

УДК 541: 537

© А. И. Жерновой, В. Н. Наумов, Ю. Р. Рудаков

НАБЛЮДЕНИЕ МЕТОДОМ ЯМР ГИСТЕРЕЗИСА НАМАГНИЧЕННОСТИ СУСПЕНЗИИ ПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В работе методом ЯМР исследовалось влияние предварительного намагничивания суспензии парамагнитных наночастиц в сильном поле на ее кривую намагничивания. Показано, что после действия сильного поля кривая намагничивания смещается вниз. Эффект объяснен образованием немагнитных конгломератов парамагнитных наночастиц.

Кл. сл.: ядерный магнитный резонанс, суспензия парамагнитных наночастиц, кривая намагничивания, немагнитные конгломераты

ВВЕДЕНИЕ

При измерении намагниченности магнитной суспензии методом вибрирующего образца было получено, что предварительное намагничивание суспензии в сильном поле приводит к увеличению ее намагниченности, измеряемой в более слабом поле [1, 2]. Погрешность измерения намагниченности методом вибрирующего образца составляет 240 А/м [2], поэтому представляет интерес провести аналогичный опыт с использованием для измерения намагниченности метода ЯМР, имеющего погрешность значительно меньше.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовалась водная суспензия наночастиц магнетита, размером около 10 нм с объемной концентрацией твердой фазы 2.7 % и стабилизатором на основе олеиновой кислоты. Методом, описанным в [3], снимались кривые намагничивания суспензии — зависимости намагниченности I от напряженности внутреннего намагничивающего поля H_H . Результаты приведены на рис. 1, где кривая 1

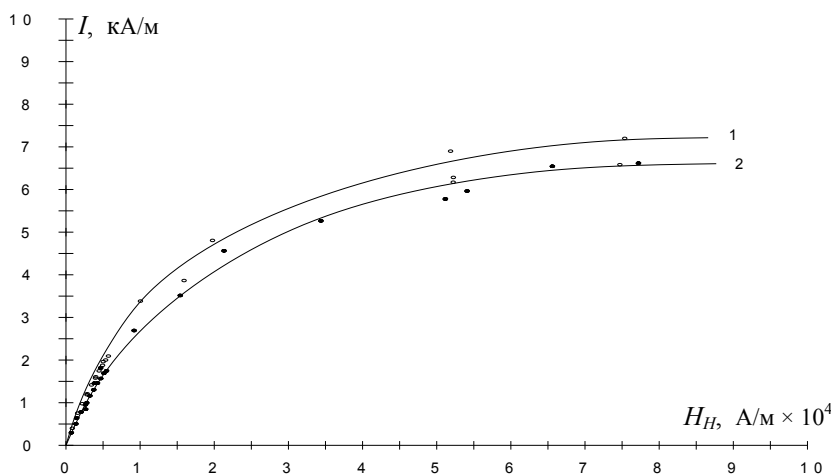


Рис. 1. Экспериментальные зависимости намагниченности I суспензии наночастиц магнетита от напряженности H_H внутреннего намагничивающего поля без предварительного намагничивания суспензии ($\circ$, кривая 1), и после ее предварительного намагничивания в сильном поле ($\bullet$, кривая 2)

получена для тщательно перемешанной суспензии, а кривая 2 для этой же суспензии после ее пребывания в течение 20 минут в магнитном поле с индукцией 0.5 Тл. Кривая 2 проходит ниже кривой 1, т. е. предварительное намагничивание суспензии в сильном поле уменьшает ее намагниченность в слабом поле. Если после намагничивания в сильном поле суспензию перемешать, то эффект исчезает. Это показывает, что он связан с образованием структуры, которая разрушается при перемешивании.

АНАЛИЗ ПРИЧИН УМЕНЬШЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Если суспензия содержит неагрегированные парамагнитные наночастицы с магнитными моментами P_0 и концентрацией n , то ее равновесная намагниченность в магнитном поле с напряженностью H_H определяется формулой Ланжевена:

$$I = I_s \text{La} \left(\frac{P_0 \mu_0 H_H}{KT} \right), \quad (1)$$

где La — функция Ланжевена, K — постоянная

Больцмана, T — температура, I_s — намагниченность насыщения.

По формуле (1), уменьшение I может быть следствием уменьшения I_s или увеличения P_0 . Какой из этих двух вариантов осуществляется на практике, определим из результатов эксперимента.

