

УДК 537.622.3-022.532:543.422.3-74

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИК-СПЕКТРА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ОТ ИНДУКЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Коллоидный раствор ферромагнитных наночастиц магнетита, находящийся в магнитном поле, имеет колебательно-вращательный ИК-спектр поглощения. Энергия колебательных уровней не зависит от индукции внешнего магнитного поля, а энергия вращательных уровней от нее линейно зависит. Эффект можно объяснить переориентацией под действием фотонов магнитных моментов наночастиц в магнитном поле.

Кл. сл.: магнитная жидкость, магнитное поле, колебательно-вращательный ИК-спектр, однодоменные ферромагнитные наночастицы

ВВЕДЕНИЕ*

В предыдущих наших работах [1–3] было показано, что ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле является дискретным и имеет колебательно-вращательную структуру, отличающуюся от похожей структуры молекулярных спектров тем, что расстояния между колебательными линиями сравнимы с расстояниями между вращательными линиями и имеют величину порядка нескольких электронвольт. В настоящей работе исследуется зависимость положений спектральных линий от индукции внешнего магнитного поля.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИК-СПЕКТРА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ОТ ИНДУКЦИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В Приложении на рис. П1–П3 приведены ИК-спектры магнитной жидкости, полученные на ИК-спектрометре Perkin Elmer при трех значениях индукции внешнего магнитного поля: $B_1 = 300$ мТл, $B_2 = 700$ мТл, $B_3 = 800$ мТл. Как было показано в работе [3], на этих спектрах имеются линии, похожие по их взаимному расположению на колебательные и вращательные линии молекулярных спектров. Максимумы колебательных линий регистрируются при резонансных волновых числах K_{n0} , где n — колебательные квантовые числа, а максимумы вращательных линий при резонансных волновых числах K_{nJ} и K_{n-J} , где индексами J и $-J$ обозначены вращательные квантовые числа при ориентациях магнитного момента под

углами соответственно больше и меньше $\pi/2$ к направлению \mathbf{B} .

Из рисунков можно сделать следующие заключения.

1) В первой колебательно-вращательной серии ($n = 1$) на всех трех рисунках резонансное колебательное волновое число $K_{10} = 1300$ см⁻¹ одинаково, т. е. при изменении индукции внешнего магнитного поля оно не меняется, а резонансные вращательные волновые числа K_{nJ} (верхний левый индекс означает номер рисунка) меняются, принимая значения ${}^1K_{11} = 1600$ см⁻¹, ${}^1K_{12} = 2200$ см⁻¹, ${}^1K_{13} = 3420$ см⁻¹ ($B = B_1$); ${}^2K_{11} = 1880$ см⁻¹, ${}^2K_{12} = 3350$ см⁻¹ ($B = B_2$); ${}^3K_{11} = 2120$ см⁻¹, ${}^3K_{12} = 3700$ см⁻¹ ($B = B_3$).

2) Во второй колебательно-вращательной серии ($n = 2$) на всех трех рисунках резонансное колебательное волновое число $K_{20} = 2370$ см⁻¹ одинаково, т. е. при изменении магнитной индукции B оно не меняется, а резонансные вращательные волновые числа K_{2J} при увеличении индукции B меняются, принимая значения ${}^1K_{21} = 2600$ см⁻¹, ${}^1K_{2-1} = 2100$ см⁻¹, ${}^1K_{22} = 3100$ см⁻¹, ${}^1K_{2-2} = 1600$ см⁻¹, ${}^1K_{23} = 4600$ см⁻¹ ($B = B_1$); ${}^2K_{21} = 3020$ см⁻¹, ${}^2K_{2-1} = 1730$ см⁻¹, ${}^2K_{22} = 4320$ см⁻¹ ($B = B_2$); ${}^3K_{21} = 3150$ см⁻¹, ${}^3K_{2-1} = 1580$ см⁻¹, ${}^3K_{22} = 4700$ см⁻¹ ($B = B_3$).

