

УДК 537.622.3:543.422.3-74

© А. И. Жерновой, Ю. В. Улашкевич, С. В. Дьяченко

ДИСКРЕТНОСТЬ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ОДНОДОМЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Линейчатый характер ИК-спектров поглощения магнитной жидкости в магнитном поле показал, что значения магнитных моментов P однодоменных ферромагнитных наночастиц дискретны. По расстояниям между линиями спектров, полученных при магнитных индукциях 0.08 и 0.03 Тл, определены шаги дискретности магнитных моментов $\Delta P = 0.66 \cdot 10^{-19}$ и $0.97 \cdot 10^{-19}$ А м². Сделано предположение, что дискретность P вызвана квантованием создаваемого наночастицей магнитного потока Φ . Если принять, что у наночастицы связь P и Φ , как у соленоида $\Phi = P\mu_0 / L$, где L — длина обмотки, то эффективная длина кванта магнитного потока ($L_f = \Delta P \mu_0 / f$) $\approx a_0$, где $f = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб — квант магнитного потока, $a_0 \approx 0.5 \cdot 10^{-10}$ м — радиус первой орбиты Бора. С уменьшением индукции поля L_f увеличивается.

Кл. сл.: однодоменные ферромагнитные наночастицы, магнитный момент, магнитный поток, квант магнитного потока

ВВЕДЕНИЕ

В процессе получения ферромагнитных наночастиц методом химической конденсации размер наночастицы постепенно возрастает, а магнитный момент P у наночастицы появляется скачком, когда ее размер достигает нескольких нанометров и она становится доменом. Так как магнитный момент не квантуется, его скачкообразное изменение можно объяснить квантованием какой-то другой связанной с ним магнитной величины. Единственной магнитной величиной, квантование которой наблюдается на опыте, является магнитный поток Φ , имеющий квант $f = (\hbar / 2e) = 2.065 \times 10^{-15}$ Тл. Найдем связь между P и Φ .

СВЯЗЬ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ ФЕРРОМАГНИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ И СОЗДАВАЕМЫМ ЕЮ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Связь между магнитным потоком и магнитным моментом найдем на примере соленоида с цилиндрической обмоткой длиной L , площадью сечения S и числом витков N , по которой протекает ток I . Магнитный момент такого соленоида $P = I N S$, а магнитный поток $\Phi = I N S \mu_0 / L$. При этом

$$P = (\Phi L / \mu_0). \quad (1)$$

Таким образом, если наночастицу представить в виде цилиндра с постоянной эффективной длиной L , то квантование создаваемого ею магнитного потока должно приводить к дискретности ее магнитного момента. Естественно предположить,

что наночастица с минимальным наблюдающимся на опыте магнитным моментом, равным шагу дискретности магнитного момента ΔP , создает минимальный магнитный поток $\Phi_{\min} = f$. Исходя из этого, зная ΔP , можно оценить эффективную длину кванта магнитного потока:

$$L_f = (\Delta P \mu_0 / f). \quad (2)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШАГА ДИСКРЕТНОСТИ ΔP МАГНИТНОГО МОМЕНТА ОДНОДОМЕННЫХ НАНОЧАСТИЦ ПО ИК-СПЕКТРУ ПОГЛОЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

На рис. 1 приведены полученные на спектрометре Perkin Elmer, имеющем диапазон волновых чисел от 10^3 см⁻¹ до $5 \cdot 10^3$ см⁻¹, ИК-спектры поглощения коллоидного раствора наночастиц магнетита в керосине (магнитной жидкости), помещенного в магнитное поле с индукциями $B = 0$ (кривая 1), $B = 0.075$ Тл (кривая 2) и $B = 0.085$ Тл (кривая 3). На кривой 2 видны две линии поглощения (обозначим их "а" и "b") при резонансных волновых числах $k_a = 1550$ см⁻¹, $k_b = 2050$ см⁻¹, на кривой 3 видны две линии поглощения (обозначим их "а*" и "b*") при резонансных волновых числах $k_{a^*} = 1650$ см⁻¹, $k_{b^*} = 2250$ см⁻¹. Эти же спектры приведены в предыдущей нашей работе [1], где поглощение ИК-излучения магнитной жидкостью объяснено эффектом магнитного резонанса наночастиц, а присутствие двух линий объяснено вызванным межчастичным взаимодействием сдвигом локального магнитного поля внутри конгломератов наночастиц. В настоящей

