

УДК 537.622.3-022.532:543.422.3-74

© А. И. Жерновой, С. В. Дьяченко

## НАБЛЮДЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ НА МАГНИТНУЮ ИНДУКЦИЮ ВНУТРИ И СНАРУЖИ ОБРАЗЦА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Методом ЯМР были измерены магнитные индукции  $B_1$  внутри и  $B_2, B_3$  снаружи образца магнитной жидкости, помещенного во внешнее магнитное поле с индукцией  $B_0$ . Измерения показали: 1) внутри образца магнитная индукция  $B_1 = B_0 + (\lambda - K)\mu_0 M$ , где  $M$  — намагниченность,  $\lambda$  — константа эффективного поля,  $K$  — коэффициент размагничивания; 2) снаружи образца, у поверхности, нормальной  $B_0, B_2 = B_0 + (\lambda + K)\mu_0 M$ ; 3) снаружи образца у поверхности, параллельной  $B_0, B_3 = B_0 - K\mu_0 M$ . Таким образом, при переходе через нормальные индукции  $B_0$  поверхности магнетика внутрь образца индукция скачком уменьшается на  $2K\mu_0 M$ , а при переходе наружу индукция скачком увеличивается на  $2K\mu_0 M$ . Это несоответствие теореме Гаусса, отрицающей скачок нормальной проекции индукции при переходе через поверхность образца, можно объяснить присутствием поверхностных магнитных зарядов. При выходе из образца через боковую поверхность индукция уменьшается на  $\lambda\mu_0 M$ , а при входе увеличивается на  $\lambda\mu_0 M$ . Это можно объяснить тем, что внутри образца магнитные моменты однодоменных наночастиц создают поток индукции, параллельный  $B_0$ .

*Кл. сл.:* парамагнетик, намагниченность, коэффициент размагничивания, поверхностные магнитные заряды, скачок магнитной индукции, теорема Гаусса

### ВВЕДЕНИЕ

По теореме Гаусса при переходе через границу магнетика нормальная поверхности проекция магнитной индукции не меняется, что объясняется отсутствием магнитных зарядов. Для проверки этого был проведен эксперимент.