3) В третьей колебательно-вращательной серии ($n = 3$) на всех трех рисунках резонансное колебательное волновое число $K_{30} = 3430$ см⁻¹ одинаково, т. е. при увеличении магнитной индукции B оно не меняется, а резонансные вращательные волновые числа K_{3J} при увеличении магнитной индукции B меняются, принимая значения ${}^1K_{31} = 3680$ см⁻¹, ${}^1K_{3-1} = 3180$ см⁻¹, ${}^1K_{32} = 4180$ см⁻¹, ${}^1K_{3-2} = 2670$ см⁻¹ ($B = B_1$); ${}^2K_{31} = 4030$ см⁻¹, ${}^2K_{3-1} = 2830$ см⁻¹, ${}^2K_{3-2} = 1570$ см⁻¹ ($B = B_2$); ${}^3K_{31} = 4200$ см⁻¹, ${}^3K_{3-1} = 2640$ см⁻¹ ($B = B_3$).

* В статье отмечены опечатки: единицы мТл везде следует читать как Гс.

4) В четвертой колебательно-вращательной серии ($n = 4$) на всех трех рисунках резонансное колебательное квантовое число $K_{40} = 4420 \text{ см}^{-1}$ одинаково, т. е. при возрастании магнитной индукции B оно не меняется, а резонансные вращательные волновые числа ${}^iK_{4j}$ при увеличении магнитной индукции B меняются, принимая значения ${}^1K_{41} = 4650 \text{ см}^{-1}$, ${}^1K_{4-1} = 4170 \text{ см}^{-1}$, ${}^1K_{42} = 5170 \text{ см}^{-1}$, ${}^1K_{4-2} = 3670 \text{ см}^{-1}$ ($B = B_1$); ${}^2K_{41} = 5080 \text{ см}^{-1}$, ${}^2K_{4-1} = 3750 \text{ см}^{-1}$, ${}^2K_{42} = 2470 \text{ см}^{-1}$ ($B = B_2$); ${}^3K_{41} = 3630 \text{ см}^{-1}$, ${}^3K_{4-2} = 2050 \text{ см}^{-1}$ ($B = B_3$).

ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Можно отметить следующие полученные в предыдущем параграфе результаты.

1) Представленные в Приложении на рис. П1–П3 ИК-спектры магнитной жидкости обусловлены действием на ферромагнитные наночастицы магнитного поля, т. к. они получены вычитанием спектров, снятых при действии и без действия на магнитную жидкость магнитного поля.

2) Резонансные колебательные волновые числа K_{n0} от индукции приложенного магнитного поля не зависят.

3) Резонансные вращательные волновые числа K_{nj} ($J > 0$) при изменении индукции внешнего магнитного поля линейно меняются. Первый результат (появление колебательно-вращательного ИК-спектра магнитной жидкости только при действии на нее внешнего магнитного поля) можно объяснить тем, что ИК-спектр возникает при взаимодействии ИК-излучения с конгломератами наночастиц, возникающими в магнитной жидкости при действии на нее внешнего магнитного поля. Результат второй — независимость резонансных колебательных волновых чисел от индукции внешнего магнитного поля — можно объяснить тем, что колебания, возбуждаемые действием резонансного ИК-излучения, возникают в квазиупругом поле обменных сил, которые от индукции B приложенного магнитного поля практически не зависят, поэтому и резонансная частота вынужденных колебаний, определяющая резонансное колебательное волновое число, не зависит от B . Результат третий — линейную зависимость резонансных вращательных волновых чисел от индукции внешнего магнитного поля B — можно объяснить тем, что при резонансных вращательных волновых числах фотоны ИК-излучения вызывают освобождение магнитных моментов однодоменных ферромагнитных наночастиц от сил обменного взаимодействия и их переориентацию относительно направления внешнего магнитного поля. Энергия, затрачиваемая на преодоление об-

менного взаимодействия, не зависит от B , а энергия, затрачиваемая на переориентацию магнитного момента, пропорциональна B , поэтому значения резонансных волновых чисел линейно связаны с индукцией B . Можно предположить, что преодоление сил обменного взаимодействия происходит за счет энергии колебательных уровней, которая превышает энергетическую температуру Кюри. Проверим это.

