

УДК 541.537

© А. И. Жерновой, С. В. Дьяченко

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В РАСТВОРЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ОБРАЗЦА

Методом ЯМР измерялся коэффициент размагничивания образца коллоидного раствора ферромагнитных наночастиц, помещенного в две длинные цилиндрические пробирки, расположенные параллельно напряженности внешнего магнитного поля и имеющие диаметры в 10 раз меньше высоты заполнения. Получено, что измеренный коэффициент размагничивания  $N \approx 0.09$ , в то время как теоретически у использованного образца  $N = 0.02$ . Эффект объяснен присутствием конгломератов наночастиц.

*Кл. сл.:* коллоидный раствор ферромагнитных наночастиц, измерение коэффициента размагничивания, влияние конгломератов наночастиц

### ВВЕДЕНИЕ

Если парамагнитное вещество помещено в однородное внешнее магнитное поле с напряженностью  $H_0$ , то средняя напряженность  $H_1$  поля внутри вещества может отличаться от  $H_0$ :  $H_1 = H_0 - NJ$ , где  $N$  — коэффициент размагничивания образца,  $J$  — средняя намагниченность. Значение  $0 \leq N \leq 1$  определяется формой образца. Если парамагнитное вещество помещено в цилиндрическую пробирку с диаметром, значительно меньшим высоты ее заполнения веществом, и осью, параллельной напряженности внешнего поля  $H_0$ , то  $N \ll 1$  и  $H_1 \approx H_0$ . Это справедливо, если исследуемое парамагнитное вещество однородно. Можно предположить, что если парамагнитные частицы распределены в веществе не равномерно, а сгруппированы в конгломераты, то каждый такой конгломерат имеет отличный от нуля локальный коэффициент размагничивания  $N_{\text{лок}}$  и локальную намагниченность  $J_{\text{лок}}$ , поэтому внутри его локальная напряженность поля  $H_{\text{лок}} = H_0 - N_{\text{лок}}J_{\text{лок}} \leq H_0$ . В результате средняя по объему образца напряженность магнитного поля  $H_1$  также будет меньше  $H_0$ . Настоящая работа посвящена проверке этой гипотезы.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Образец парамагнитного вещества помещается в однородное магнитное поле с заранее измеренной напряженностью  $H_0$ . Измерить  $H_1$  можно, воспользовавшись тем, что если в образце имеется плоская полость, ориентированная параллельно

вектору  $H_0$ , то напряженность поля в этой полости равна средней напряженности  $H_1$  внутри образца. Зная  $H_0$  и  $H_1$ , находим  $N = (H_0 - H_1) / J$ . Для определения  $J$  нужно измерить среднюю индукцию магнитного поля  $B$  внутри образца. Это можно сделать, воспользовавшись тем, что если в образце имеется плоская полость, ориентированная нормально  $H_0$ , то напряженность поля в этой полости  $H_2 = B / \mu_0$ . Определив  $H_2$  и  $H_1$ , находим  $J = (B / \mu_0) - H_1 = H_2 - H_1$ . В результате получаем

$$N = (H_0 - H_1) / (H_2 - H_1). \quad (1)$$

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследуемый парамагнитный раствор помещен в две цилиндрические пробирки диаметром 8 мм с плоским дном. Для создания внешнего магнитного поля применена катушка с внутренним диаметром 22 см, питаемая источником стабилизированного тока. Пробирки, заполненные раствором на высоту 80 мм, расположены в центре катушки параллельно ее оси на расстоянии 3 мм между их боковыми поверхностями. Для измерения напряженностей магнитного поля  $H_0$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  имеются 2 датчика ядерного магнитного резонанса. Вблизи центра катушки, в зазоре между пробирками, играющем роль плоской полости, параллельной  $H_0$ , располагается датчик 1 для измерения  $H_1$ , а вблизи дна одной из катушек располагается датчик 2 для измерения  $H_2$ . При отсутствии раствора оба датчика измеряют  $H_0$ . Применен метод нутации [1]. Датчики 1 и 2 представляют собой миниатюрные радиочастотные катушки 1, 2, намотанные на хлорвиниловую трубку диаметром

