

УДК 537.622.3-022.532:543.422.3-74

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

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПО ПОЛОЖЕНИЮ ЛИНИЙ ИК-СПЕКТРА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При исследовании зависимости ИК-спектра коллоидного раствора наночастиц магнетита в керосине (магнитной жидкости) от индукции внешнего магнитного поля было обнаружено, что в спектре, содержащем колебательно-вращательные серии, положения колебательных линий от индукции магнитного поля не зависят, а вращательные линии сдвигаются. По положениям линий спектра, соответствующих квантовым числам момента импульса $J = 1, 2, 3$, определены три дискретных значения магнитных моментов однодоменных наночастиц магнетита в единицах 10^{-19} Ам²: 1.0, 3.2, 8.7. Магнитные моменты наночастиц, измеряемые электромагнитными методами, являются средними взвешенными значениями от дискретных значений магнитных моментов наночастиц.

Кл. сл.: магнитная жидкость, однодоменные наночастицы магнетита, ИК-спектр, дискретные магнитные моменты

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих наших работах наблюдался линейчатый ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле [1]. На основании этого была высказана гипотеза о дискретности магнитных моментов однодоменных ферромагнитных наночастиц [2]. Было замечено, что по расположению пиков поглощения спектр похож на колебательно-вращательный спектр молекул [3], и исследована зависимость положений линий от индукции внешнего магнитного поля [4]. Получено, что положения максимумов колебательных линий, определяемые резонансными колебательными волновыми числами $K_{n,0}$ (n — колебательное квантовое число), от индукции внешнего магнитного поля не зависят, а положения максимумов вращательных линий, определяемые резонансными вращательными волновыми числами $K_{n,+J}$ или $K_{n,-J}$ ($+J$ и $-J$ — магнитные квантовые числа), при изменении индукции внешнего поля линейно меняются. В настоящей работе зависимость $K_{n,+J}$ и $K_{n,-J}$ от магнитной индукции объясняется тем, что вращательному моменту импульса наночастицы L_J , определяемому вращательным квантовым числом J , сопутствует магнитный момент P_J , имеющий зеемановскую энергию, равную его скалярному произведению на индукцию внешнего магнитного поля со знаком минус. Под действием ИК-излучения с резонансной частотой меняется ориентация магнитных моментов наночастиц в магнитном поле. Это вызывает изменение зеемановской энергии магнитных моментов наночастиц, приводящее к уменьшению или увеличению ин-

тенсивности излучения с резонансной частотой, что вызывает появление в спектре ИК-излучения пиков при резонансных волновых числах $K_{n,+J}$, $K_{n,-J}$. По значениям резонансных волновых чисел в ИК-спектре магнитной жидкости, полученном во внешнем магнитном поле с известной индукцией B , можно определять магнитные моменты наночастиц.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НАНОЧАСТИЦ ПО ЗНАЧЕНИЯМ РЕЗОНАНСНЫХ ВОЛНОВЫХ ЧИСЕЛ $K_{n,0}$, $K_{n,+J}$ И $K_{n,-J}$ В ИК-СПЕКТРАХ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Предпосылки метода

На рис. 1–3 приведены ИК-спектры магнитной жидкости, полученные при трех индукциях внешнего магнитного поля. Значения индукций полей магнитов, в которых находилась магнитная жидкость при получении этих спектров:

$$B_1 = 255 \cdot 10^{-4}, \quad B_2 = 597 \cdot 10^{-4}, \quad B_3 = 663 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Эти значения, необходимые для расчета магнитных моментов наночастиц, были измерены с высокой точностью методом ядерного магнитного резонанса.* На этих рисунках вертикальными линиями обозначены положения максимумов пиков

* Эти же спектры приведены в предыдущей нашей работе [4] для иллюстрации зависимости ИК-спектра магнитной жидкости от индукции B . При этом значения B указаны в округленном виде в Гауссах (вместо Гс по ошибке написано мТл).

поглощения, соответствующих резонансным волновым числам $K_{n,0}$, $K_{n,+j}$, $K_{n,-j}$, по которым можно определять магнитные моменты наночастиц. Нижние индексы в обозначениях волновых чисел в поле рисунков для лучшего зрительного восприятия представлены в квадратных скобках, т. е., например, $K_{n,0}$ представлено как $K[n,0]$.

Вариант 1. Определение P_j по резонансным волновым числам $K_{n,+j}$ и $K_{n,-j}$

Фотон ИК-излучения с резонансным волновым числом $K_{n,+j}$ вызывает переход наночастицы с колебательно-вращательного уровня, имеющего колебательное квантовое число $n = 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число $-J$ (при этом спин электронов наночастицы направлен против, а магнитный момент наночастицы направлен по индукции \mathbf{B}), на колебательно-вращательный уровень, имеющий колебательное квантовое число $n > 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число $+J$ (при этом спин электронов наночастицы направлен по, а магнитный момент наночастицы направлен против индукции \mathbf{B}). В результате перехода усиливается колебательное движение магнитного момента наночастицы в поле сил межчастичных взаимодействий (на это затрачивается энергия фотона, равная $hc(K_{n,0} - K_{0,0})$) и происходит поворот магнит-