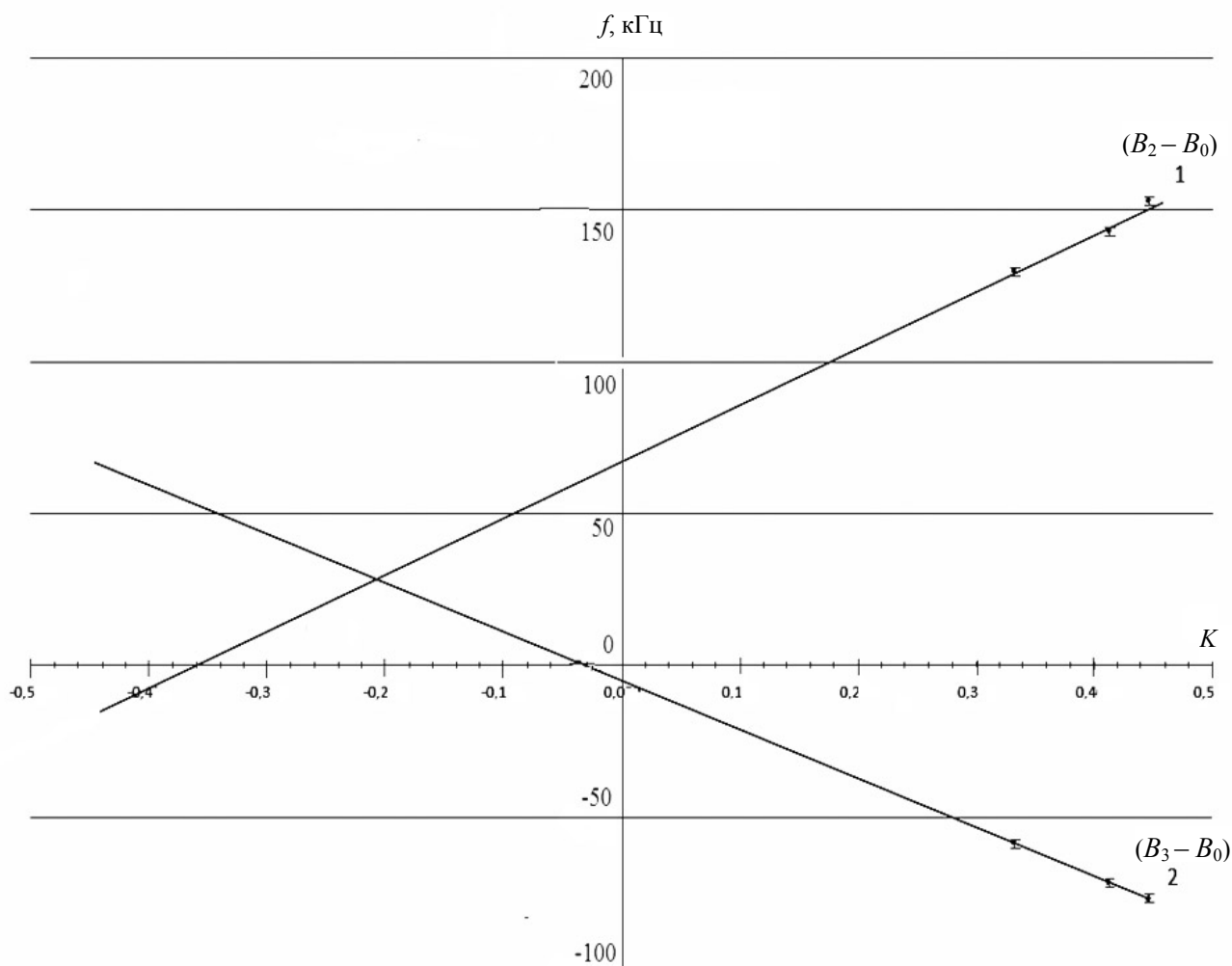
### ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве магнетика использовали коллоидный раствор наночастиц магнетита в воде (магнитную жидкость), который является парамагнетиком с магнитными моментами частиц в  $10^4$  раз больше магнетона Бора. Для измерения индукции магнитного поля применили метод ЯМР. В опыте 1, описанном в [1], при помощи спектрометра ЯМР С-200, имеющего индукцию магнитного поля  $B_0 = 4.7$  Тл, измерили зависимость резонансной частоты ЯМР  $f$  протонов растворителя от концентрации  $C$  наночастиц магнетита в двух образцах магнитной жидкости — одном в виде сферы, другом в виде длинного цилиндра, расположенного параллельно вектору магнитной индукции  $B_0$ . Оказалось, что с увеличением концентрации  $C$  частота ЯМР увеличивается по закону  $f = \gamma B_0 + \gamma\mu_0(\lambda - K)M$ , где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение протонов,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\lambda = 0.187$  — константа эффективного поля,  $M$  — пропорцио-

нальная концентрации  $C$  магнетита намагниченность коллоидного раствора,  $K$  — коэффициент размагничивания образца (для цилиндрического образца  $K = 0$ , для сферического образца  $K = 0.33$ ). Из результатов опыта 1 следует, что индукция магнитного поля внутри образца магнитной жидкости  $B_1 = (f / \gamma)$  отличается от индукции поля магнита спектрометра  $B_0$ :

$$B_1 - B_0 = \mu_0(\lambda - K)M. \quad (1)$$

В опыте 2, выполненном в настоящей работе на установке, описанной в [2], методом ЯМР измерили зависимость индукции магнитного поля снаружи образца коллоидного раствора магнетита, расположенного во внешнем магнитном поле с индукцией  $B_0 \approx 0.05$  Тл, от коэффициента размагничивания образца  $K$ . Результаты измерений приведены на рисунке, где представлены зависимости индукций магнитного поля  $B_2$  и  $B_3$  снаружи образца:  $B_2$  — вблизи поверхности, нормальной  $B_0$  (кривая 1), и  $B_3$  — вблизи поверхности, параллельной  $B_0$  (кривая 2), — от коэффициента размагничивания  $K$ , определяемого по таблице, приведенной в работе [3]. Из рисунка следует, что индукция  $B_2$ , измеренная снаружи образца вблизи поверхности, нормальной  $B_0$ , отличается от индукции  $B_0$ , измеренной в этой же точке при отсутствии образца, на величину



Экспериментальные зависимости индукции магнитного поля (выраженной через частоту ЯМР-протонов) снаружи образца от его коэффициента размагничивания  $K$ .

