

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-22-00311, <https://rscf.ru/project/22-22-00311/>.

### Литература

1. Ryapolov P. A., Sokolov E. A., Postnikov E. B. Behavior of a gas bubble separating from a cavity formed in magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – С. 169067.

УДК 538.4

### НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ И МАГНИТОФЕРЕЗА В СУСПЕНЗИИ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Баштовой В.Г.<sup>1</sup>, Рекс А.Г.<sup>1</sup>, Кужир П.П.<sup>2</sup>, Погирницкая С.Г.<sup>1</sup>,  
Загадская А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Университет Кот д'Азур, Ницца, Франция

В неоднородном магнитном поле в суспензии магнитных наночастиц происходит переконцентрация магнитных частиц. Объектом настоящего исследования является тонкий осесимметричный слой магнитной жидкости, находящийся в магнитном поле с осесимметричным градиентом, направленным к центру слоя.

Исследованию процессов диффузии и магнитофереза в суспензиях магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле к настоящему времени посвящено достаточно большое количество работ [1-3]. Это связано с тем, что исследование таких системы является интересным как с научной точки зрения, так и представляется важным для практических приложений в связи с широким использованием одного из наиболее ярких их представителей - магнитных жидкостей в технических устройствах.

В неоднородном магнитном поле в суспензии магнитных наночастиц происходит переконцентрация магнитных частиц. В областях суспензии, где напряженность магнитного поля выше, концентрация магнитных частиц увеличивается. В результате возникают неоднородности магнитных и теплофизических характеристик в суспензиях, что приводит к возможной нестабильности параметров устройств [4-6].

Основное внимание в настоящей работе уделяется исследованию протекания указанных процессов во времени  $t$ .

Объектом настоящего исследования является тонкий осесимметричный слой магнитной жидкости, находящийся в магнитном поле с осесимметричным градиентом, направленным к центру слоя.

**Эксперимент:** В эксперименте осесимметрично неоднородное магнитное поле создавалось мощным постоянным магнитом с заостренными осесимметричными полюсами, между которыми располагался тонкий слой магнитной жидкости, ограниченный стеклянными пластинами (рисунок 1). Напряженность магнитного поля  $H$  имела наибольшее значение на оси, проходящей через полюса, и спадала по мере увеличения расстояния  $r$  от нее, имея осесимметричную геометрию. Непосредственно под полюсами при  $r=0$  напряженность поля составляла  $H(0)=810$  кА/м, а в остальной области хорошо аппроксимировалась распределением Гаусса

$$H' = H / H(0) = 0,35 + 0,65 \exp(-3,6r'^2), \text{ где } r' = r / R_0, R_0 = 5 \text{ мм.}$$

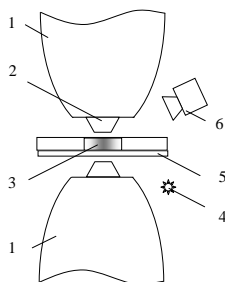


Рисунок 1. Экспериментальная установка  
1- постоянный магнит, 2- полюса, 3- осесимметричный слой магнитной жидкости, 4- источник света, 5- матовый фон, 6- фотоаппарат

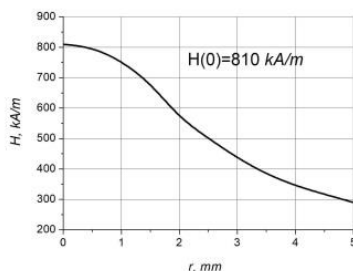


Рисунок 2. Распределение модуля напряженности магнитного поля между полюсами магнита в радиальном направлении.

Эксперименты выполнялись с магнитной жидкостью, представляющей собой стабилизированную суспензию частиц магнетита в керосине. Плотность жидкости составляла  $1008$  кг/м<sup>3</sup>, объемная концентрация твердой фазы  $0,045$ . Радиус исследуемого слоя жидкости составлял  $4$  мм, а его толщина -  $0,05$  мм.

Ниже на рисунке 3 представлены фотографии, демонстрирующие повышение концентрации (более темные области) магнитных наночастиц в суспензии в центральной части слоя, где наибольшая напряженность

магнитного поля, вплоть до их практического полного выделения из жидкости-носителя.

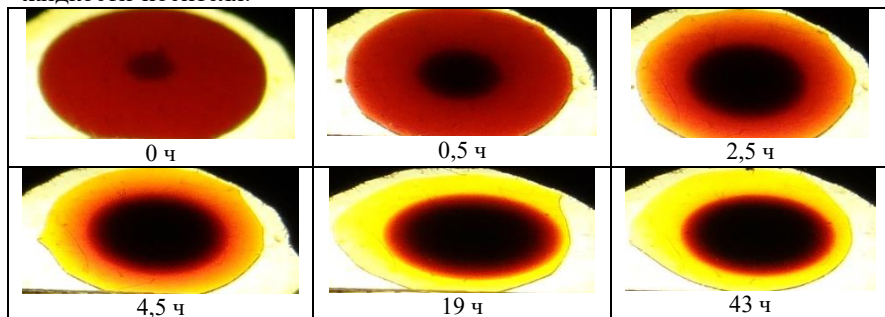


Рисунок 3. Перераспределение концентрации наночастиц в суспензии в неоднородном магнитном поле с течением времени  $t$

Увеличение степени черноты на этих фотографиях непосредственно связано с повышенной концентрацией частиц в этих областях (рисунок 4).