ного момента наночастицы на 180° в направлении против индукции магнитного поля (при этом магнитная энергия наночастицы в магнитном поле увеличивается, а энергия фотона уменьшается на $2P_jB$). Следовательно, энергия фотона с волновым числом $K_{n,+j}$ равна $E_1 = hcK_{n,+j} = hc(K_{n,0} - K_{0,0} + 2P_jB)$. ИК-излучение с резонансным волновым числом $K_{n,-j}$ вызывает переход наночастицы с колебательно-вращательного уровня, имеющего колебательное квантовое число $n = 0$, вращательное квантовое число, равное J , и магнитное квантовое число, равное $+J$ (при этом спин электронов наночастицы направлен по, а магнитный момент наночастицы направлен против направления индукции \mathbf{B}), на колебательно-вращательный уровень, имеющий колебательное квантовое число $n > 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число $-J$ (при этом спин электронов наночастицы направлен против, а магнитный момент наночастицы по направлению индукции \mathbf{B}). В результате перехода усиливаются колебания магнитного момента наночастицы и он поворачивается на 180° по направлению индукции \mathbf{B} (его магнитная энергия уменьшается). Следовательно, энергия фотона с волновым числом $K_{n,-j}$ равна $E_2 = hcK_{n,-j} = hc(K_{n,0} - K_{0,0} - 2P_jB)$. Разница энергий $E_1 - E_2 = hc(K_{n,+j} - K_{n,-j}) = 4P_jB$, откуда

$$P_j = h \cdot c \cdot (K_{n,+j} - K_{n,-j}) / (4B). \quad (1)$$

Интенсивность, у.е.

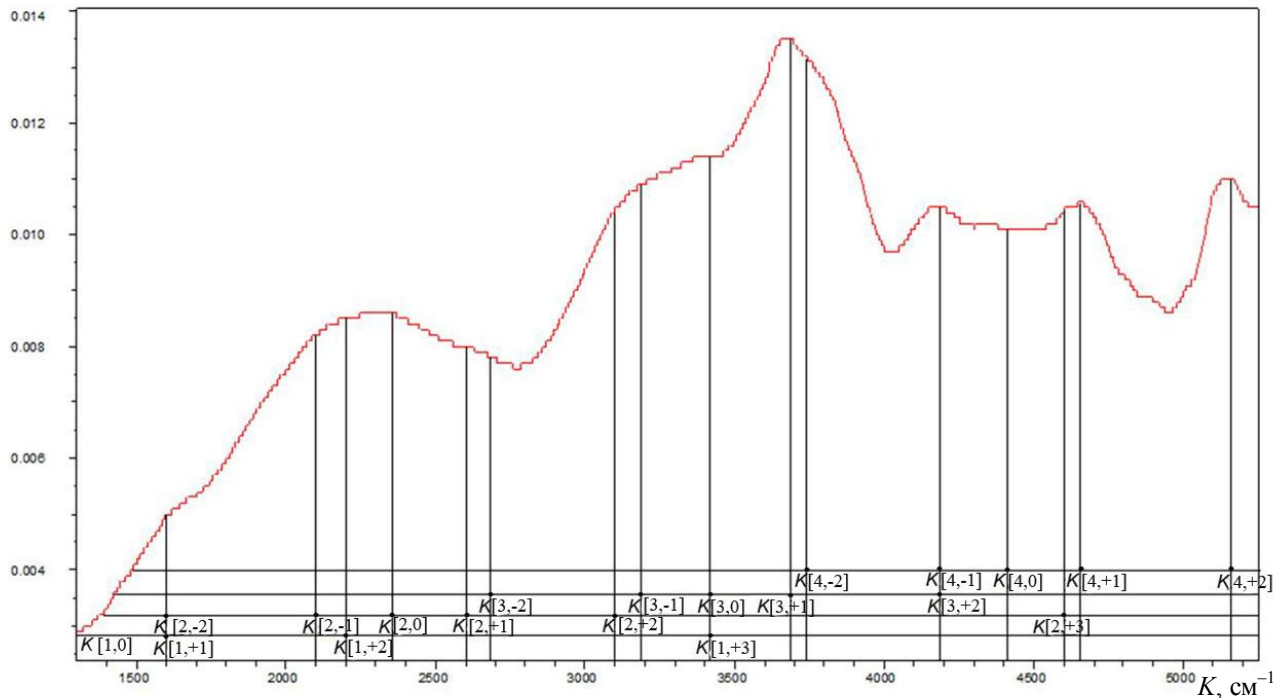


Рис. 1. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_1 = 255 \cdot 10^{-4}$ Тл