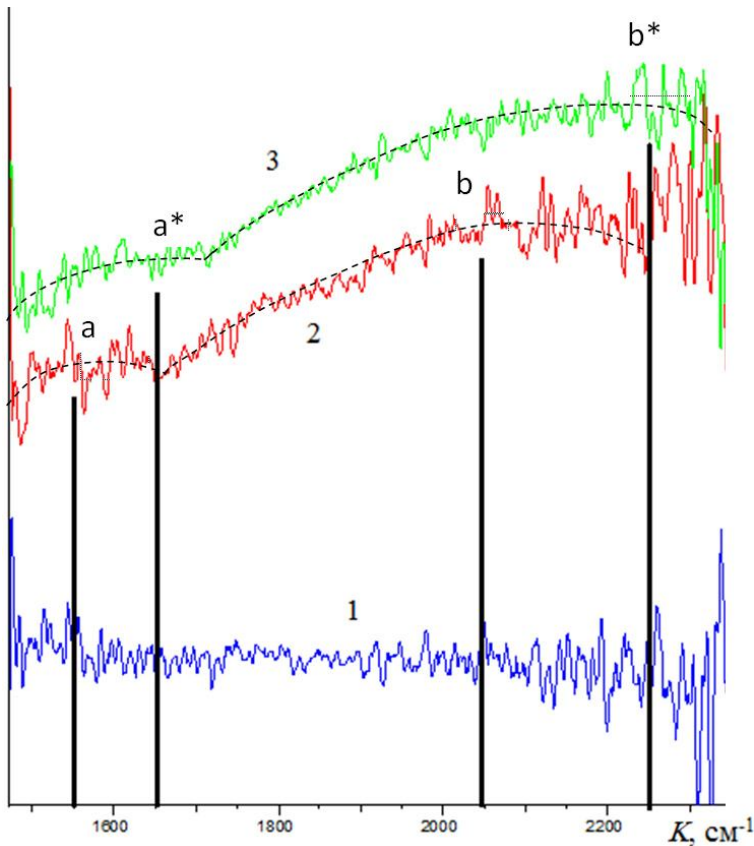


Рис. 1. ИК-спектр поглощения магнитной жидкости во внешнем магнитном поле с индукцией B .

Кривая 1 — при $B = 0$ Тл, кривая 2 — при $B = 0.075$ Тл, кривая 3 — при $B = 0.085$ Тл

работе появление двух линий объясняется иначе. Предлагается гипотеза о дискретности магнитных моментов наночастиц, согласно которой в ИК-спектре поглощения магнитной жидкости присутствуют отдельные линии резонансного поглощения, создаваемые наночастицами, содержащими одинаковые количества (1, 2, 3 и т. д.) квантов магнитного потока и поэтому имеющих одинаковые дискретные магнитные моменты. Отношения указанных вертикальными линиями резонансных волновых чисел пиков "b" и "a" на кривой 2 (k_b / k_a) = (2050 / 1550) = 1.32 и пиков "b*" и "a*" на кривой 3 (k_{b^*} / k_{a^*}) = (2250 / 1650) = 1.36. Эти отношения близки к числу $1.33 = (4/3)$, поэтому можно предположить, что пики "a" и "a*" получены от наночастиц, содержащих 3, а пики "b" и "b*" от наночастиц, содержащих 4 кванта магнитного потока, т. е. $k_a = k_3 = 1550 \text{ см}^{-1}$, $k_b = k_4 = 2050 \text{ см}^{-1}$, $k_{a^*} = k_{3^*} = 1650 \text{ см}^{-1}$, $k_{b^*} = k_{4^*} = 2250 \text{ см}^{-1}$. Исходя из этого можно найти выходящие за пределы диапазона ИК-спектрометра Perkin Elmer резонансные волновые числа первого и второго пиков, полученных от наночастиц, содержащих 1 и 2 кванта магнитного потока, на кривой 2 (k_1, k_2) и на кривой 3 (k_{1^*}, k_{2^*}): $k_1 = (k_3 / 3) = (1550 / 3) = 517$, или