На начальных участках кривых $\left(H_H < 5 \frac{\text{кА}}{\text{м}} \right)$ формула (1) имеет вид

$$I = \frac{I_s P_0 \mu_0}{3KT} H_H, \quad (2)$$

т. е. намагниченность I пропорциональна H_H с коэффициентом пропорциональности α , зависящим от I_s и P_0 :

$$\alpha = \frac{I_s P_0 \mu_0}{3KT}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены начальные участки кривых 1, 2 рис. 1. Прямые К1 и К2 представляют собой касательные к экспериментальным зависимостям 1, 2 при $H_H < 5 \text{ кА/м}$. Тангенсы углов наклона касательных к оси абсцисс, определенные методом наименьших квадратов, равны коэффициентам:

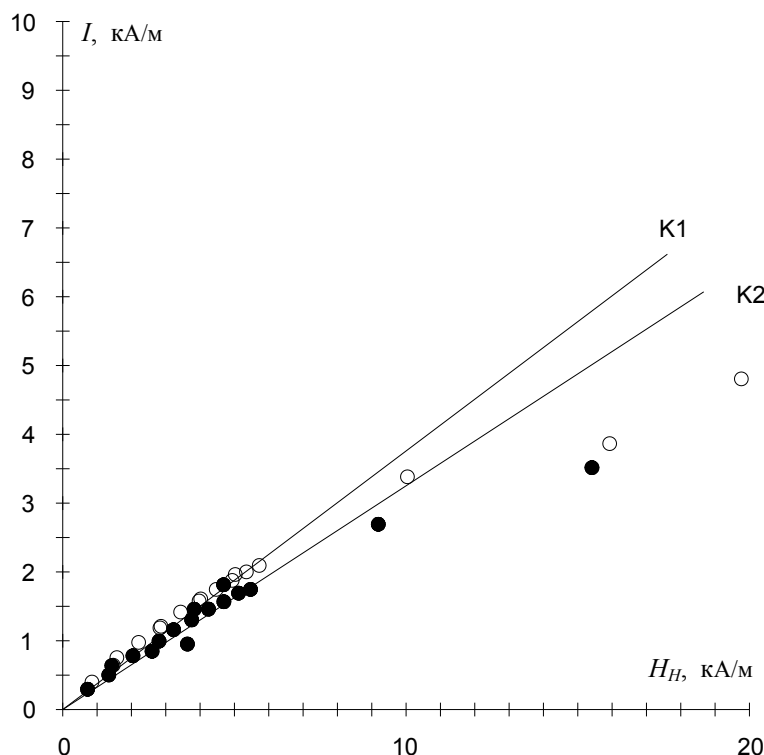


Рис. 2. Начальные участки экспериментальных зависимостей рис. 1. К1, К2 — касательные, проведенные через точки $\circ$ и $\bullet$ при $H_H < 5 \text{ кА/м}$

$\alpha_1 = 0.36$, $\alpha_2 = 0.33$. Сравнение α_1 и α_2 показывает, что предварительное намагничивание суспензии в сильном поле приводит к уменьшению произведения $I_S P_0$ на 8.3 %.

При $H_H > 15 \text{ кА/м}$ из (1)

$$I = I_S \left(1 - \frac{KT}{P_0 \mu_0 H_H} \right), \quad (4)$$

т. е. при $\frac{1}{H_H} \rightarrow 0$, I стремится к намагниченности

насыщения I_S , а с ростом $\frac{1}{H_H}$ I уменьшается ли-

нейно со скоростью $\frac{dI}{d(1/H_H)} = -\frac{I_S KT}{P_0 \mu_0}$.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости I от $1/H_H$, построенные по данным кривых 1, 2 рис. 1 ($H_H > 15 \text{ кА/м}$). Прямые П1, П2 проведены методом наименьших квадратов через экспериментальные точки, полученные без намагничивания (П1) и с намагничиванием (П2). Точка пересечения с осью ординат прямой П2 ($I_{S_2} = 7070 \text{ А/м}$) на 8.4 % ниже, чем прямой П1

($I_{S_1} = 7720 \text{ А/м}$), а тангенс угла наклона прямой П2, равный $550 \cdot 10^5$, на 8.3 % меньше, чем прямой П1, равный $500 \cdot 10^5$. Следовательно, предварительное намагничивание уменьшает величины I_S и I_S/P_0 на 8.4 % и на 8.3 % соответственно.

Итак, из эксперимента следует, что в результате предварительного намагничивания в сильном поле у суспензии наночастиц в близкой степени уменьшаются величины I_S , $I_S P_0$ и I_S/P_0 . Это возможно, если уменьшается I_S , а величина P_0 не меняется.

