

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Здорников Семён Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование поведения ансамбля магнитных наночастиц в
жидкости методом электронного магнитного резонанса (ЭМР)**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18304

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. С. С. Якушкин

Оценка научного руководителя

«__»_____2019 г.

Преподаватель практикума:

д. ф.-м. н. Л. Н. Вячеславов

Оценка преподавателя практикума

«__»_____2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«__»_____2019 г.

Аннотация

Методом ЭМР исследованы свойства феррофлюида $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ДМСО}$ при охлаждении в диапазоне температур 300-120 К.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при понижении температуры изменяется динамика магнитных моментов для ансамбля взаимодействующих наночастиц в жидкости. Наблюдается несимметричный сигнал поглощения, что свидетельствует о неполном усреднении локального магнитного поля. При переходе через температуру плавления ДМСО существенным становится влияние магнитного поля, в котором проводилось замерзание, на наблюдаемую магнитную анизотропию образца.

Ключевые слова: ФМР, магнитные жидкости, магнитные наночастицы.

Работа выполнена в Институте катализа им. Г. К. Борескова в лаборатории исследования процессов в средах повышенной плотности.

Содержание

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1. Магнитные наночастицы	5
2.2. Метод ФМР	9
3. Экспериментальная часть	14
3.1. Образцы	14
3.2. Описание установки	14
4. Результаты и обсуждение	16
5. Основные результаты и выводы	20
Список литературы	20

1. Введение

Важным вопросом в поведении магнитных жидкостей является их устойчивость к агрегации. При слипании наночастиц магнитная жидкость становится неустойчивой, выпадает осадок [1]. Стабильность феррофлюида зависит от теплового движения и баланса между притяжением и отталкиванием. С одной стороны, в магнитном поле интенсивность излучения увеличивается за счет энергии этого поля, с другой стороны – тепловая энергия заставляет частицы блуждать по всей жидкости. В связи с этим устойчивость к осаждению из-за действия гравитационного поля определяется соотношением между потенциальной и магнитной энергией.

В простейшей модели магнитных жидкостей можно ограничиться случаем невзаимодействующих наночастиц (изолированных). Но на практике концентрация магнитных наночастиц в феррофлюиде достаточно высока, так что необходимо учитывать магнитные межчастичные взаимодействия. Магнитные диполь-дипольные взаимодействия могут приводить к агрегации и, вследствие этого, к выпадению осадка. Электростатическое притяжение является основным механизмом для поддержания устойчивости магнитных жидкостей.

Метод электронного магнитного резонанса (ЭМР) состоит в измерении резонансного поглощения СВЧ-излучения в образце, помещенном во внешнее магнитное поле. В случае, когда исследуемый образец является ферромагнетиком, говорят о ферромагнитном резонансе (ФМР). Из-за некоторых свойств магнитных наночастиц их можно исследовать в классической модели магнитного поля. Таким образом, взаимодействие электромагнитного поля с веществом можно описать в терминах классической электродинамики, не рассматривая квантовую природу магнетизма.

При исследовании феррофлюидов метод ЭМР позволяет исследовать не только магнитные свойства изолированной частицы, но и взаимодействия

между частицами, взаимодействие частиц и растворителя, процессы агломерации, изучать устойчивость магнитной жидкости.

В данной работе исследовался образец наночастиц магнетита в диметилсульфоксиде (ДМСО). В работе [2] был предложен способ синтеза стабильного феррофлюида $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ДМСО}$ с размерами частиц 2-6 нм с концентрацией $\sim 10\%$. В ходе эксперимента необходимо было учитывать несколько факторов.

2. Теоретическая часть

2.1. Магнитные наночастицы

Магнитные наночастицы – это частицы размером 1-100 нм с ненулевым магнитным моментом, который обуславливается на атомном уровне движением электронов по орбите и их спином – вращением вокруг своей оси [3].

Магнитные наночастицы имеют большое значение в современном научном мире – они применяются в катализе [4], биомедицине [5], хранении данных [6] и других сферах [7].

В последние несколько десятилетий для приготовления магнитных наночастиц требуемого размера с необходимыми свойствами было разработано большое количество методов – от гидротермального синтеза до обработки ультразвуком [2].

