

УДК 541.537

© А. И. Жерновой, С. В. Дьяченко

## СРАВНЕНИЕ РАЗМЕРОВ И МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА В ПОРОШКЕ И В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАЦИИ (КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ)

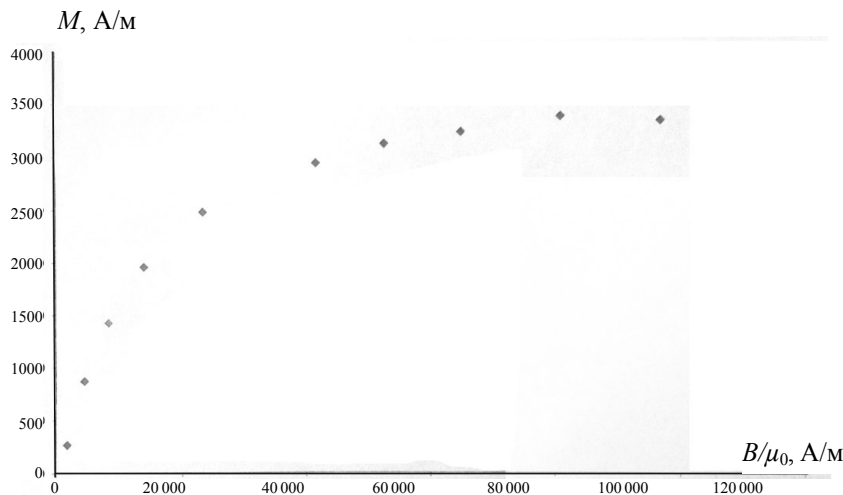
В работе получены кривые намагничивания порошка и коллоидного раствора в воде наночастиц магнетита, изготовленных в одном и том же цикле химического осаждения, измерен также удельный вес и рентгеновский спектр порошка. Исследования показали, что объем частиц порошка в 2.88 раза больше, чем объем наночастиц коллоидного раствора. Следовательно, наночастица порошка состоит из 2–3 однодоменных наночастиц коллоидного раствора. Однако магнитный момент наночастицы порошка при насыщении намагниченности только в 1.44 раза больше магнитного момента однодоменной наночастицы коллоидного раствора. Это можно объяснить тем, что составляющие частицу порошка однодоменные наночастицы даже при насыщении намагниченности имеют непараллельные друг другу ориентации магнитных моментов.

*Кл. сл.:* порошок магнетита, коллоидный раствор наночастиц магнетита, размер наночастицы, магнитный момент наночастицы

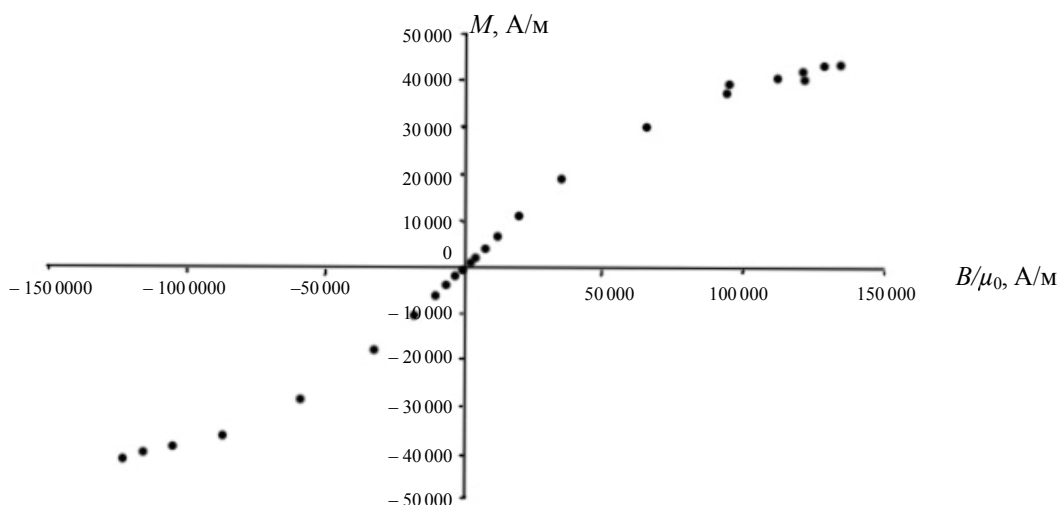
### ВВЕДЕНИЕ

Для приготовления порошка и коллоидного раствора наночастиц магнетита чаще всего используется технология химического осаждения щелочью наночастиц магнетита, образующихся из смеси компонент FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, имеющих одинаковую молярную концентрацию. Для приготовления порошка в смесь компонент добавляют щелочь, образующиеся наночастицы магнетита осаждают, промывают водой и высушивают. Для получения коллоидного раствора после добавления в смесь компонент щелочи, промывания водой и осаждения образовавшихся однодоменных на-

ночастиц в осадок наночастиц добавляют растворитель (воду) и стабилизатор (соль олеиновой кислоты) в нужном количестве. Если же растворитель и стабилизатор добавить в высушенный порошок частиц магнетита, то коллоидный раствор наночастиц магнетита (магнитная жидкость) не образуется. Это можно объяснить тем, что частица порошка является конгломератом нескольких наночастиц коллоидного раствора. Это можно проверить, сравнив размеры и магнитные моменты наночастиц порошка и магнитной жидкости, которые можно определить по их кривым намагничивания и другим характеристикам.