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ КЮРИ

Энергия первого колебательного уровня $E_1 = h \cdot c \cdot K_{10} = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1.3 \cdot 10^5 = 25.7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0.16 \text{ эВ}$.

Энергия второго колебательного уровня $E_2 = h \cdot c \cdot {}^1K_{20} = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2.37 \cdot 10^5 = 46.7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0.29 \text{ эВ}$.

Энергия третьего колебательного уровня $E_3 = h \cdot c \cdot {}^1K_{30} = 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3.43 \cdot 10^5 = 68 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0.42 \text{ эВ}$.

Температура Кюри магнетита $T_k = 858 \text{ К}$. При этом энергетическая температура Кюри (энергия тепловых колебаний при температуре Кюри) $E_{об} = kT_k = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 858 = 11.8 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0.074 \text{ эВ}$ (k — постоянная Больцмана). Сравнение показывает, что энергии всех колебательных уровней превышают тепловую энергию при температуре Кюри магнетита. Следовательно, вызванные ИК-излучением колебания магнитных моментов однодоменных наночастиц могут преодолеть силы обменного взаимодействия, вызывающие образование конгломератов, препятствующих переориентации магнитных моментов отдельных наночастиц в магнитном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящей работе ИК-спектры магнитной жидкости получены вычитанием спектров, измеренных без действия на магнитную жидкость внешнего магнитного поля, из спектров, измеренных при действии на магнитную жидкость магнитного поля. Следовательно, положительные пики, наблюдаемые на рисунках в Приложении, возникают в результате поглощения энергии ИК-излучения при действии на магнитную жидкость магнитного поля. При резонансных колебательных волновых числах энергия фотонов затрачивается на возникновение колебаний наночастиц в поле сил межчастичного взаимодействия, а при резонансных вращательных волновых числах на переориентацию магнитных моментов наночастиц во внешнем магнитном поле. Поглощение магне-

тиками электромагнитного излучения ИК-лазера наблюдалось экспериментально [4], однако оно не связывалось с действием внешнего магнитного поля. Зависимость положений вращательных ли-

ний от индукции внешнего магнитного поля, по-видимому, можно использовать для определения магнитных моментов наночастиц.