$B_2$  — индукция магнитного поля вблизи поверхности, нормальной индукции внешнего поля  $B_0$  (кривая 1);  $B_3$  — вблизи поверхности, параллельной  $B_0$  (кривая 2). Единица измерения индукции — частота ЯМР-протонов (кГц)

$$B_2 - B_0 = \mu_0(\lambda + K)M, \quad (2)$$

а индукция  $B_3$ , измеренная снаружи образца вблизи поверхности, параллельной  $B_0$ , отличается от индукции  $B_0$ , измеренной в этой точке при отсутствии образца:

$$B_3 - B_0 = -\mu_0 KM. \quad (3)$$

Сравнив выражения (1) и (2), находим скачок индукции  $B_2 - B_1$  при выходе из образца через поверхность, нормальную индукции внешнего поля  $B_0$ :

$$B_2 - B_1 = 2\mu_0 KM.$$

Это нарушение теоремы Гаусса можно объяснить присутствием поверхностных магнитных зарядов — положительного на границе, где индукция внешнего магнитного поля  $B_0$  выходит из образца, и отрицательного на границе, где индукция  $B_0$  входит в образец. Поверхностные магнитные заряды создают индукции, равные по модулю  $K\mu_0 M$ , усиливающие магнитное поле снаружи образца и ослабляющие магнитное поле внутри образца. Сравнив выражения (3) и (1), находим скачок индукции  $B_3 - B_1$  при выходе из образца через поверхность, параллельную индукции внешнего поля  $B_0$ :

$$B_3 - B_1 = -\mu_0 \lambda M.$$

Скачок касательной к поверхности составляющей индукции вызван тем, что поток индукции магнитного поля  $\mu_0 \lambda M$ , создаваемой магнитными моментами однодоменных ферромагнитных наночастиц внутри образца, не выходит за пределы его боковой поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент показывает, что на границах образца магнитной жидкости, нормальных направлению ее намагниченности, имеются поверхностные магнитные заряды, равные произведению коэффициента размагничивания образца на намагниченность. На поверхности, к которой направлен вектор намагничивания, магнитный заряд положительный, на поверхности, от которой направлен вектор намагничивания, магнитный заряд отрицательный. Положительный поверхностный магнитный заряд создает магнитную индукцию, которая внутри магнетика ослабляет, а вне магнетика усиливает индукцию внешнего магнитного поля, т. е. которая направлена от заряда. Отрицательный поверхностный магнитный заряд создает магнитную индукцию, которая направлена к поверхности магнетика, где сосредоточен заряд, поэтому она также внутри магнетика ослабляет, а снаружи магнетика усиливает внешнее магнитное поле. На боковой поверхности магнетика скачок индукции вызван тем, что магнитные моменты наночастиц создают поток магнитной индукции внутри магнетика только в направлении, параллельном  $B_0$ .