Одним из простейших способов получения наночастиц является химическое осаждение, широко применяемое для синтеза магнетитовых и смешанных оксидных наночастиц. Способ заключается в совместном осаждении солей Fe^{2+} и Fe^{3+} в водном растворе в щелочных условиях. К сожалению, этот метод не позволяет надлежащим образом контролировать распределение наночастиц по размерам. Для предотвращения агломерации наночастиц и их неконтролируемого роста в процессе синтеза используются

специальные добавки и поверхностно-активные вещества. Кроме того, существует множество способов получения коллоидов с низким содержанием магнитных наночастиц, которые включают дополнительную стадию центрифугирования, обеспечивающую узкое распределение наночастиц по размерам [2].

Одним из уникальных материалов, полученных из магнитных наночастиц, являются магнитные жидкости – искусственные материалы, обладающие одновременно свойствами ферромагнетика и жидкости.

Магнитные жидкости представляют собой коллоидные растворы магнитных наночастиц в жидкости-носителе [8]. С середины 20 века известны два типа магнитных жидкостей: магнитореологические и феррофлюиды. Первые представляют собой суспензии микрометрических частиц намагничиваемых материалов, диспергированных в жидкой среде. Вторые – если говорить об идеальных феррофлюидах – являются коллоидными суспензиями ультрадисперсных однодоменных магнитных наночастиц, таких как оксид железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4), ферриты MnZn , а также Fe и Co в полярных или неполярных жидких средах [1].

Исследования и разработки по подготовке, характеристике, применению магнитных жидкостей являются предметом изучения в различных областях науки: химии, механике жидкости и магнетизме. Помимо этих областей науки из-за малого размера частиц феррофлюиды изучаются в рамках нанонауки и нанотехнологии. Наиболее важным преимуществом этих жидкостей является их способность достигать широкого диапазона вязкости за доли миллисекунды. Феррофлюиды полезны тем, что можно управлять положением капли жидкости за счет влияния магнитного поля, в которое она вносится. Вследствие этого они широко используются в компьютерной технике, биоинженерии и др. [1].

Жидкость-носитель – вторая составляющая магнитных жидкостей. Она обеспечивает среду, в которой диспергированы магнитные порошки. Выбор

жидкой среды зависит от области применения магнитной жидкости. Феррофлюиды, используемые в различных научно-технических областях, могут быть синтезированы в таких жидкостях-носителях, как вода, силиконовое масло, синтетическое или полусинтетическое масло, минеральное масло, смазочное масло, керосин и их комбинации, а также во многих других полярных жидкостях. Температура кипения, давление пара при повышенной температуре, температура замерзания являются важными параметрами, которые следует учитывать при выборе жидкости-носителя [1].

Магнитные свойства магнитных жидкостей тоже важны. Содержание магнитных частиц, намагниченность при насыщении, вязкость суспензии и наличие поверхностно-активных веществ являются факторами, определяющими не только свойства готовой магнитной жидкости, но и ее стабильность. Эти параметры влияют на реологические свойства, устойчивость и дисперсность феррофлюидов [9].

Несмотря на то что чистые металлы (Fe, Co, Ni) обладают самой высокой намагниченностью насыщения, они очень чувствительны к окислению, поэтому в магнитных жидкостях обычно используются ферриты, магнетит (Fe_3O_4), маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и прочие соединения. Среди этих веществ наночастицы оксида железа являются наиболее широко используемой в феррофлюидах магнитной фазой [1]. Магнитные свойства магнитных жидкостей играют наиболее важную роль в их вязкости и текучести. Магнитная наночастица размера 10 нм является однодоменной и имеет магнитный момент M . При воздействии на нее поля B она обладает потенциальной энергией:

$$U = -MB \quad (1)$$

Для того, чтобы уменьшить энергию частицы, необходимо ориентировать магнитное поле параллельно вектору M . При отсутствии магнитного поля магнитные моменты вследствие теплового движения случайно распределяются по направлениям, и намагниченность образца

становится равной нулю. В случае, когда неоднородное магнитное поле воздействует на наночастицы, они будут испытывать силу F и двигаться к области с наибольшей напряженностью поля. Эта сила пропорциональна приложенному полю B и магнитным моментам частиц M :

$$F = \nabla B \cdot M \quad (2)$$

Еще одним важным параметром, который влияет на магнитные свойства феррофлюидов, является температура Кюри. Выше этой точки магнитные наночастицы утрачивают намагниченность, так как происходит разрушение характерной для них магнитной структуры [1].