ПРИЛОЖЕНИЕ

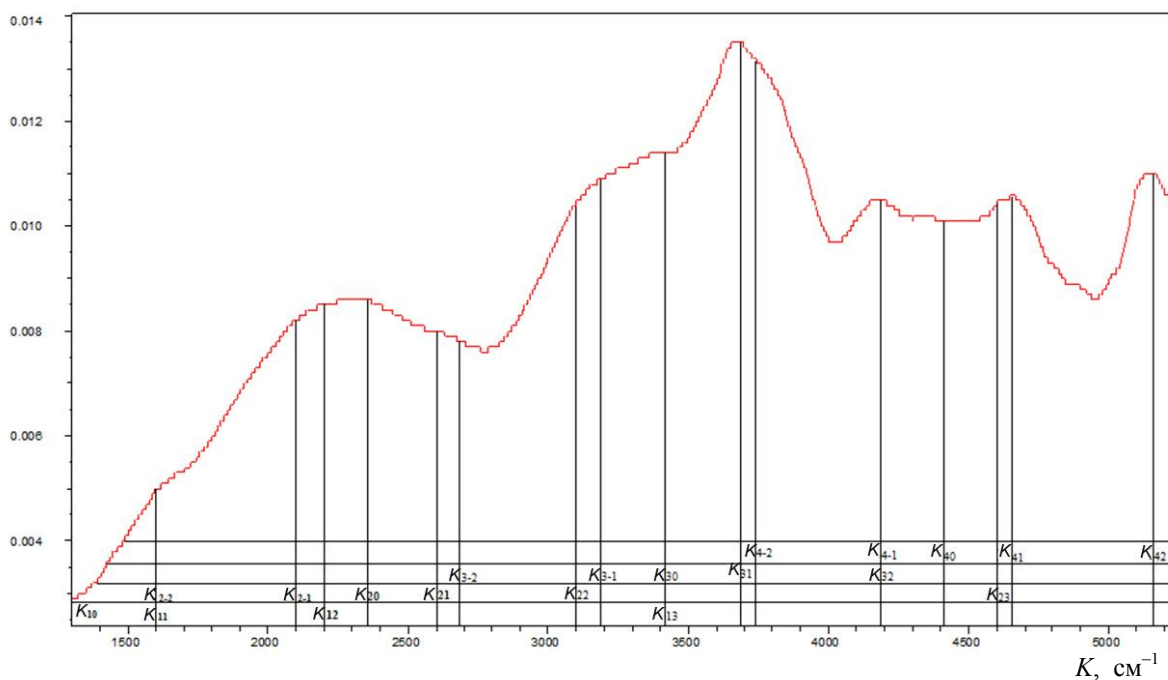


Рис. П1. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_1 = 300$ мТл

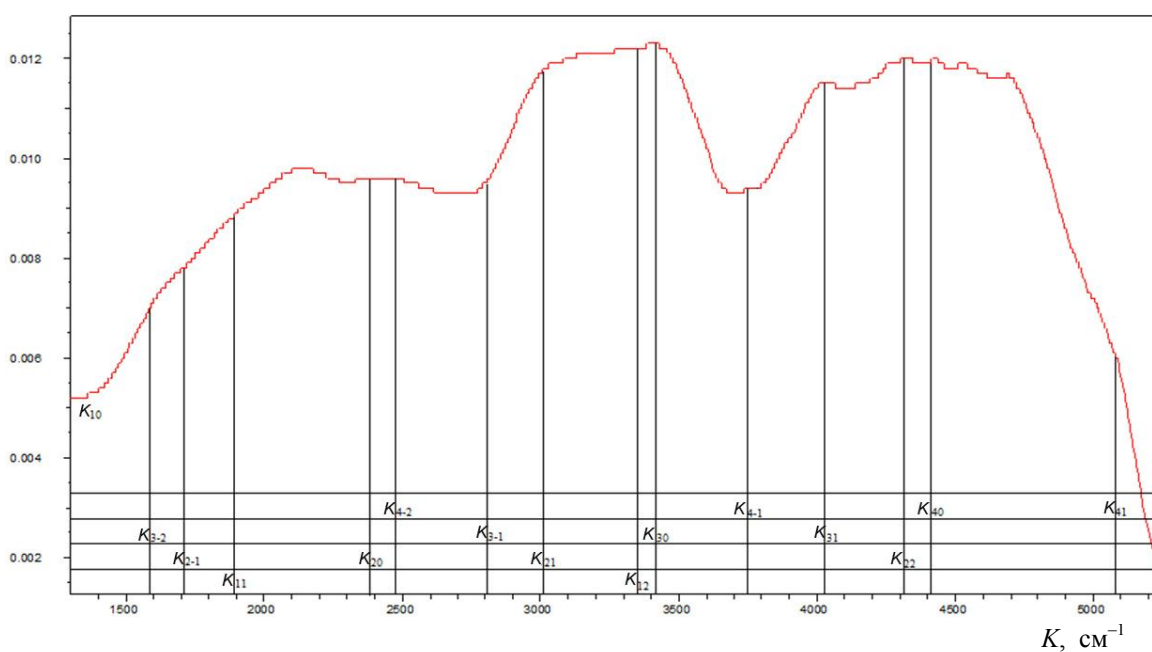


Рис. П2. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_2 = 700$ мТл

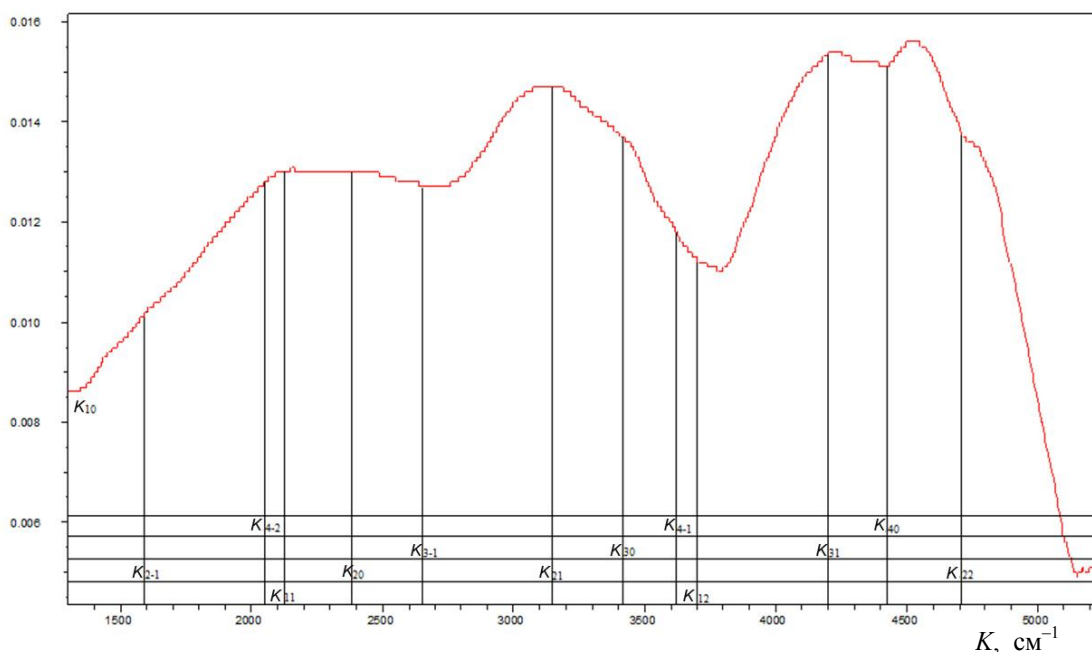


Рис. ПЗ. ИК-спектр магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией $B_3 = 800$ мТл

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/abst2.php#abst8>.
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/abst1.php#abst12>.
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/abst2.php#abst8>.
4. Mikhaylovskiy R.V., Hendry E., Secchi A., Mentink J.H., Eckstein M., Wu A., Pisarev R.V., Kruglyak V.V., Katsnel

son M.I., Rasing Th., Kimel A.V. Ultrafast optical modification of exchange interactions in iron oxides // Nat. Commun. 2015. Vol. 6. Art. number 8190. Doi: 10.1038/ncomms9190.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspp@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 4.07.2017

THE STUDY OF DEPENDENCE THE INFRARED SPECTRUM OF MAGNETIC FLUID FROM MAGNETIC FIELD

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

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

Colloidal solution of ferromagnetic magnetite nanoparticles in magnetic field has vibrational-rotational IR spectrum. The energy of the vibrational levels does not depend on the induction of the external magnetic field, and the energy of the rotational levels depends linearly on it. The effect can be explained by the reorientation under the action of photons of the magnetic moments of nanoparticles in magnetic field.

Keywords: magnetic fluid, magnetic field, vibrational-rotational IR spectrum, single-domain ferromagnetic nanoparticles

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. 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.).
3. Zhernovoy A.I., Ulashkevich Yu.V., Diachenko 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. Mikhaylovskiy R.V., Hendry E., Secchi A., Mentink J.H., Eckstein M., Wu A., Pisarev R.V., Kruglyak V.V., Katsnelson M.I., Rasing Th., Kimel A.V. Ultrafast optical modification of exchange interactions in iron oxides. *Nat. Commun.*, 2015, vol. 6, art. number 8190. Doi: 10.1038/ncomms9190.

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

Article received in edition: 4.07.2017