### ВЫВОДЫ

Индукция магнитного поля  $B_1$  внутри образца магнитной жидкости складывается из трех составляющих: индукции внешнего магнитного поля  $B_0$ , параллельной  $B_0$  индукции  $B_\lambda = \mu_0 \lambda M$ , создаваемой магнитными моментами наночастиц, и антипараллельной  $B_0$  индукции  $B_\kappa = \mu_0 K M$ , создаваемой поверхностными магнитными зарядами. При выходе из образца через поверхности, нормальные  $B_0$ , индукция  $B_\lambda$  не меняется, а индукция  $B_\kappa$  меняет полярность и становится параллельной  $B_0$ . При выходе из образца через поверхности, параллельные  $B_0$ , индукция  $B_\lambda$  уменьшается до нуля, а индукция

$B_\kappa$  не меняется. Поведение на границе магнетика составляющей магнитной индукции  $B_\kappa$  аналогично поведению на границе диэлектрика напряженности электрического поля, создаваемой поверхностными электрическими зарядами. Это подтверждает, что причиной появления составляющей  $B_\kappa$  являются поверхностные магнитные заряды. Поведение на границе магнетика составляющей магнитной индукции  $B_\lambda$  аналогично поведению на границе диэлектрика электрического смещения, создаваемого свободными электрическими зарядами. Исходя из этого по аналогии можно предположить, что составляющая  $B_\lambda$  создается свободными магнитными зарядами, образующими кванты магнитного потока [4] в однодоменных ферромагнитных наночастицах магнитных жидкостей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Измерение намагниченности и константы эффективного поля магнитной жидкости методом ЯМР // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 2. С. 33–38. URL: <http://213.170.69.26/mag/2008/abst2.php#abst4>.
2. 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/abst3.php#abst8>.
3. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1969. 184 с.
4. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Дискретность магнитных моментов однодоменных ферромагнитных наночастиц // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1. С. 72–76. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/abst1.php#abst12>.

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

Контакты: Жерновой Александр Иванович,  
azhspp@rambler.ru

Материал поступил в редакцию: 24.01.2017

(Debatable short message)

## OBSERVATION OF THE IMPACT OF THE SURFACE MAGNETIC CHARGES ON THE MAGNETIC INDUCTION INSIDE AND OUTSIDE A SIMPLE OF THE MAGNETIC FLUID, PLASSED IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

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

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

An NMR method was used to measure the magnetic induction  $B_1$  inside and both  $B_2$  and  $B_3$  outside a simple of magnetic fluid, placed in an external magnetic field with induction  $B_0$ . The measurements showed that there was a magnetic induction inside the simple:  $B_1 = B_0 + (\lambda - K)\mu_0 M$ , where  $M$  — magnetization,  $\lambda$  — the constant of effective field,  $K$  — demagnetization factor, outside the simple near the surface of normal  $B_0$ :  $B_2 = B_0 + (\lambda + K)\mu_0 M$ , near the surface of parallel  $B_0$ :  $B_3 = B_0 - K\mu_0 M$ . Thus, when the surface of magnetic passes the normal  $B_0$  inside the simple, induction reduces on  $2K\mu_0 M$ , and while passing outside, the induction increases on  $2K\mu_0 M$ , this discrepancy to the Gauss theorem may be explained by the presence of the surface magnetic charges. The induction decreases on  $\lambda\mu_0 M$  at the exit through the side surface of the simple, and it increases on  $\lambda\mu_0 M$  at the entrance of it. It may be explained by the effect of the nanoparticles magnetic flow orientation.

*Keywords:* paramagnetic, magnetization, demagnetization factor, the surface magnetic charges, a leap of magnetic induction, Gauss theorem

### REFERENCES

1. Zhernovoi A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Measurement of magnetization and effective field constant of magnetic liquid by NMR method]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2008, vol. 18, no. 2, pp. 33–38. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2008/abst2.php#abst5>. (In Russ.).
2. Zhernovoi A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Paramagnetic nanoglobules dispersion curve definition via magnetization and magnetizable field using NMR method]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2009, vol. 19, no. 3, pp. 57–61. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2009/abst3.php#abst8>. (In Russ.).
3. Arnol'd R.R. *Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s po-stoyannymi magnitami* [Calculation and design of magnetic systems with permanent magnets]. Moscow, Energy Publ., 1969. 184 p. (In Russ.).
4. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diachenko S.V. [The discreteness of magnetic moments of single-domain ferromagnetic nanoparticles]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 1, pp. 72–76. Doi: 10.18358/np-27-1-i7276. (In Russ.).

Article received in edition: 24.01.2017

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