Реологические свойства магнитных жидкостей существенно расширяют область их применения. Многие факторы: содержание твердых веществ, распределение частиц по размерам, значение pH, температура и поверхностно-активные вещества – влияют на вязкость. Взаимосвязь вязкости смеси и вязкости жидкости-носителя определяется следующим соотношением:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2,5\varphi, \quad (3)$$

где φ – объемная доля твердого вещества. Данное уравнение справедливо только для разбавленных систем, при $\varphi < 0,5$ [1].

При исследовании вязкости дисперсных структур были предложены различные модели, учитывающие особенности этих взвешенных жидкостей. Карсон, предложивший одну из них, принял во внимание предельное значение текучести и истончение сдвига. Сдвиговое истончение суспензий может быть связано с изменением структуры и расположения взаимодействующих частиц. Хонг сообщил в своем исследовании о подобном поведении феррофлюидов на водной основе Fe_3O_4 [10]. Истончение сдвига также сообщалось для различных типов магнитных жидкостей [11].

Магнитная жидкость остается текучей в присутствии магнитного поля, даже когда она полностью намагничена. Вязкость феррофлюидов увеличивается с увеличением магнитного поля. Это может быть связано с образованием цепочек частиц, которые располагаются в направлении магнитного поля. По мере увеличения магнитного поля взаимодействие между наночастицами усиливается, а цепочки частиц становятся длиннее. В связи с этим сопротивление жидкости течению – вязкость – увеличивается.

Магнитные силы могут приводить к агломерации, но если их контролировать, они будут главным инструментом для изменения вязкости и текучести магнитной жидкости — а именно они важны для конкретных приложений. Например, технические устройства с магнитной жидкостью, называемые магнитожидкостными герметизаторами для вращающихся валов [12].

Магнитные жидкости с самого начала привлекали исследователей возможностью изучения магнитного поведения однодоменных систем частиц в жидком и замороженном состояниях.

2.2. Метод ФМР

Для исследования свойств магнитных жидкостей используется в том числе метод ферромагнитного резонанса. Явление магнитного резонанса состоит в резонансном поглощении переменного магнитного поля высокой частоты веществами, находящимися в постоянном магнитном поле. В настоящее время магнитный резонанс превратился в мощный метод физического исследования структуры и свойств вещества, который используется в физике, химии, биологии, геофизике, медицине и других областях науки [13].

Магнитный резонанс для электронов и ядер обусловлен наличием у этих частиц спиновых магнитных моментов. Большинство известных явлений магнетизма связаны с магнитным моментом электрона, который на

несколько порядков больше, чем магнитный момент протона. В данной работе применялась установка метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для наблюдения резонансного поглощения в веществе, обусловленного магнитными моментами электронов.

В общем случае в методе ЭПР нужно учитывать квантовую природу спина электрона. Однако если электроны в исследуемых веществах находятся в структуре ферромагнетика (связаны сильным обменным взаимодействием), можно рассматривать поведение магнитных моментов этих электронов как движение некоторого общего магнитного момента M , величина которого значительно больше, чем величина магнетона Бора. В этом случае можно пренебречь квантовой природой спина, квантованием величины проекции магнитного момента электрона, и решать задачу в рамках классической электродинамики.

Введем магнитный и механический моменты единицы объема вещества M и m соответственно и, зная, что $m = \gamma_0 M$, запишем для него уравнение движения под действием магнитного поля:

$$\frac{dM}{dt} = m \times B = \gamma_0 M \times B, \quad (4)$$

где константа

пропорциональности $\gamma_0 = \frac{2\pi mc}{h}$ между механическим и магнитным моментом называется гиромагнитным отношением [13].

Направление магнитного момента в пространстве в данном случае может не быть постоянным.