Рассмотрим спектр, представленный на рис. 1 ($B = B_1 = 255 \cdot 10^{-4}$ Тл). В этом спектре видны симметрично расположенные вращательные линии колебательно-вращательных серий с $n = 3$ и $n = 4$. Рассмотрим колебательно-вращательную серию с $n = 3$. На нижнем вращательном уровне с резонансным волновым числом ${}^1K_{3,-1} = 3180 \text{ см}^{-1}$ (верхний индекс указывает номер рисунка) магнитный момент \mathbf{P}_1 ориентирован под острым углом к индукции магнитного поля \mathbf{B} , а на верхнем вращательном уровне с резонансным волновым числом ${}^1K_{3,+1} = 3680 \text{ см}^{-1}$ магнитный момент \mathbf{P}_1 ориентирован под тупым углом к индукции магнитного поля \mathbf{B} . Поэтому фотоны с большим волновым числом (${}^1K_{3,+1}$) отклоняют направления магнитных моментов от направления индукции поля, при этом их энергия поглощается, а фотоны с меньшим волновым числом (${}^1K_{3,-1}$) приближают ориентацию магнитных моментов к направлению индукции поля, при этом их энергия возрастает. Можно сделать вывод, что после прохождения через магнитную жидкость различие энергий фотонов с волновыми числами ${}^1K_{3,+1}$ и ${}^1K_{3,-1}$ равно удвоенному различию энергий магнитного момента \mathbf{P}_1 , ориентированного по полю и против поля. Таким образом, по формуле (1) можно рассчитать магнитный момент наночастиц P_1 при $n = 3$:

$$P_{1,3} = hc \cdot ({}^1K_{3,+1} - {}^1K_{3,-1}) / (4B_1) = (6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (3680 - 3180) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0255)) = 6.6 \cdot 3 \cdot 500 \times 10^{-34+8+2} / (4 \cdot 0.0255) = 0.97 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

Аналогично при $n = 3$ можно рассчитать P_2 по волновым числам ${}^1K_{3,+2} = 4180 \text{ см}^{-1}$ и ${}^1K_{3,-2} = 2670 \text{ см}^{-1}$:

$$P_{2,3} = hc \cdot ({}^1K_{3,+2} - {}^1K_{3,-2}) \cdot 10^2 / (4B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8 \cdot (4180 - 2670) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0255) = 6.6 \cdot 10^{-34} \times 10^8 \cdot 1510 \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0255) = 2.93 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

На рис. 2 ($B = B_2 = 597 \cdot 10^{-4}$ Тл) видны вращательные линии с ${}^2K_{3,+1} = 4030 \text{ см}^{-1}$ и ${}^2K_{3,-1} = 2830 \text{ см}^{-1}$. По этим линиям можно при $n = 3$ определить

$$P_{1,3} = hc \cdot ({}^2K_{3,+1} - {}^2K_{3,-1}) / (4B_2) = 6.6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8 \cdot (4030 - 2830) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0597) = 19.8 \times 1200 \cdot 10^{-34+8+2} / (4 \cdot 0.0597) = 0.995 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

Видны также линии с ${}^2K_{2,+1} = 3020 \text{ см}^{-1}$ и ${}^2K_{2,-1} = 1730 \text{ см}^{-1}$. По этим линиям можно при $n = 2$ определить

$$P_{1,2} = hc \cdot ({}^2K_{2,+1} - {}^2K_{2,-1}) / (4B_2) = 6.6 \times 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot (3020 - 1730) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0597) = 6.6 \cdot 3 \cdot 1290 \cdot 10^{-34+8+2} / (4 \cdot 0.0597) = 1.07 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

Интенсивность, у.е.