$k_1 = (k_4 / 4) = (2050 / 4) = 513$ (в среднем $k_1 = 515 \text{ см}^{-1}$), $k_2 = 2k_1 = 1030 \text{ см}^{-1}$, $k_{1^*} = (k_{3^*} / 3) = (1650 / 3) = 550$, или $k_{1^*} = (k_{4^*} / 4) = (2250 / 4) = 562$ (в среднем $k_{1^*} = 556 \text{ см}^{-1}$), $k_{2^*} = 2k_{1^*} = 1112 \text{ см}^{-1}$. По волновым числам k_1, k_{1^*} найдем минимальные магнитные моменты:

$$P_1 = (h c k_1 / 2B) = (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 5.15 \cdot 10^4 / 2 \times 0.075) = 6.8 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

и

$$P_{1^*} = (h c k_{1^*} / 2B) = (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 10^8 \cdot 5.56 \cdot 10^4 / 2 \times 0.085) = 6.47 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Полученное среднее значение минимального магнитного момента $P_1 = 6.6 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ можно принять за шаг дискретности магнитного момента наночастицы ΔP . Подставив $\Delta P = 6.6 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ в выражение (2), находим эффективную длину кванта магнитного потока

$$L_f = (\Delta P \mu_0 / f) = (6.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} / 2 \cdot 10^{15}) \approx 0.4 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

близкую к радиусу первой орбиты электрона в атоме водорода.

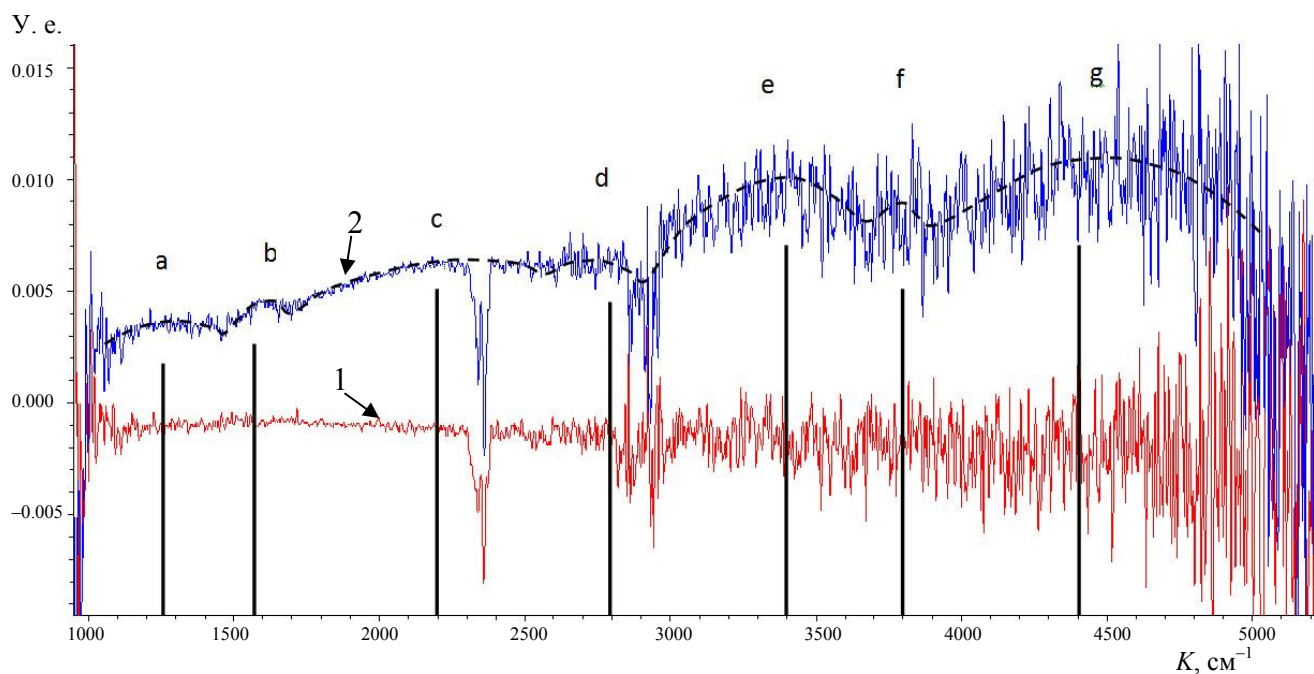


Рис. 2. ИК-спектр поглощения магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией B .
Кривая 1 — при $B = 0$, кривая 2 — при $B = 0.03$ Тл