Перепишем это уравнение для вектора M в уравнение для трех его компонент. Пусть $B = \text{const}$, $B = (0, 0, B)$. Выведем также величину размерности частоты $\omega_0 = \gamma_0 B$. Тогда

$$\begin{aligned}
\frac{dM_x}{dt} &= \omega_0 M_y \\
\frac{dM_y}{dt} &= -\omega_0 M_x \\
\frac{dM_z}{dt} &= 0
\end{aligned} \tag{5}$$

Решение этой системы описывает прецессию вектора $\mathbf{M}$ вокруг внешнего поля $\mathbf{B}$ с частотой ω_0 . В ходе этой прецессии вектор магнитного момента по величине не меняется. Его направление описывает конус с осью вдоль оси z . Эта прецессия называется ларморовой прецессией, сама же частота ω_0 – ларморовой частотой (рис.1).

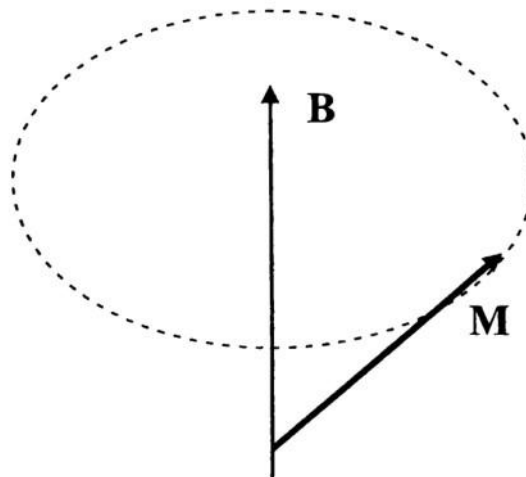


Рис. 1. Прецессия вектора магнитного момента в магнитном поле [13]

Таким образом, во внешнем магнитном поле в отсутствии затухания магнитный момент $\mathbf{M}$ будет прецессировать вокруг направления внешнего магнитного поля с ларморовой частотой. Если приложить к такой системе периодическое магнитное поле, например, вдоль оси z :

$$B_z = B_1 \cos \omega t, \tag{6}$$

то при совпадении частоты этого периодического поля $\omega = \omega_0$ возникнет резонанс. В реальных системах присутствует также затухание, из-за чего

спектр резонансного поглощения представляет собой не бесконечно узкий пик, а линию некоторой ширины.

На рис. 2 показан пример эксперимента по измерению сигнала резонансного поглощения, результатом которого является спектр магнитного резонанса. Здесь разворачивается постоянное магнитное поле B при фиксированной частоте спектрометра ν , спектр представлен кривой (a). В спектрометрах ЭПР по техническим причинам измеряется производная сигнала поглощения по магнитному полю, она представлена кривой (b) [13]. Любую из представленных ниже кривых называют линией поглощения.

Важной характеристикой данного сигнала поглощения кроме интенсивности является также и ширина линии. Для идеального случая симметричной линии формы Лоренца (рис. 2 (a)) её ширина на полувысоте равна расстоянию между экстремумами производной (рис.2 (b)).

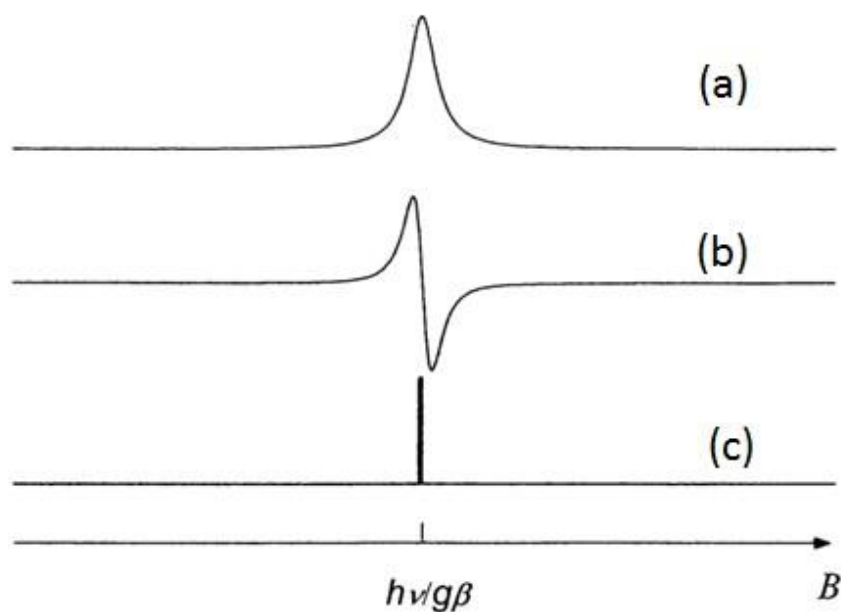


Рис. 2. Спектр магнитного резонанса [13]