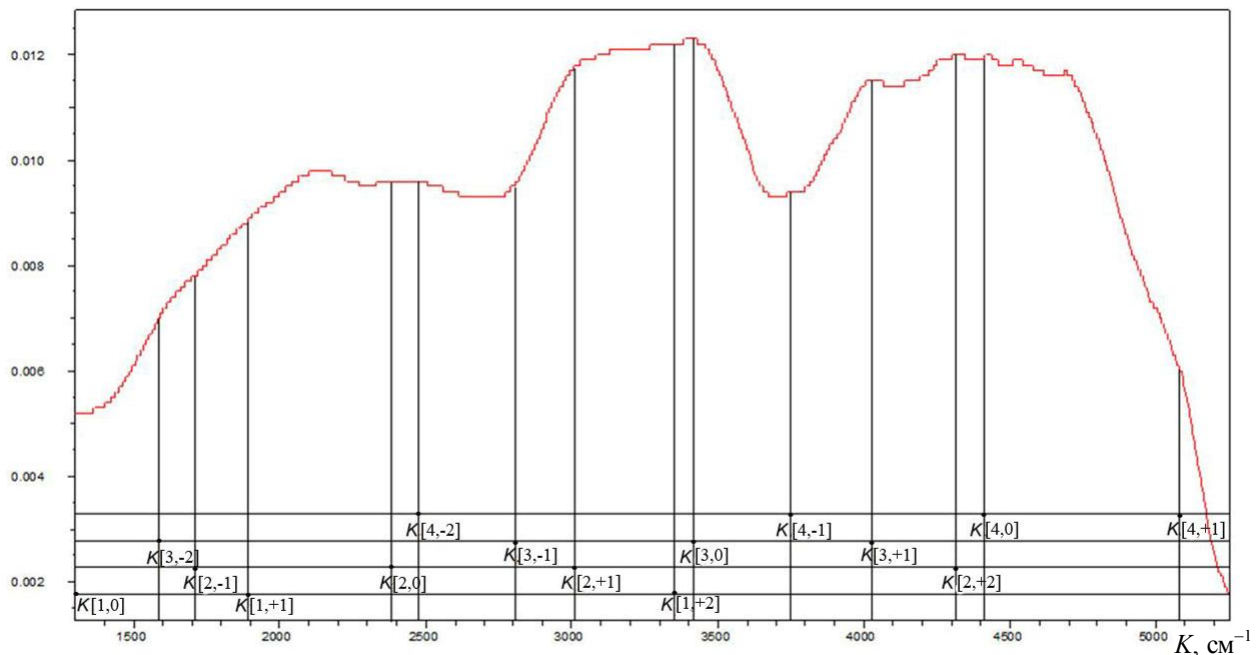


Рис. 2. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_2 = 597 \cdot 10^{-4}$ Тл

Интенсивность, у.е.

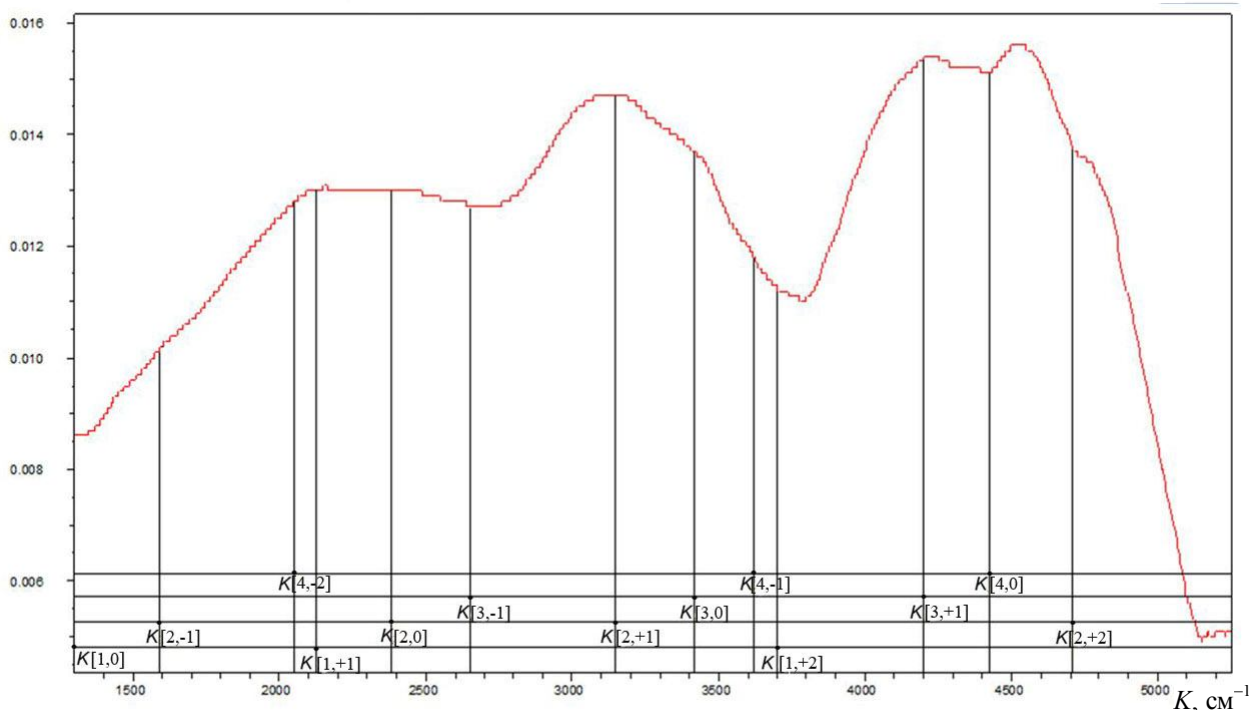


Рис. 3. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_3 = 663 \cdot 10^{-4}$ Тл

На рис. 3 ($B = B_3 = 663 \cdot 10^{-4}$ Тл) видны вращательные линии с ${}^3K_{2,+1} = 3150 \text{ см}^{-1}$ и ${}^3K_{2,-1} = 1580 \text{ см}^{-1}$. По этим линиям можно при $n = 2$ определить

$$P_{1,2} = hc \cdot ({}^3K_{2,+1} - {}^3K_{2,-1}) / (4B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (3150 - 1580) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \times 1570 \cdot 10^{-34+8+2} / (4 \cdot 0.0663) = 1.17 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

Видны также линии с волновыми числами ${}^3K_{3,+1} = 4200 \text{ см}^{-1}$ и ${}^3K_{3,-1} = 2640 \text{ см}^{-1}$. По этим линиям можно при $n = 3$ определить

$$P_{1,3} = hc \cdot ({}^3K_{3,+1} - {}^3K_{3,-1}) / (4 \cdot B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (4200 - 2640) \cdot 10^2 / (4 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \times 1560 \cdot 10^{-34+8+2} / (4 \cdot 0.0663) = 1.16 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