Обращает на себя тот факт, что пересечение зависимостей в разные моменты времени происходит в одной и той же узкой области, близкой к половине радиуса капли.

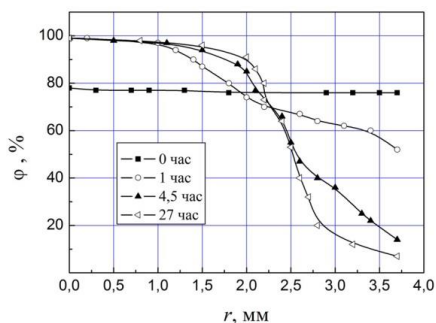


Рисунок 4. Радиальное распределение степени черноты на фотографиях слоя магнитной жидкости в разные моменты времени.

*Теория:*

Теоретическое описание поставленной задачи основывается на уравнении нестационарных процессов диффузии и магнитофореза, которое в безразмерном виде будет иметь следующий вид [3]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left[ r' \left( -\frac{\partial \Phi}{\partial r'} + U \Phi L \frac{\partial H'}{\partial r'} \right) \right] = 0, \quad (1)$$

где  $L(UH')$  – функция Ланжевена,  $U$  – безразмерный критерий, являющийся отношением магнитной энергии частицы к ее тепловой энергии,  $t' = t(D/R_0)$ ,  $r' = r/R_0$ ,  $D$  – коэффициент диффузии частиц,  $R_0$  – радиус слоя.

Граничные и начальные условия задачи заключаются в равенстве нулю потока массы частиц на границе слоя:

$$i_r = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial r'} = U \Phi L \frac{\partial H'}{\partial r'} \quad \text{при } r' = 1. \quad (2)$$

и задании в начальный момент времени распределения концентрации частиц:  $\Phi = \Phi_0(r')$  при  $t' = 0$ .

Кроме того, в каждый момент времени должно выполняться условие постоянства средней концентрации  $\int_0^1 \Phi r' dr' = \int_0^1 \Phi_0 r' dr'$ .

В результате расчетов определяется радиальное распределение концентрации частиц в каждый момент времени (рисунок 5) и изменение во времени концентрации частиц в каждой точке слоя (рисунок 6).

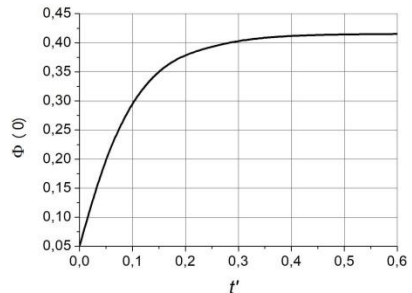
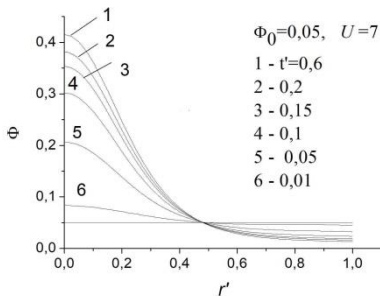


Рисунок 5. Радиальное распределение концентрации частиц в разные моменты времени

Рисунок 6. Изменение во времени концентрации частиц в центре слоя.

Как видно из представленных на рисунках 5 и 6 графиков уже при  $t' = 0,3$  распределение концентрации выходит на стационарный режим, описываемый полученными ранее соотношениями [6],

$$\Phi = B \frac{sh[UH'(r')]}{H'(r')}, \quad B = \frac{1}{2} \Phi_0 \left\{ \int_0^1 \frac{sh[UH'(r')]}{H'(r')} r' dr' \right\}^{-1}.$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (Т МС20-015).

Авторы признательны проф.М.С.Кракову за помощь в проведении численного моделирования исследованных процессов.

### Литература

1. Bashtovoi V.G., Berkovsky B.M., Vislovich A.N. An Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids, Hemisphere Publ. Corp., 1988, Washington, 190 p.p.

2. Bashtovoi, V.G. The effect of diffusion processes on the statics of magnetic fluids / V.G. Bashtovoi, V.K. Polevnikov, A.M. Algalad // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2006. – No 3. P. 42 – 48.

3. Bashtovoi, V.G. Influence of Brownian Diffusion on the Statics of Magnetic Fluid / V.G. Bashtovoi [and others]. – Magnetohydrodynamics. – 2007. – Vol.43, No 1. – P.3-11.

4. Баштовой, В.Г. Процессы диффузионного и магнитофоретического массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях с фазовыми переходами / В.Г.Баштовой, П.П.Кужир, А.Ю.Зубарев, В.С.Мороз // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук». – 2017. - № 2. – С. 78-87.

5. Bashtovoi, V. On the mechanics of magnetic fluids with field-induced phase transition: application to Couette flow / V.G. Bashtovoi, P.P. Kuzhir, A.Y. Zubarev, V.S. Moroz // Magnetohydrodynamics. – 2018. – V. 54, No 3. – P.181-197.

6. Bashtovoi, V. Effect of magnetophoresis and Brownian diffusion on mechanical processes in magnetic fluids: The role of a condensation phase transition / V. Bashtovoi, A. Reks, P. Kuzhir, A. Zubarev, O. Volkova, V. Moroz // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – V. 498, 15 March. - 166148 (5 pages).

УДК 538.4

### **О ФОРМИРОВАНИИ ЛОКАЛЬНОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Загадская А.А., Климович С.В.  
Белорусский национальный технический университет

Объектом настоящего исследования является возможности интенсификации процессов переноса при использовании магнитных жидкостей в качестве тепловоспринимающей среды.