Ферромагнетики имеют домены – области с одинаковым направлением магнитного момента. При внесении в слабое магнитное поле домены, у которых направление наиболее близко к направлению внешнего поля,

начинают расширяться, поглощая домены с обратным направлением. В сильных полях доменам с обратным направлением энергетически выгодно дискретно изменить свое направление и выстроиться вдоль поля, что приведет к огромным величинам намагниченности. Тогда в таких полях, при насыщении образца, весь ферромагнетик можно представить как один большой домен. Если вынести данный образец из поля, он будет иметь вектор намагниченности и поэтому сам станет источником магнитного поля – постоянным магнитом. Такие вещества, которые находятся вне области действия поля, сохраняют суммарный магнитный момент достаточно долгое время [3].

В случае, если размеры наночастицы магнитного материала меньше, чем характерные размеры магнитного домена или сравнимы с ними, её атомам энергетически выгодно образовать один домен. Такую частицу называют однодоменной. Для феррофлюидов и магнитных наночастиц в их составе это условие практически всегда выполняется.

Таким образом, в эксперименте ферромагнитного резонанса (ЭПР для магнитоупорядоченных систем) для магнитных наночастиц можно говорить о взаимодействии магнитных моментов однодоменных частиц с внешним магнитным полем (1).

Наличие сильных обменных взаимодействий, а также ряда других эффектов в ферромагнитных веществах сильно затрудняет интерпретацию спектров ферромагнитного резонанса в полидисперсных веществах по сравнению с интерпретацией спектров ЭПР [14]. Для ферромагнитного резонанса справедливо условие: $\omega_0 = \gamma B$, где $B = B_0 + B'$ и B' – некоторое дополнительное поле, величина которого зависит от природы образца, условий эксперимента, формы частиц, наличия в них дефектов и т. д. и т. п. Неучет этого дополнительного поля может привести к серьезным ошибкам.

В случае феррофлюида, состоящего из однодоменных частиц, большинство этих эффектов усредняется. Свой вклад вносит как усреднение

по ансамблю частиц, так и наличие тепловых флуктуаций, в том числе броуновских сил, которые также приводят к усреднению локальных неоднородностей, усреднению по времени. Появившееся магнитное поле B' не вносит никакого вклада, так как можно считать его для всего образца равновероятным по всем направлениям.

В отличие от феррофлюидов, находящихся в жидком состоянии, для замороженных феррофлюидов не наблюдается полного усреднения локальных неоднородностей из-за присущей частицам анизотропии [15]. Это можно увидеть, исследовав магнитную жидкость методом ФМР: если получить спектры замороженного образца в двух разных положениях, то они не будут совпадать. При заморозке наночастицы хаотично распределяются по магнитной жидкости и застывают в определенной ориентации, поэтому броуновской релаксации (изменения положения частицы таким образом, чтобы магнитный момент установился по направлению внешнего магнитного поля) не происходит [15].

3. Экспериментальная часть

3.1. Образцы

Исследовался образец феррофлюида на основе наночастиц магнетита в диметилсульфоксиде ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{DMCO}$), размеры наночастиц 2-6 нм, концентрация $\sim 10\%$ по массе.

3.2. Описание установки

Для регистрации спектров ФМР использовали радиоспектрометр Bruker ELEXSYS 500. Образцы помещали в центр прямоугольного резонатора с конфигурацией поля TE_{102} с магнитной компонентой СВЧ поля, перпендикулярной направлению внешнего магнитного поля, позволяющего работать при температурах 100-500 К. Спектрометр позволял проводить регистрацию спектров поглощения при частотах СВЧ излучения ~ 10 ГГц (X-

band). Полученный спектр отображает не сигнал поглощения, а его производную. Принципиальная схема эксперимента изображена на Рис. 3.