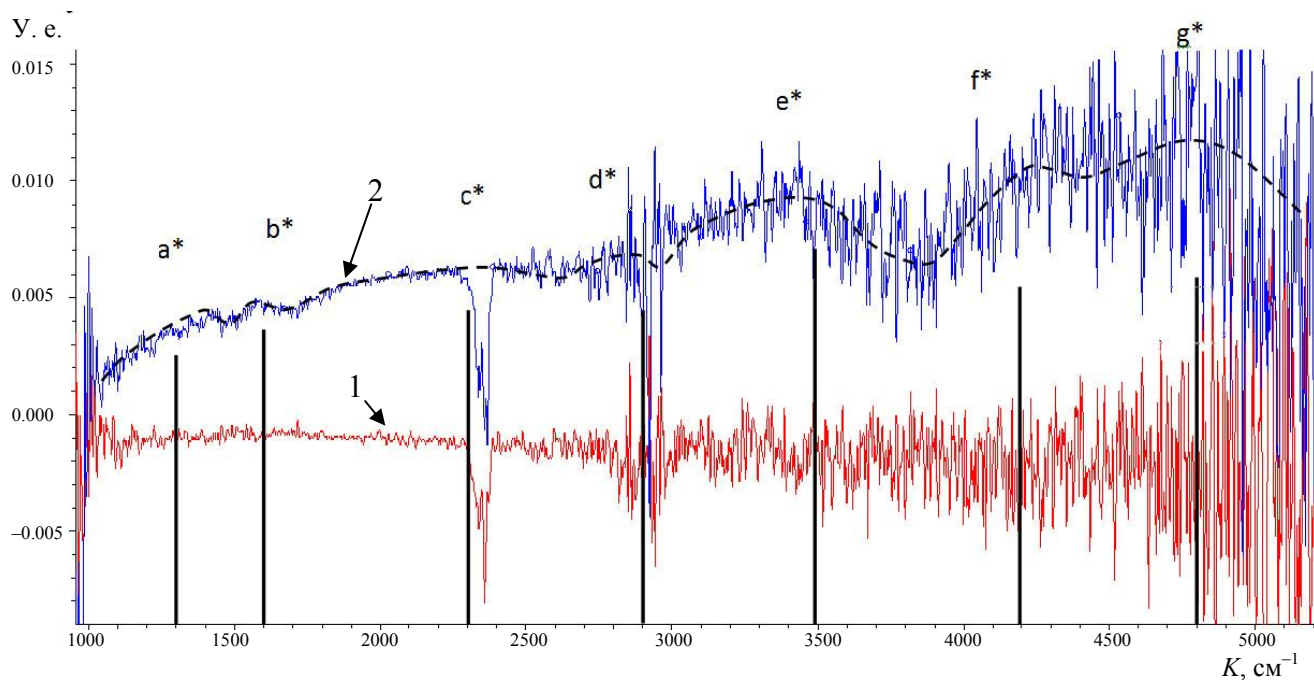


Рис. 3. ИК-спектр поглощения магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией B .
Кривая 1 — при $B = 0$, кривая 2 — при $B = 0.035$ Тл

На рис. 2 и 3 приведены ИК-спектры поглощения той же магнитной жидкости в магнитных полях с индукциями $B = 0.03$ Тл (рис. 2) и $B = 0.035$ Тл (рис. 3). На этих спектрах видны линии поглощения, обозначенные латинскими бук-

вами a, b, c, d, e, f, g. Резонансные волновые числа этих линий: на рис. 2: $k_a = 1250$ см⁻¹, $k_b = 1570$ см⁻¹, $k_c = 2200$ см⁻¹, $k_d = 2800$ см⁻¹, $k_e = 3400$ см⁻¹, $k_f = 3800$ см⁻¹, $k_g = 4400$ см⁻¹; на рис. 3: $k_{a^*} = 1300$ см⁻¹, $k_{b^*} = 1600$ см⁻¹, $k_{c^*} = 2300$ см⁻¹, $k_{d^*} =$

$$= 2900 \text{ см}^{-1}, k_{e^*} = 3500 \text{ см}^{-1}, k_{f^*} = 4200 \text{ см}^{-1}, k_{g^*} = 4800 \text{ см}^{-1}.$$

