - \frac{4}{3} \frac{x^2}{r^5} \right); \\ \frac{\partial H_{\perp}^2}{\partial z} = \frac{z}{r^5} \left(\frac{H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{x^2}{r^5} - \frac{1}{3r^3} - \frac{4}{3} \frac{x^2}{r^5} \right) \end{cases} \quad (4)$$

и в случае, когда $\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$, выражением:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial x} = \frac{x}{r^5} \left(\frac{H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{z^2}{r^2} - \frac{1}{3r^3} - \frac{4}{3} \frac{z^2}{r^5} \right); \\ \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial y} = \frac{y}{r^5} \left(\frac{H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{z^2}{r^2} - \frac{1}{3r^3} - \frac{4}{3} \frac{z^2}{r^5} \right); \\ \frac{\partial H_{\parallel}^2}{\partial z} = \frac{z}{r^5} \left(\frac{3H_0}{M_{\text{табл}}} - \frac{5H_0}{M_{\text{табл}}} \frac{z^2}{r^2} - \frac{4}{3} \frac{z^2}{r^5} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Здесь x, y, z – безразмерные координаты слабомагнитной частицы,

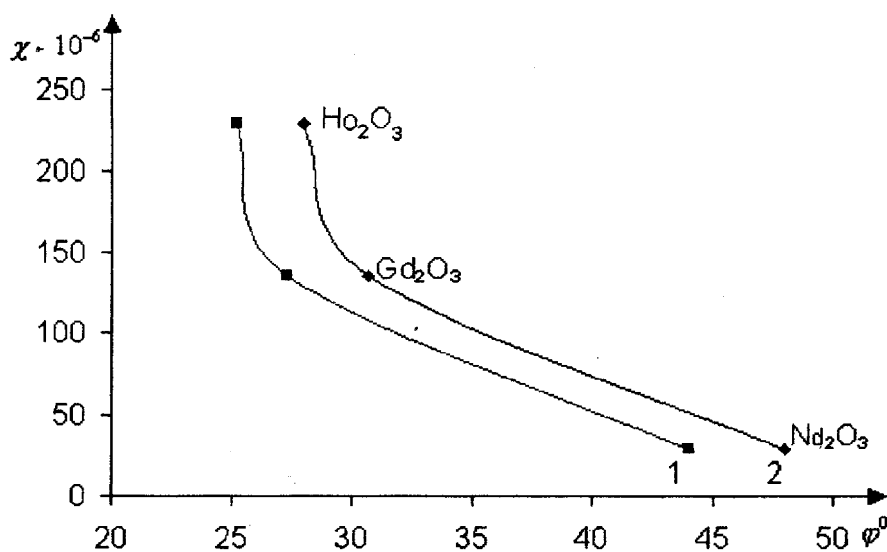
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{в единицах } A).$$

При этом составляющие скорости потока рабочей жидкости V_x, V_y, V_z с учетом реального распределения скоростей потока жидкости для случаев (2) и (3) можно описать формулами [12]:

$$\begin{cases} V_x = -\frac{3xz}{4r^3} + \frac{3xz}{4r^5}; \\ V_y = -\frac{3yz}{4r^3} + \frac{3yz}{4r^5}; \\ V_z = -\frac{3}{4}\left(\frac{1}{r} + \frac{z^2}{r^3}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{1}{r^3} - \frac{3z^2}{r^5}\right) + 1. \end{cases} \quad (6)$$

Системы уравнений (2) и (3) с учетом (5) были решены численным методом и были определены координаты (сферические углы) места попадания улавливаемых насадкой слабомагнитных примесей на поверхность улавливающей ферромагнитной насадки сферической формы. Численное решение систем уравнений (2) и (3) было выполнено для тех же параметров системы, что и в экспериментах, описанных выше, как для случая, когда поток жидкости перпендикулярен по отношению к внешнему магнитному полю, так и для случая, когда поток жидкости параллелен внешнему магнитному полю.

Приведенные на рисунке теоретические и экспериментальные результаты для случая, когда $\vec{H}_0 \parallel \vec{V}_0$, показывают небольшие отличия магнитных восприимчивостей, определенных для одинаковых значений углов.



Зависимость угла осаждения φ^0 микроробъектов на сферическую ферромагнитную насадку от их магнитной восприимчивости χ для случая, когда поток жидкости параллелен направлению внешнего магнитного поля: 1, 2 – соответственно теоретический и экспериментальный результаты

Как показано в работе [13], эта особенность объясняется локальной наведенной магнитной анизотропией ферромагнитной насадки и ее магнитной неоднородностью, что приводит к ухудшению ее характеристик, так как для захвата микроробъекта требуется

приложить большее магнитное поле, чем в случае, когда насадка намагничена до состояния насыщения. Тем не менее, полученная теоретическая зависимость угла осаждения микрообъектов на элемент ферромагнитной насадки от их магнитной восприимчивости удовлетворяет экспериментальным данным в пределах погрешности, следовательно, можно получить магнитную восприимчивость микрообъекта из решения уравнения движения слабомагнитной примеси в окрестности сферической ферромагнитной насадки при известном (определенном экспериментально) значении угла осаждения φ° его на насадку.

Список литературы

1. Плевень Ю.А., Блум Э.Я. Магнитные свойства пара- и диамагнитного фореца клеток крови при высокоградиентной магнитной сепарации // Магнитная гидродинамика. – 1983. – № 4. – С. 3–14.
2. Магнитные свойства и магнитная седиментация лимфоцитов / Ю.А. Плевень, Э.Я. Блум., Л.И. Яворковский., И.Т. Медне, Р.Я. Озолс // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 1. – С. 140–142.
3. Червинец В.М. Характеристики изменчивости бактерий в условиях пульсаций геомагнитного поля // Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. мед. наук. – Л., 1981, 18 с.
4. Павлович С.А. Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов. – Минск: Беларусь, 1981. – 130 с.
5. Шальгин А.Н., Кротов К.А. Магнитный захват одиночных биологических клеток и модельных агрегатов клеточных мембран // УФН–1990. – Т. 160. – Вып. 7. – С. 83–104.
6. Горобец С.В., Пименов Ю.М. Установка для исследования взаимодействия насадок магнитных фильтров с неферромагнитными частицами // Наука производству. – 1998. – № 4. – С. 28–31.
7. Горобец С.В., Пименов Ю.М. Спосіб визначення магнітної сприйнятливості мікрооб'єктів // Патент № 26949, B01D35/06, C12Q1/24 від 03.02.99.
8. Горобец С.В., Пименов Ю.М. Способ получения металлических гранул // Патент № 24124, B01D35/06, B03C1/30 від 31.08.98.
9. Физические величины: Справочник /А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
10. Верклов Б.А., Горобец С.В. Механизм взаимодействия ферромагнитных и неферромагнитных примесей рабочих жидкостей гидросистем в магнитных фильтрах // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 46–49.
11. Горобец С.В. Зависимость эффективности коагуляции ферромагнитных и неферромагнитных примесей в магнитном поле от параметров фильтров, рабочих жидкостей и примесных частиц // Известие вузов. Машиностроение. – 1991. – № 1–3. – С. 22–24.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
13. Горобец С.В., Пименов Ю.М., Тарасова О.О. Влияние величины внешнего магнитного поля и внутренней структуры ферромагнитной насадки на эффективность сепарации парамагнитных примесей // Вестник ХГТУ: Сб. науч.тр. – Харьков: ХГТУ. – 1997. – № 1 (5). – С. 240–245.