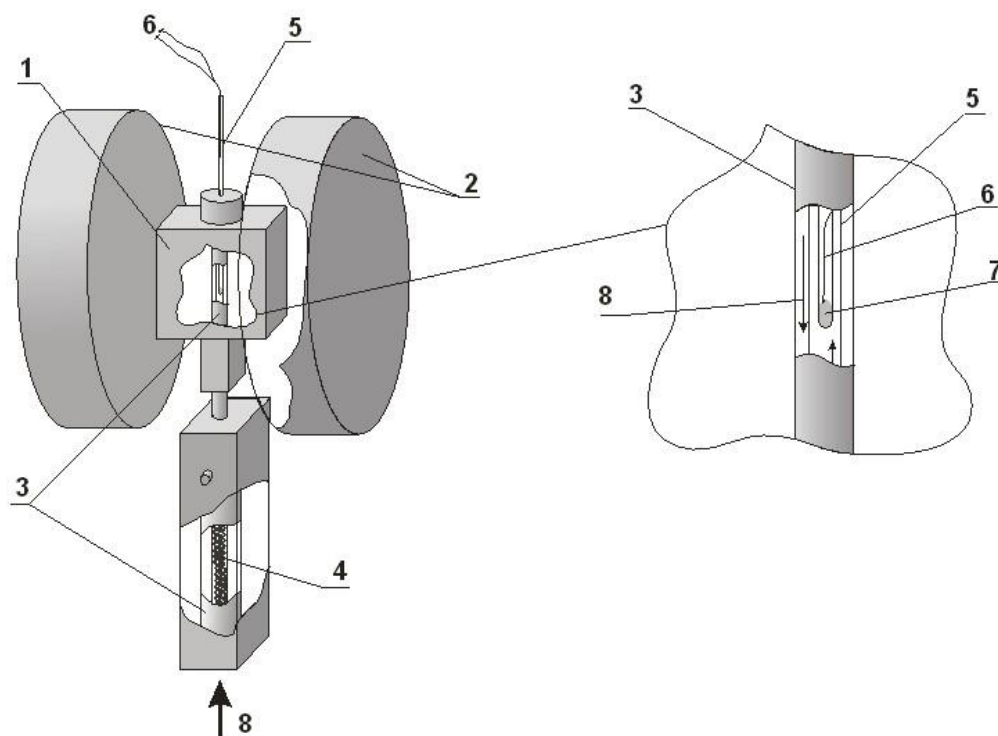


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки:
СВЧ-резонатор – (1), полюса электромагнита – (2), кварцевый дьюар – (3),
охлаждающий элемент – (4), ампула с образцом – (5), образец – (7),
направление потока N_2 – (8)

Во время эксперимента ампулу с исследуемым образцом помещали в кварцевую дьюаровскую трубку (трубка из кварцевого стекла с двойными стенками, из которой откачан воздух), находящуюся в резонаторе радиоспектрометра. Охлаждающий элемент находился также в дьюаровской трубке вне резонатора, в связи с потерей чувствительности метода при помещении в резонатор токопроводящих элементов. Охлаждение осуществляли током паров жидкого азота, который находился во внешнем сосуде дьюара и был соединен с кварцевой дьюаровской трубкой при помощи теплоизолированного шланга. Температуру образца контролировали при помощи термопары.

Снимали спектры магнитного резонанса для исследования роли внешнего поля, в котором проводился процесс заморозки. Устройство

спектрометра позволяет выставить фиксированное значение магнитного поля в перерывах между регистрацией спектров так, чтобы охлаждение образца происходило в заданном внешнем магнитном поле. При заморозке образца поворачивали его на определенный угол и сравнивали эти спектры, чтобы проверить анизотропию частиц. Далее повышали температуру, размораживая образец. После проведения опыта анализировали и сравнивали получившиеся спектры ФМР.