Найдем отношения резонансных волновых чисел. На рис. 2 $(k_b / k_a) = (1570 / 1250) = 1.256$, на рис. 3 $(k_{b^*} / k_{a^*}) = (1600 / 1300) = 1.23$. Эти отношения близки к $1.25 = (5 / 4)$, следовательно, пики поглощения а, а* — четвертые, b, b* — пятые. Значит, $k_a = k_4 = 1250 \text{ см}^{-1}$, $k_b = k_5 = 1570 \text{ см}^{-1}$, $k_{a^*} = k_{4^*} = 1300 \text{ см}^{-1}$, $k_{b^*} = k_{5^*} = 1600 \text{ см}^{-1}$. По найденным волновым числам можем найти $k_1 = (k_4 / 4) = (1250 / 4) = 312.5 \text{ см}^{-1}$, или $k_1 = (k_5 / 5) = (1570 / 5) = 314 \text{ см}^{-1}$ (в среднем $k_1 = 313 \text{ см}^{-1}$) и $k_{1^*} = (k_{4^*} / 4) = (1300 / 4) = 325 \text{ см}^{-1}$, или $k_{1^*} = (k_{5^*} / 5) = (1600 / 5) = 320 \text{ см}^{-1}$ (в среднем $k_{1^*} = 322.5 \text{ см}^{-1}$). Зная k_1 и k_{1^*} , находим минимальный магнитный момент наночастицы в слабом магнитном поле:

$$P_1 = (h c k_1 / 2B) = (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3.13 \cdot 10^4 / 2 \times 3 \cdot 10^{-2}) = 10.3 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2,$$

или

$$P_1 = (h c k_{1^*} / 2B) = (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3.22 \cdot 10^4 / 2 \times 3.5 \cdot 10^{-2}) = 9.1 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

В среднем $P_1 = 9.7 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Полученное среднее значение минимального магнитного момента P_1 можно принять за шаг дискретности в магнитном поле с индукцией $B \approx 30 \text{ мТл}$: $\Delta P = 9.7 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Это в 1.5 раза больше, чем было получено в более сильном поле. Следовательно, шаг дискретности магнитного момента с уменьшением индукции магнитного поля возрастает. Это позволяет объяснить результаты измерений магнитных моментов наночастиц по кривой намагничивания Ланжевена, согласно которым средний магнитный момент, измеренный в начале кривой (в слабом поле), всегда больше, чем измеренный в конце кривой (в сильном поле) [2, 3]. Подставив ΔP в выражение (2), находим длину кванта магнитного потока в поле с индукцией 30 мТл: $L_f = (\Delta P \mu_0 / f) = (9.7 \cdot 10^{-20} \cdot 4\pi \times 10^{-7} / 2 \cdot 10^{15}) \approx 0.6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, что в 1.5 раза больше, чем в поле с индукцией 80 мТл, т. е. протяженность кванта магнитного потока возрастает с уменьшением индукции магнитного поля.

Проверим, какие номера n соответствуют пикам а, b, c, d, e, f, g на рис. 2 и 3.

Рис. 2:

$$\begin{aligned} \text{пик а} &— n = (k_a / k_1) = (1250 / 313) \approx 4, \\ \text{пик b} &— n = (k_b / k_1) = (1570 / 313) \approx 5, \\ \text{пик c} &— n = (k_c / k_1) = (2200 / 313) \approx 7, \\ \text{пик d} &— n = (k_d / k_1) = (2800 / 313) \approx 9, \\ \text{пик e} &— n = (k_e / k_1) = (3400 / 313) \approx 11, \\ \text{пик f} &— n = (k_f / k_1) = (3800 / 313) \approx 12, \\ \text{пик g} &— n = (k_g / k_1) = (4400 / 313) \approx 14. \end{aligned}$$

Рис. 3:

$$\begin{aligned} \text{пик а}^* &— n = (k_{a^*} / k_{1^*}) = (1300 / 322.5) \approx 4, \\ \text{пик b}^* &— n = (k_{b^*} / k_{1^*}) = (1600 / 322.5) \approx 5, \\ \text{пик c}^* &— n = (k_{c^*} / k_{1^*}) = (2300 / 322.5) \approx 7, \\ \text{пик d}^* &— n = (k_{d^*} / k_{1^*}) = (2900 / 322.5) \approx 9, \\ \text{пик e}^* &— n = (k_{e^*} / k_{1^*}) = (3500 / 322.5) \approx 11, \\ \text{пик f}^* &— n = (k_{f^*} / k_{1^*}) = (4200 / 322.5) \approx 13, \\ \text{пик g}^* &— n = (k_{g^*} / k_{1^*}) = (4800 / 322.5) \approx 15. \end{aligned}$$