2 мм, по которой вода из водопровода протекает из кюветы, расположенной в сильном магнитном поле постоянного магнита (поляризатора) во вспомогательный датчик ЯМР, расположенный в слабом однородном поле другого магнита (анализатора). Вспомогательный датчик присоединен к прибору для регистрации сигнала ЯМР. Катушки 1, 2 присоединены к генератору радиочастоты. Для измерения магнитных полей в местах расположения датчиков 1, 2 генератор поочередно подключается к катушкам 1, 2 и измеряются частоты  $f_1$  (в катушке 1) и  $f_2$  (в катушке 2), при которых сигнал на выходе регистрирующего прибора меняет полярность. Предварительно при отсутствии в пробирках раствора измеряют частоты  $f_{01}$ ,  $f_{02}$ , находят среднюю частоту  $f_0 = (f_{01} + f_{02}) / 2$ , затем, заполнив пробирки раствором, измеряют частоты  $f_1$ ,  $f_2$ . Напряженности поля  $H_0$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  связаны с частотами  $f_0, f_1, f_2$ :  $H_0 = f_0 / \gamma$ ,  $H_1 = f_1 / \gamma$ ,  $H_2 = f_2 / \gamma$ , где  $\gamma = 59.3$  Гц·м / А — гиромагнитное отношение протонов. Выразив в (1) напряженности  $H_0$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  через частоты  $f_0, f_1, f_2$ , получаем

$$N = (f_0 - f_1) / (f_2 - f_1). \quad (2)$$

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовался суперпарамагнетик в виде коллоидного раствора в воде наночастиц магнетита размером около 10 нм с концентрацией твердой фазы 14 г на 100 мл со стабилизатором на основе олеиновой кислоты. До заполнения пробирок исследуемым раствором, установив в катушке, создающей внешнее магнитное поле, силу тока 140 мА, измерили в радиочастотных катушках датчиков нутации 1-ю и 2-ю резонансные частоты  $f_{01} = 85.09$  кГц и  $f_{02} = 85.10$  кГц, по которым нашли среднюю частоту поля  $f_0 = (f_{01} + f_{02}) / 2 = 85.095$  кГц. После этого, заполнив пробирки раствором до высоты 80 см, не меняя силу тока в катушке, создающей внешнее магнитное поле, снова измерили частоты в датчиках 1, 2:  $f_1 = 84.28$  кГц,

$f_2 = 91.85$  кГц. Подставив полученные экспериментально частоты в (2), находим  $N = 0.09$ . У образца в виде цилиндра с отношением длины к диаметру, равным 10, должно быть  $N_0 \approx 0.02$ . Полученное экспериментально значение  $N$ , большее чем коэффициент размагничивания образца, подтверждает гипотезу о том, что если создающие намагниченность ферромагнитные наночастицы находятся в растворе в виде конгломератов, то напряженность магнитного поля  $H_1$  внутри образца распределена неравномерно: внутри конгломератов, где локальная намагниченность  $J_{\text{лок}} \neq 0$ ,  $H_1 < H_0$ , а вдали от конгломератов, где  $J_{\text{лок}} = 0$ ,  $H = H_0$ . В результате средняя по образцу напряженность  $H_{1\text{ср}} < H_0$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное в длинном цилиндрическом образце, ориентированном параллельно напряженности внешнего магнитного поля, значение коэффициента размагничивания  $N > N_0$  подтверждает предложенную в работе [2] гипотезу, что на величину коэффициента размагничивания влияет присутствие конгломератов наночастиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А.И. Измерение магнитных полей методом нутации. Л.: Энергия, 1979. 103 с.
2. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 1. С. 13–16.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)*

Контакты: Жерновой Александр Иванович,  
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 26.03.2013

## IMPACT OF STRUCTURIZATION IN COLLOIDAL SOLUTION OF FERROMAGNETIC NANOPARTICLES ON DEMAGNETIZATION FACTOR OF THE SAMPLE

A. I. Zhernovoy, S. V. Dyachenko

*Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University)*

In experiment, the effective coefficient of demagnetization the sample of colloidal solution ferromagnetic nanoparticles was measured by method of NMR. This solution was put in two long cylindrical tubes parallel to

intensity of external magnetic field and having diameters are 10 times less than the height of the liquid. It is found that the measured coefficient of demagnetization  $N \approx 0.09$ , while in theory  $N = 0.02$ . The effect is explained by the presence of conglomerates of nanoparticles.

*Keywords:* colloidal solution of ferromagnetic nanoparticles, measurement of demagnetization factor, influence of conglomerates of nanoparticles