4. Результаты и обсуждение

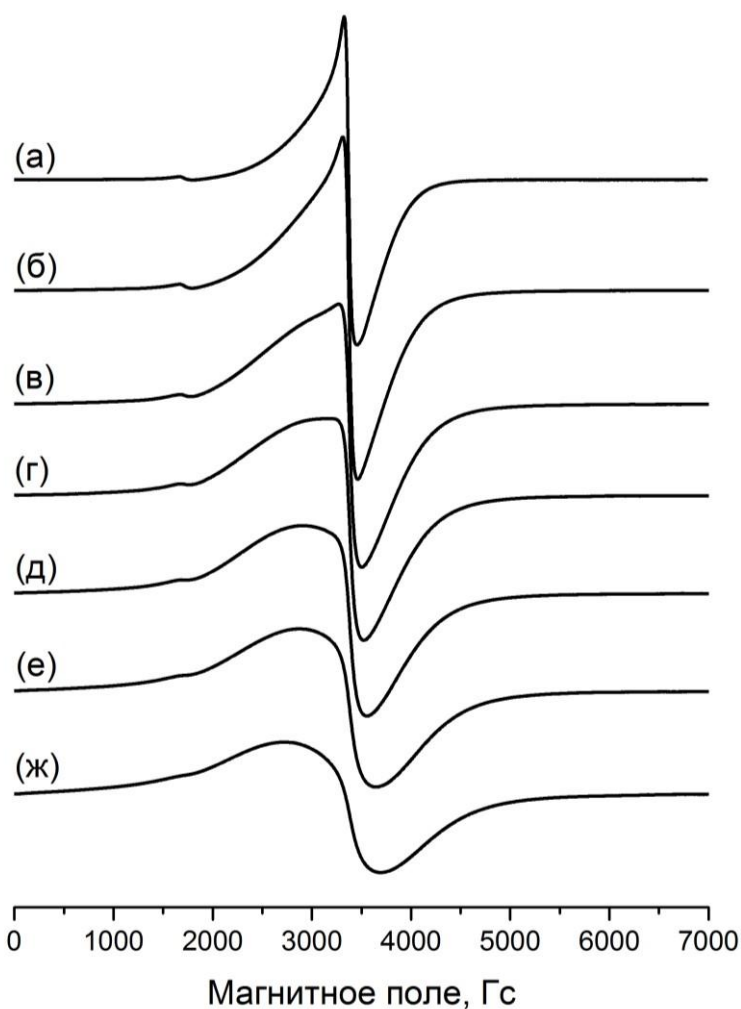


Рис. 4. Спектры ФМР образца наночастиц Fe_3O_4 в ДМСО при различной температуре регистрации: (а) – 270 К, (б) – 240 К, (в) – 200 К, (г) – 180 К, (д) – 160 К, (е) – 140 К, (ж) – 120 К

На рис. 4 приведены спектры ФМР наночастиц магнетита, полученные при различной температуре. В спектре при комнатной температуре наблюдается одиночная узкая линия поглощения (а). Ширина линии $\Delta H_{p-p} = 104$ Гс. При понижении температуры происходит постепенное увеличение ширины линии, в диапазоне температур 200-140 К наблюдается несимметричный сигнал. В спектре поглощения наблюдается суперпозиция линий с различной шириной (рис. 4 (в)-(е)). При достижении температуры 120 К наблюдается полное исчезновение узкого сигнала и ширина линии становится равной 960 Гс.

Для спектров, полученных в этом эксперименте, вычислялась пиковая ширина линии (расстояние между экстремумами производной сигнала поглощения $\Delta H_{peak-to-peak}$) и интегральная интенсивность поглощения (второй интеграл от производной сигнала поглощения).