Вариант 2. Определение P_J по резонансным волновым числам $K_{n,0}$, $K_{n,+J}$ или $K_{n,0}$, $K_{n,-J}$

Фотон ИК-излучения с резонансным волновым числом $K_{n,+J}$ вызывает переход наночастицы с колебательно-вращательного уровня, имеющего колебательное квантовое число $n = 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число равно $-J$ (магнитный момент направлен по \mathbf{B}), на колебательно-вращательный уровень, имеющий колебательное квантовое число $n > 0$, вращательное квантовое число J и магнитное

квантовое число, равное $+J$ (магнитный момент направлен против \mathbf{B}). В результате магнитный момент наночастицы \mathbf{P}_J начинает интенсивнее колебаться в поле сил межчастичного взаимодействия (на это затрачивается энергия излучения $hc \cdot (K_{n,0} - K_{0,0})$ и поворачивается в направлении против индукции \mathbf{B} (на это затрачивается энергия излучения $2P_J B$). Следовательно, энергия фотона с волновым числом $K_{n,+J}$ равна $E_1 = hc \cdot K_{n,+J} = hc \cdot (K_{n,0} - K_{0,0} + 2P_J B)$. Фотон ИК-излучения с волновым числом $K_{n,0}$ вызывает переход наночастицы с колебательного уровня, имеющего колебательное квантовое число $n = 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число, равное 0, на колебательный уровень, имеющий колебательное квантовое число $n > 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число, равное 0. При этом возникают колебания, на которые расходуется энергия фотона $E_2 = hc \cdot (K_{n,0} - K_{0,0})$. Разница энергий фотонов $E_2 - E_1 = 2P_J B$. Следовательно, магнитный момент наночастицы можно найти из выражения

$$P_J = hc \cdot (K_{n,+J} - K_{n,0}) / (2B). \quad (2)$$

Фотон ИК-излучения с резонансным волновым числом $K_{n,-J}$ вызывает переход наночастицы с колебательно-вращательного уровня, имеющего

колебательное квантовое число $n = 0$, вращательное квантовое число равно J и магнитное квантовое число равно $+J$ (при этом спин наночастицы направлен по \mathbf{B} , а магнитный момент наночастицы направлен против \mathbf{B}), на колебательно-вращательный уровень, имеющий колебательное квантовое число $n > 0$, вращательное квантовое число J и магнитное квантовое число, равное $-J$ (при этом спин наночастицы направлен против \mathbf{B} , а магнитный момент наночастицы направлен по \mathbf{B}). В результате воздействия ИК-излучения магнитный момент наночастицы \mathbf{P}_J начинает интенсивнее колебаться в поле сил межчастичного взаимодействия, поворачивается по направлению индукции \mathbf{B} , и его энергия в магнитном поле уменьшается на $2P_J B$. При этом поглощается энергия фотона $hc \cdot K_{n,-J} = hc \cdot (K_{n,0} - K_{0,0} - 2P_J B)$. Магнитный момент наночастицы можно найти из выражения

$$P_J = hc \cdot (K_{n,0} - K_{n,-J}) / (2B). \quad (3)$$

На рис. 1 ($B = B_1 = 255 \cdot 10^{-4}$ Тл) видны линии с волновыми числами ${}^1K_{2,0} = 2370$, ${}^1K_{2,-2} = 1600$, ${}^1K_{2,+3} = 4600$, ${}^1K_{3,0} = 3430$, ${}^1K_{3,+1} = 3680$, ${}^1K_{3,+2} = 4180$, ${}^1K_{4,0} = 4420$, ${}^1K_{4,+1} = 4680$ см $^{-1}$. По этим волновым числам по формулам (2, 3) можно при $n = 2$ найти

$$P_{2,2} = hc \cdot ({}^1K_{2,0} - {}^1K_{2,-2}) / (2B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (2370 - 1600) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0255) = 6.6 \cdot 3 \cdot 770 / (2 \times 0.0255) \cdot 10^{-34+8+2} = 2.99 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

при $n = 3$ найти

$$P_{1,3} = hc \cdot ({}^1K_{3,+1} - {}^1K_{3,0}) / (4B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (3680 - 3430) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0255) = 3 \cdot 6.6 \cdot 250 / (2 \times 0.0255) \cdot 10^{-34+8+2} = 0.97 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

при $n = 3$ найти

$$P_{2,3} = hc \cdot ({}^1K_{3,+2} - {}^1K_{3,0}) / (2B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (4180 - 3430) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0255) = 6.6 \cdot 3 \cdot 750 / (2 \times 0.0255) \cdot 10^{-34+8+2} = 2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

при $n = 4$ найти

$$P_{1,4} = hc \cdot ({}^1K_{4,+1} - {}^1K_{4,0}) / (2B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (4680 - 4420) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0255) = 6.6 \cdot 3 \cdot 260 / (2 \times 0.0255) \cdot 10^{-34+8+2} = 1.01 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