Таким образом, в поле с индукцией 30 мТл дискретность магнитных моментов однодоменных наночастиц тоже наблюдается, но с большим шагом дискретности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИК-спектрах поглощения магнитных жидкостей, помещенных в магнитное поле, наблюдается несколько дискретных линий с кратными значениями резонансных волновых чисел, что может быть объяснено дискретностью магнитных моментов однодоменных ферромагнитных наночастиц. Дискретность магнитных моментов можно объяснить квантованием магнитного потока внутри наночастиц. Шаг дискретности магнитного момента в магнитном поле с индукцией 80 мТл $\Delta P = 6.6 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$, а в магнитном поле с индукцией 30 мТл $\Delta P = 9.7 \cdot 10^{-20} \text{ А} \cdot \text{м}^2$, т. е. шаг дискретности магнитного момента возрастает с уменьшением индукции магнитного поля. Это согласуется с тем, что при измерении магнитного момента наночастиц магнитной жидкости по кривой намагничивания Ланжевена в слабом магнитном поле (в начале кривой намагничивания) значение магнитного момента получается больше, чем в сильном магнитном поле (в конце кривой намагничивания) [2, 3]. В предположении, что дискретное увеличение на один шаг магнитного момента однодоменной наночастицы вызвано увеличением на один квант создаваемого ею магнитного потока, определены эффективные протяженности кванта магнитного потока: при $B \approx 80 \text{ мТл}$ $L_f \approx 0.4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, при $B \approx 30 \text{ мТл}$ $L_f = 0.6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Таким образом, получается, что эффективная протяженность кванта магнитного потока L_f растет с уменьшением индукции внешнего магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Исследование инфракрасного спектра поглощения магнитной жидкости в магнитном поле // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 2. С. 60–63. URL: <http://213.170.69.26/mag/2016/full2/Art8.pdf>.

2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
3. Емельянов С.Г., Карпова Г.В., Пауков В.М., Полунин В.М., Ряполов П.А. Об оценке физических параметров магнитных наночастиц // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 3. С. 316–322.

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию: 21.11.2016

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

THE DISCRETENESS OF MAGNETIC MOMENTS OF SINGLE-DOMAIN FERROMAGNETIC NANOPARTICLES

A. I. Zhernovoy, Yu. V. Ulashkevich, S. V. Diachenko

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

The linear character of IR spectra of magnetic liquid in a magnetic field showed that magnetic moment P values of single-domain ferromagnetic nanoparticles are discrete. Using the distance between lines of spectra, that have been got under magnetic induction values of 0.08 and 0.03 T, magnetic moment's discrete steps were determined. Their values are: $\Delta P = 0.66 \cdot 10^{-19}$ and $0.97 \cdot 10^{-19}$ A·m². It was suggested, that discreteness P has been caused by quantification of nanoparticle from magnetic flow Φ . Supposing that nanoparticle's link between P and Φ is similar to solenoid's: $\Phi = (P \mu_0 / L)$, where L — solenoid's length, the effective length of magnetic flow's quant is: $L_f = (\Delta P \mu_0 / f) \approx a_0$, where $f = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb — quant of magnetic flow, $a_0 \approx 0.5 \cdot 10^{-10}$ m — Bohr radius. The less the induction of field is, the more quant's length is.

Keywords: single-domain ferromagnetic nanoparticles, magnetic moment, magnetic flow, the quantum of magnetic flow

REFERENCES

1. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diachenko S.V. [Magnetic fluid in magnetic field infrared absorption spectra investigation]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 2, pp. 60–63. Doi: 10.18358/np-26-2-i6063. (In Russ.).
2. Berkovskiy B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic liquids]. Moscow, Chimiya Publ., 1989, 240 p. (In Russ.).
3. Emelyanov S.G., Karpova G.V., Paukov V.M., Polunin V.M., Ryapolov P.A. [Estimation of physical parameters of magnetic nanoparticles]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical Physics], 2010, vol. 56, no. 3, pp. 283–289. Doi: 10.1134/S1063771010030048.

Contacts: Zhernovoy Aleksandr Ivanovich,
azhspb@rambler.ru

Article received in edition: 21.11.2016