Уменьшение намагниченности I_S можно объяснить образованием антиферромагнитных конгломератов с замкнутым магнитным потоком. Возможность образования таких конгломератов отмечалась в [4]. В условиях описываемого опыта в таких конгломератах содержится около 8 % наночастиц. Незменность P_0 показывает, что в магнитном поле H_H независимо ориентируются магнитные моменты отдельных наночастиц, т. е. отсутствуют ферромагнитные конгломераты с устойчивой параллельной ориентацией магнитных моментов наночастиц.

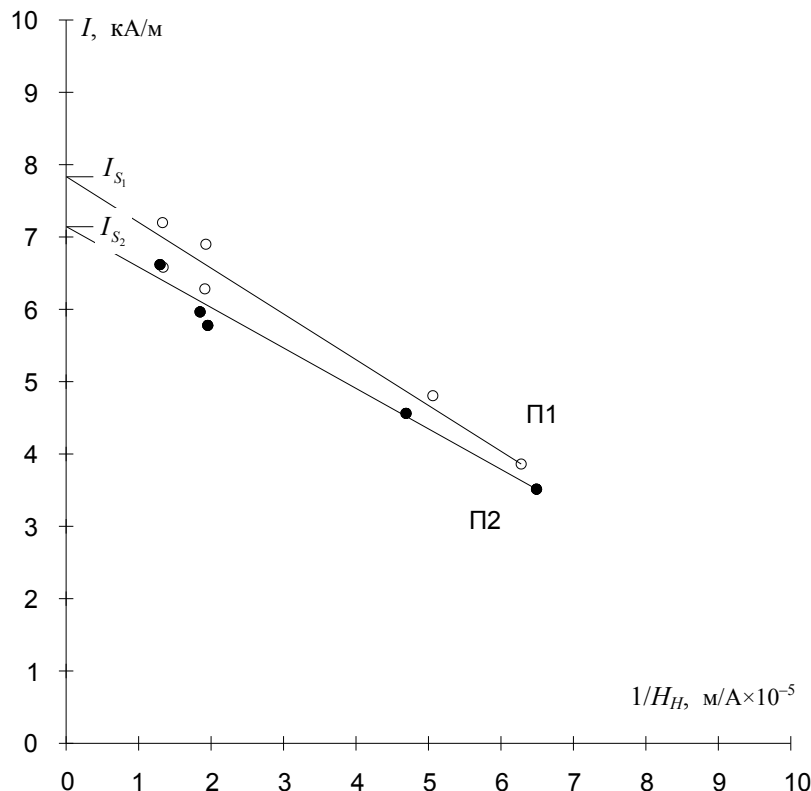


Рис. 3. Экспериментальные зависимости намагниченности I от $1/H_H$, построенные по экспериментальным результатам, приведенным на рис. 1, при $H_H > 15 \text{ кА/м}$.

○, П1 — без намагничивания;
●, П2 — после намагничивания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В [2] наблюдаемое на опыте увеличение равновесной намагниченности после пребывания парамагнитной суспензии в сильном магнитном поле сопровождалось расслоением, а при отсутствии расслоения гистерезис намагниченности замечен не был, видимо потому, что при этом изменение намагниченности было меньше погрешности метода измерений. Как показали вышеприведенные результаты, использование более чувствительного метода измерения намагниченности позволяет наблюдать гистерезис, вызванный обратимым образованием агрегатов с антиферромагнитным характером взаимной ориентации магнитных моментов наночастиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
2. Чеканов В.В., Дроздова В.И., Ницубидзе П.В., Скро-

ботова Т.В., Черемушкина А.В. // Магнитная гидродинамика. 1984. № 1. С. 3–9.

3. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 3. С. 57–61.
4. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. Л., 1981. 173 с.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
f-m@lti-gti.ru

Материал поступил в редакцию 20.04.2010.

NMR OBSERVATION OF PARAMAGNETIC NANOGLOBULES SUSPENSION NANOPARTICLES MAGNETIZATION HYSTERESIS

A. I. Zhernovoi, V. N. Naumov, Yu. R. Rudakov

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

The effect of strong magnetic field on the suspension of paramagnetic nanoparticles magnetization in a weak field was investigated. Observation of magnetization decrease may be explained by nanoparticles conglomerate formation with close magnetic flow.

Keywords: nuclear magnetic resonance, paramagnetic nanoparticles suspension, curve of magnetization, nonmagnetic conglomerates