при $n = 2$ найти

$$P_{3,2} = hc \cdot ({}^1K_{2,+3} - {}^1K_{2,0}) / (2B_1) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (4600 - 2370) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0255) = 6.6 \cdot 3 \cdot 2230 \times 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0255) = 8.66 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

На рис. 2 ($B = B_2 = 597 \cdot 10^{-4}$ Тл) различаются линии с волновыми числами ${}^2K_{3,0} = 3430$, ${}^2K_{3,+1} = 4030$ см $^{-1}$. По этим волновым числам можно при $n = 3$ найти магнитный момент

$$P_{1,3} = hc \cdot ({}^2K_{3,+1} - {}^2K_{3,0}) / (2B_2) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (4030 - 3430) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0597) =$$

$$= 6.6 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0597) = 0.995 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

На рис. 3 ($B_3 = 663 \cdot 10^{-4}$ Тл) видны линии с резонансными волновыми числами ${}^3K_{4,0} = 4420$, ${}^3K_{4,-1} = 3630$, ${}^3K_{4,-2} = 2050$ см $^{-1}$. По этим значениям резонансных волновых чисел можно при $n = 4$ определить магнитные моменты:

$$P_{1,4} = hc \cdot ({}^3K_{4,0} - {}^3K_{4,-1}) / (2B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (4420 - 3630) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \cdot 790 / (2 \times 0.0663) \cdot 10^{-34+8+2} = 1.18 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$$

$$\text{и } P_{2,4} = hc \cdot ({}^3K_{4,0} - {}^3K_{4,-2}) / (2B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (4420 - 2050) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \cdot 2370 \times 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0663) = 3.54 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

По линиям с волновыми числами ${}^3K_{2,0} = 2370$ и ${}^3K_{2,+2} = 4700$ см $^{-1}$ можно при $n = 2$ определить магнитный момент

$$P_{2,2} = hc \cdot ({}^3K_{2,+2} - {}^3K_{2,0}) / (2B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \times (4700 - 2370) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \cdot 2330 \times 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0663) = 3.48 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

По линиям с волновыми числами ${}^3K_{2,0} = 2370$, ${}^3K_{2,+1} = 3150$, ${}^3K_{2,+2} = 4700$ см $^{-1}$ можно при $n = 2$ определить

$$P_{1,2} = hc \cdot ({}^3K_{2,+1} - {}^3K_{2,0}) / (2B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (3150 - 2370) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \cdot 780 \times 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0663) = 1.164 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$$

$$\text{и } P_{2,2} = hc \cdot ({}^3K_{2,+2} - {}^3K_{2,0}) / (2B_3) = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8 \cdot (4700 - 2370) \cdot 10^2 / (2 \cdot 0.0663) = 6.6 \cdot 3 \times 2330 \cdot 10^{-34+8+2} / (2 \cdot 0.0663) = 3.48 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2.$$

АНАЛИЗ ИЗМЕРЕННЫХ ПО ПОЛОЖЕНИЯМ ЛИНИЙ ИК-СПЕКТРА ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НАНОЧАСТИЦ

Зависимость значений магнитных моментов наночастиц от индукции магнитного поля

Обозначим магнитные моменты наночастиц P_J , измеренные по резонансным волновым числам $K_{n,+J}$ или $K_{n,-J}$ (при колебательном квантовом числе n и вращательном квантовом числе J), индексами $P_{J,n}$ и напомним их в единицах 10^{-19} Ам 2 в порядке возрастания B , J и n .

$$B = B_1 = 0.0255 \text{ Тл,}$$

$$J = 1: P_{1,3} = 0.97, P_{1,4} = 1.1, P_{1,3} = 0.97;$$

$$J = 2: P_{2,3} = 2.93, P_{2,2} = 2.99, P_{2,3} = 2.91;$$

$$J = 3: P_{3,2} = 8.66.$$

$$\text{Средние значения: } P_1 = 0.98, P_2 = 2.94, P_3 = 8.66.$$

$$B = B_2 = 0.0597 \text{ Тл,}$$

$$J = 1: P_{1,2} = 1.07, P_{1,3} = 0.995, P_{1,3} = 0.995.$$

$$\text{Среднее значение } P_1 = 1.02.$$

$$B = B_3 = 0.0663 \text{ Тл,}$$

$$J = 1: P_{1,2} = 1.17, P_{1,3} = 1.16, P_{1,4} = 1.18, P_{1,2} = 1.16;$$

$$J = 2: P_{2,4} = 3.54, P_{2,2} = 3.48.$$

Средние значения: $P_1 = 1.17$, $P_2 = 3.51$.

Из этих результатов видно, что измеренные значения магнитных моментов наночастиц P_j от колебательного квантового числа n практически не зависят, а с ростом индукции B в 1.11, 2.3 и 2.6 раза увеличиваются соответственно в 1.07, 1.12 и 1.2 раза. Независимость магнитных моментов наночастиц от колебательного квантового числа можно объяснить тем, что магнитные свойства связаны с вращательным движением зарядов, а не с их колебаниями. Зависимость значений магнитных моментов наночастиц от индукции магнитного поля можно объяснить тем, что причиной дискретности магнитных моментов является квантование моментов импульса наночастиц, а рост магнитных моментов наночастиц связан с увеличением гиромангнитных отношений доменов с ростом B .