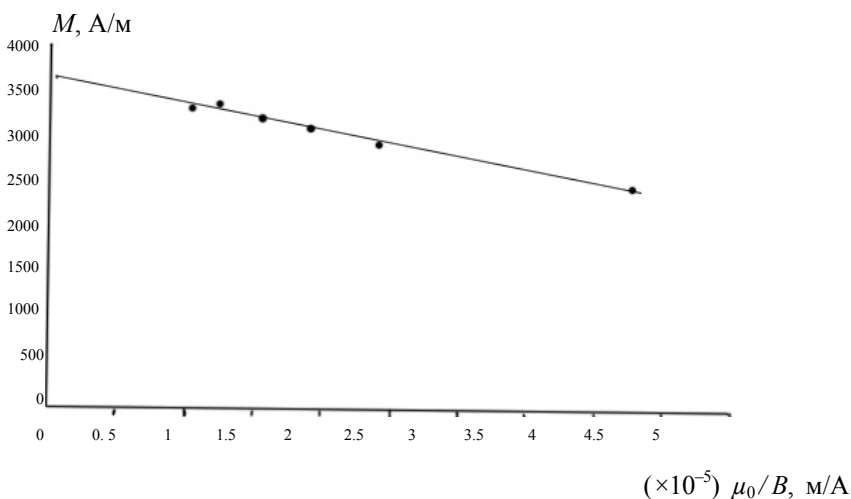


**Рис. 1.** Кривая намагничивания коллоидного раствора однодоменных наночастиц магнетита.  
 $M$  — намагниченность раствора,  $B$  — индукция магнитного поля внутри раствора



**Рис. 2.** Кривая намагничивания порошка магнетита.

$M$  — намагниченность порошка,  $B$  — индукция магнитного поля внутри образца



**Рис. 3.** Полученная из данных рис. 1 зависимость намагниченности  $M$  коллоидного раствора магнетита от  $(1/B)$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Для получения кривых намагничивания порошка (п) и коллоидного раствора (р) были применены описанные в работе [1] экспериментальная установка и методика, основанные на измерении индукции  $B$  и напряженности  $H$  магнитного поля внутри образца методом ЯМР. Полученные кривые намагничивания (зависимости намагниченности  $M$  от индукции  $B$ ) представлены на рис. 1, 2. Намагниченность определялась по формуле  $M = (B/\mu_0) - H$ . Был измерен также удельный вес порошка магнетита  $w_p = (m/V)$ , где  $m$  — вес,  $V$  — объем навески порошка, и проведен его рентгенофазовый анализ, в результате которого по дифрактограмме определен размер кристаллической части частицы порошка  $d_p$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

### Определение параметров наночастицы в коллоидном растворе

Определим магнитный момент  $P_p$ , объем  $V_p$  и размер  $d_p$  наночастицы в коллоидном растворе. Для этого по графику рис. 1 строим зависимость намагниченности магнитной жидкости  $M_p$  от  $\mu_0/B$ , представленную на рис. 3. Точка пересечения экспериментальной прямой с осью ординат дает значение намагниченности насыщения жидкости  $M_{np} = 3670$  А/м, а тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс связан с концентрацией наночастиц  $n_p$ :  $\operatorname{tga} = n_p kT/\mu_0 = 2.8 \cdot 10^7$ . Отсюда получаем концентрацию

$$n_p = \operatorname{tga}(\mu_0/kT) = (2.8 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot 10^7 / 1.38 \cdot 1023 \cdot 300) =$$

$$= (2.8 \cdot 4 \pi / 1.38 \cdot 3) \cdot 1021 = 8.5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Разделив намагниченность насыщения на концентрацию, находим магнитный момент наночастицы  $P_p = (3670/8.5)10^{-21} = 4.3 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$ .

Разделив магнитный момент наночастицы на намагниченность чистого магнетита  $\delta_m = 480 \text{ кА/м}$  [2], находим объем наночастицы жидкости  $V_p = (P_p/\delta_m) = (4.3/4.8) \cdot 10^{-24} = 0.896 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ .

### Определение объема $V_n$ наночастицы порошка

Определенный из рентгеновской дифрактограммы размер частицы порошка составляет 17 нм, откуда объем сферической частицы  $V_n = 2.57 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ .

### Определение магнитного момента $P_n$ наночастицы порошка

**Способ 1**, учитывающий реальную взаимную ориентацию магнитных моментов молекул магнетита.

Измеренный удельный вес порошка  $w_n = 1217 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , удельный вес цельного магнетита  $w_m = 5280 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  [2], следовательно, в одном кубическом метре порошка магнетит занимает объем  $V = (w_n/w_m) = (1217/5280) = 0.234 \text{ м}^3$ . Разделив объем магнетита в 1 м<sup>3</sup> порошка на объем одной частицы, находим число частиц порошка в единице объема  $n_n = 0.23 \text{ м}^3 / (2.57 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3) = 8.9 \cdot 10^{23}$ . Разделив намагниченность насыщения порошка  $M_{np} = 55000 \text{ А/м}$  на концентрацию его частиц  $n_n$ , получаем магнитный момент частицы порошка, определенный способом 1:

$$P_{n1} = (5.5/8.9) \cdot 10^{(4-22)} = 6.2 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

**Способ 2**, предполагающий, что магнитные моменты всех молекул магнетита направлены параллельно индукции внешнего магнитного поля.

Умножив магнитный момент единицы объема магнетита, равный 480 кА/м<sup>3</sup>, на объем частицы порошка  $V_n$ , находим магнитный момент частицы порошка, определенный способом 2:

$$P_{n2} = 4.8 \cdot 10^5 \cdot 2.57 \cdot 10^{-24} = 12.3 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное отношение объемов частицы порошка и частицы коллоидного раствора ( $V_n/V_p$ ) =  $(2.57/0.896) = 2.87$  показывает, что частица порошка состоит из нескольких (двух–трех) наночастиц коллоидного раствора. Сравнение магнитных моментов частицы порошка  $P_{n1}$  и  $P_{n2}$ , определенных способами 1 и 2, показывает, что реальный магнитный момент частицы порошка  $P_{n1} = 6.2 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$  в 2 раза меньше, чем возможный максимальный магнитный момент  $P_{n2} =$

$12.3 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$ , равный сумме параллельных магнитных моментов содержащихся в ней молекул магнетита. Это можно объяснить двумя причинами:

1. При измерении намагниченности порошка не у всех частиц порошка магнитные моменты ориентированы параллельно индукции внешнего магнитного поля  $B$ . Для исключения этого перед проведением измерений намагниченности контейнер с порошком подвергался действию сильного магнитного поля.

2. Однодоменные наночастицы, из которых состоит частица порошка, имеют не взаимно параллельные магнитные моменты. Иными словами, частица порошка является двух–трех доменной системой с непараллельной ориентацией осей доменов.

Как известно, намагничивание многодоменной системы при увеличении напряженности магнитного поля  $H$  происходит в результате трех процессов: 1) увеличения размеров одних доменов за счет других; 2) поворота осей доменов к направлению, параллельному  $H$ ; 3) домагничивания доменов. Выполнение условия  $P_{n1} < P_{n2}$  на участке насыщения кривой намагничивания рис. 2 можно объяснить тем, что при  $H < 70 \text{ кА/м}$  поворот осей доменов внутри частицы порошка не происходит.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, частица порошка состоит из двух–трех однодоменных наночастиц магнетита с непараллельной ориентацией магнитных моментов. Следовательно, при намагничивании порошка магнитным полем с напряженностью  $H$ , меньшей 70 кА/м, поворота внутри частицы осей доменов к направлению, параллельному  $H$ , не происходит.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Получение кривой намагничивания дисперсии парамагнитных наночастиц путем нахождения намагниченности и намагничивающего поля методом ЯМР // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 3. С. 57–61. URL: <http://213.170.69.26/mag/2009/full3/Art8.pdf>.
2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 239 с.

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

Контакты: Жерновой Александр Иванович,  
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию: 21.12.2015

**COMPARE OF SIZES END OF MAGNETIC MOMENTS  
NANOPARTICLES OF A MAGNETIT IN A COLLOID  
SOLUTION AND IN A POWDER, PREPARED  
BY A CEMICAL SEDYMENTATION  
(SHORT MESSAGE)**

**A. I. Zhernovoy, S. V. Diachenko**

*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia*

The magnetization curves of a powder and of a colloidal solution be received to define a sizes and a magnetic moments of nanoparticles. Size of a powder nanoparticle prove to be equal 2.88 of size a nanoparticle of colloidal solution, and a magnetic moment of a powder nanoparticle prove to be equal 1.44 of that colloidal solution. That`s why, powder nanoparticle content 2–3 nanoparticles of colloid solution with a nonparallel magnetic moments.

*Keywords:* : magnetite powder, colloidal solution of nanoparticles of magnetite, nanoparticle size, magnetic moment of a nanoparticle

**REFERENCES**

1. Zhernovoy A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Paramagnetic nanoglobules dispersion curve definition via magnetization and magnetizable field using NMR method]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Science Instrumentation], 2009, vol. 19, no. 3. pp. 57–61. URL: <http://213.170.69.26/mag/2009/full3/Art8.pdf> (In Russ.) .
2. Berkovskiy B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic liquids]. Moscow, Chemistry Publ., 1989. 239 p. (In Russ.).

Contacts: *Zhernovoy Aleksandr Ivanovich*,  
azhspb@rambler.ru

Article received in edition: 21.12.2015