Связь магнитных моментов и моментов импульса наночастиц

Как уже говорилось, обнаруженную зависимость магнитных моментов наночастиц от индукции внешнего магнитного поля можно объяснить тем, что их дискретность вызвана квантованием моментов импульса наночастиц. На опыте двум измеренным при $B = B_1$ дискретным значениям магнитного момента $P_1 = 0.98$ и $P_2 = 2.94$ и измеренным при $B = B_2$ дискретным значениям $P_1 = 1.17$ и $P_2 = 3.5$ соответствуют дискретные значения моментов импульса $L_j = h \cdot (J \cdot (J + 1))^{0.5}$, равные $L_1 = h \cdot (2)^{0.5} = 1.41 \cdot h$ и $L_2 = h \cdot (6)^{0.5} = 2.45 \cdot h$. Из этих значений следует, что $(P_2 / P_1) = (L_2 / L_1)^2$, т. е. магнитный момент наночастицы пропорционален квадрату ее момента импульса. Это может быть следствием пропорциональности обменного интеграла, определяющего энергию обменного взаимодействия, вызывающего появление магнитного момента однодоменной наночастицы, произведению спинов взаимодействующих атомов. Иначе это можно объяснить тем, что намагниченность магнитной жидкости, которая равна сумме магнитных моментов наночастиц в 1 м^3 , определяется законом Бриллюэна, согласно которому она пропорциональна $h^2 J \cdot (J + 1)$, т. е. квадрату момента импульса наночастиц.

СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ НАНОЧАСТИЦ, ИЗМЕРЕННЫХ ПО ПОЛОЖЕНИЮ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИК-СПЕКТРА И ПО КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Как следует из ИК-спектра магнитной жидкости, полученного при $n < 3$, в ней имеются наночастицы с тремя средними дискретными значе-

ниями магнитных моментов $P_1 \approx 1.0 \cdot 10^{-19}$, $P_2 = 3.2 \cdot 10^{-19}$, $P_3 = 8.7 \cdot 10^{-19}$ Ам². Обычно магнитные моменты наночастиц в магнитных жидкостях измеряют сравнением экспериментальной кривой намагничивания с формулой Ланжевена. Этим методом для разных магнитных жидкостей были получены следующие значения магнитных моментов наночастиц в единицах 10^{-19} Ам²:

4.4 [5], 4.3; 6.2; 12.3 [6], 7.0 [7], 4.7; 4.3; 3.49; 5.68 [8], 4.6 [9], 2.4; 2.7; 8.6; 12.8; 14.2; 12.3 [10], 1.6; 1.3; 1.0; 0.8 [11].

При сравнении значений магнитных моментов, полученных по ИК-спектру и по кривой Ланжевена, наиболее важно, что несмотря на принципиальное различие методик измерения по порядку величины эти значения совпадают. При сравнении конкретных значений следует учесть, что по кривой намагничивания определяются средние значения магнитных моментов наночастиц в магнитной жидкости $P_{\text{ср}}$, которые зависят от соотношения наночастиц с разными J . Например, можно предположить, что в жидкостях со средними значениями $P_{\text{ср}}$, равными

$$0.8 \cdot 10^{-19}, 1.0 \cdot 10^{-19}, 2.4 \cdot 10^{-19}, 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

преобладают наночастицы с $J = 1$;

в жидкостях со средними значениями $P_{\text{ср}}$, равными

$$4.3 \cdot 10^{-19}, 4.4 \cdot 10^{-19}, 4.7 \cdot 10^{-19}, 3.49 \cdot 10^{-19}, 5.68 \times 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

преобладают наночастицы с $J = 2$;

в жидкостях со средними значениями $P_{\text{ср}}$, равными

$$6.2 \cdot 10^{-19}, 7.0 \cdot 10^{-19}, 8.6 \cdot 10^{-19}, 5.68 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

преобладают частицы с $J = 3$;

в жидкостях со средними значениями $P_{\text{ср}}$, равными

$$12.8 \cdot 10^{-19}, 12.3 \times 10^{-19}, 14.2 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2,$$

преобладают наночастицы с $J > 3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты настоящей работы состоят в следующем.

1. Магнитные моменты однодоменных ферромагнитных наночастиц в магнитных жидкостях имеют дискретные значения.

2. Магнитные моменты наночастиц пропорциональны квадратам их моментов импульса.

3. Средний магнитный момент наночастиц в магнитной жидкости зависит от соотношения наночастиц с разными значениями момента импульса.

4. Несмотря на принципиальное различие методов измерения магнитных моментов по кривой намагничивания и по ИК-спектру магнитной жидкости, этими методами получают близкие значения магнитных моментов наночастиц.

5. Магнитный момент наночастицы при постоянном значении момента импульса увеличивается с увеличением 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. 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/full1/Art12.pdf>.
3. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Исследование структуры ИК-спектра ферромагнитных наночастиц в магнитном поле // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 61–65. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/full2/Art8.pdf>.
4. Жерновой А.И., Улашкевич Ю.В., Дьяченко С.В. Исследование зависимости ИК-спектра магнитной жидкости от индукции магнитного поля // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 3. С. 65–69. URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/full3/Art8.pdf>.
5. 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>.
6. Жерновой А.И., Дьяченко С.В. Сравнение размеров и магнитных моментов наночастиц магнетита в порошке и в коллоидном растворе, изготовленных методом химической конденсации // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 1. С. 54–57. URL: <http://213.170.69.26/mag/2016/full1/Art7.pdf>.
7. Жерновой А.И., Рудаков Ю.Р., Дьяченко С.В. Исследование методом ЯМР выполнения закона Кюри в золях парамагнитных наночастиц // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 1. С. 52–54. URL: <http://213.170.69.26/mag/2012/full1/Art7.pdf>.
8. Жерновой А.И., Дьяченко С.В. Определение дисперсии магнитного момента наночастиц в магнитной жидкости // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 1. С. 42–48. URL: <http://213.170.69.26/mag/2015/abst1.php#abst5>.
9. Дьяченко С.В. Разработка метода измерения намагниченности коллоидных растворов и порошков ферромагнитных наночастиц в стационарных условиях. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2017.
10. Жерновой А.И., Комлев В.И., Дьяченко С.В. Определение магнитных характеристик наночастиц $MgFe_2O_4$, полученных глицин-нитратным способом // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып. 2. С. 146–148. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/42755>.
11. Емельянов С.Г., Карпова Г.В., Пауков В.М., Полушин В.М., Ряполов П.А. Об оценке физических параметров магнитных наночастиц // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 3. С. 316–322.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 17.10.2017

THE MEASUREMENT OF MAGNETIC MOMENTS OF FERROMAGNETIC NANOPARTICLES BY THE POSITIONS OF THE LINES OF INFRA RED SPECTRA OF A MAGNETIC LIQUID IN A MAGNETIC FIELD

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

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

The investigation infra red spectra of a magnetic liquid in a magnetic field showed, that a rotation lines were shifted, when a magnetic field was changed. We determined the magnetic moments of nanoparticles that are equal to $1.0 \cdot 10^{-19}$, $3.2 \cdot 10^{-19}$, $8.7 \cdot 10^{-19}$ Am². Magnetic moments, which were measured by electromagnetic methods, were the average meanings of discrete magnetic moments.

Keywords: magnetic liquid, one domain nanoparticles of magnetite, infra red spectra, discrete magnetic moments

REFERENCES

1. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko 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. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko 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.).
3. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [The study of the infrared spectrum of a magnetic nanoparticles in a magnetic field structure]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 2, pp. 61–65. Doi: 10.18358/np-27-2-i6165. (In Russ.).
4. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diyachenko S.V. [The study of dependence the infrared spectrum of magnetic fluid from magnetic field]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 3, pp. 65–69. Doi: 10.18358/np-27-3-i6569. (In Russ.).
5. 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://213.170.69.26/en/mag/2009/abst3.php#abst8>. (In Russ.).
6. Zhernovoy A.I., Diyachenko S.V. [Compare of sizes end of magnetic moments nanoparticles of a magnetite in a colloid solution and in a powder, prepared by a chemical sedimentation (short message)]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 1, pp. 54–57. Doi: 10.18358/np-26-1-i5457. (In Russ.).
7. Zhernovoy A.I., Rudakov Yu.R. Diyachenko S.V. [NMR method for Curie's law compliance in colloid solutions of paramagnetic nanoparticles]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2012, vol. 22, no. 1, pp. 52–54. (In Russ.). URL: <http://213.170.69.26/en/mag/2012/full1/Art7.pdf>.
8. Zhernovoy A.I., Diyachenko S.V. [Determination of the dispersion magnetic moment of the nanoparticles in magnetic fluid]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no. 1, pp. 42–48. (In Russ.). URL: <http://213.170.69.26/en/mag/2015/abst1.php#abst5>.
9. Diyachenko S.V. *Razrabotka metoda izmereniya namagnichennosti kolloidnykh rastvorov i poroshkov ferromagnitnykh nanochastich v stacionarnykh usloviyakh*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Development of a method of measurement of magnetization of colloidal solutions and powders of ferromagnetic nanoparticles in stationary conditions. Cand. phys. and mat. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2017. (In Russ.).
10. Zhernovoi A.I., Komlev V.I., Diyachenko S.V. [Definition of magnetic characteristics of nanoparticles of MgFe₂O₄ received glycine - a nitrate way]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2016, vol. 86, no. 2, pp. 146–148. (In Russ.). URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/42755>.
11. Emel'yanov S.G., Karpova G.V., Paukov V.M., Polunin V.M., Ryapolov P.A. [Estimation of Physical Parameters of Magnetic Nanoparticles]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustical Journal], 2010, vol. 56, no. 3, pp. 316–322. (In Russ.).

Article received in edition 17.10.2017

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