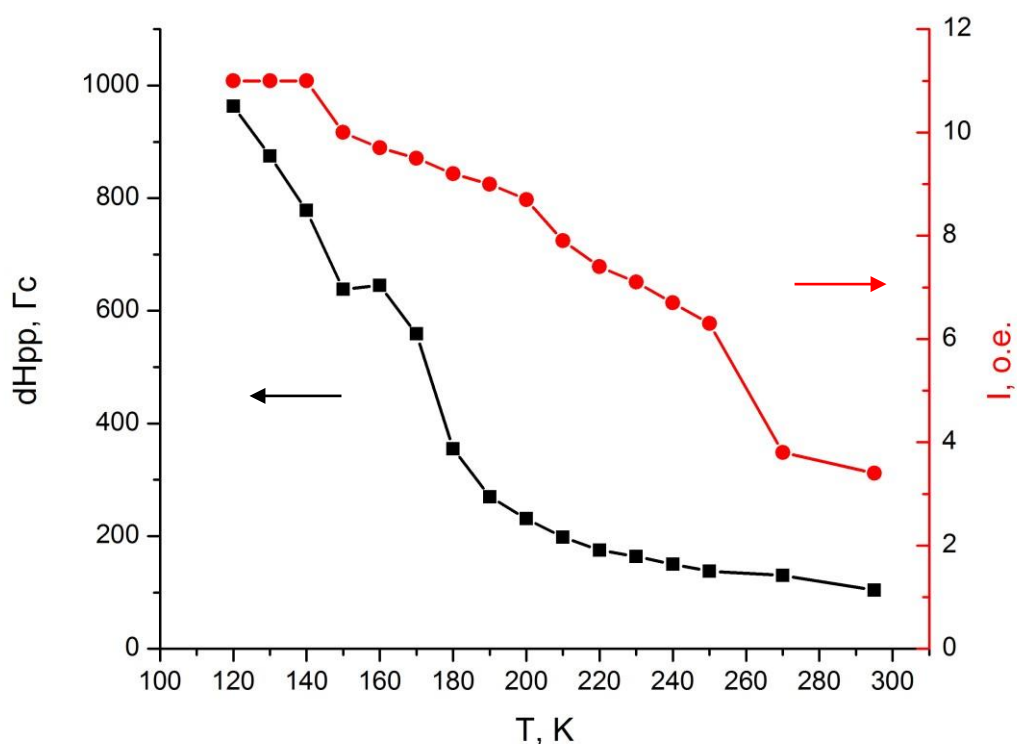


Рис. 5. Анализ спектров ФМР образца наночастиц Fe_3O_4 в ДМСО: черным цветом – зависимость ширины линии ΔH_{p-p} от температуры (Гс), красным цветом – зависимость интенсивности сигнала поглощения от температуры (о.е.)

На рис. 5 изображены кривые, характеризующие зависимость ширины линии и энергии поглощения от температуры. При понижении температуры ширина линии и энергия увеличиваются. При температуре 150-160 К наблюдается излом ширины линии. Кривая интенсивности поглощения при понижении температуры с 270 К до 250 К испытывает характерный скачок, величина которого равна 2,5 о.е.. При понижении температуры со 150 К до 140 К наблюдается излом интенсивности. Это сопровождается резкими изменениями пиковой ширины линии поглощения. При температурах ниже 140 К энергия перестает расти и принимает постоянное значение – 11 о.е..

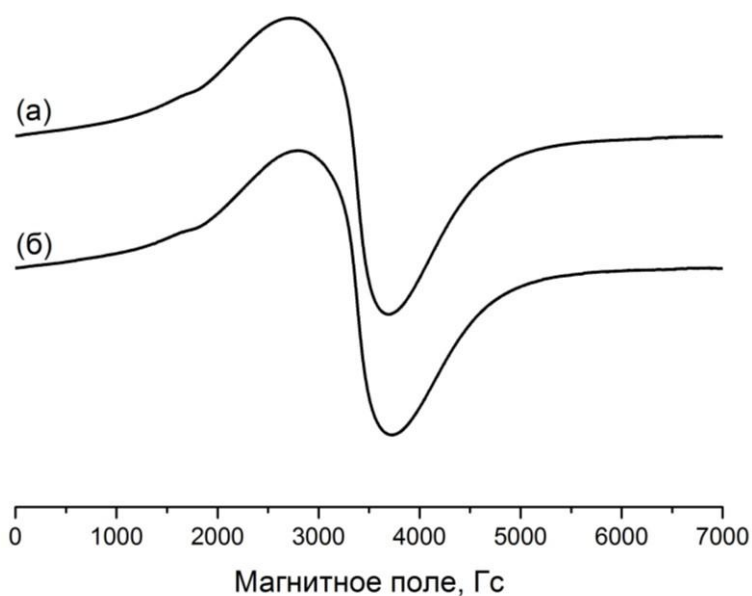


Рис. 6. Спектры ФМР образца наночастиц Fe_3O_4 в ДМСО при температуре регистрации 120 К при различных положениях ампулы: (а) – начальное положение, (б) – спектр при повороте ампулы на угол $\frac{\pi}{2}$

На Рис. 6 приведены спектры ФМР наночастиц магнетита, полученные при температуре 120 К при отсутствии внешнего магнитного поля в двух различных положениях ампулы. Спектр при исходном положении ампулы π представлен кривой (а). При повороте ампулы на угол $\frac{\pi}{2}$ – (б) спектр не 2

изменяется – при наложении этих двух спектров друг на друга они совпадают.

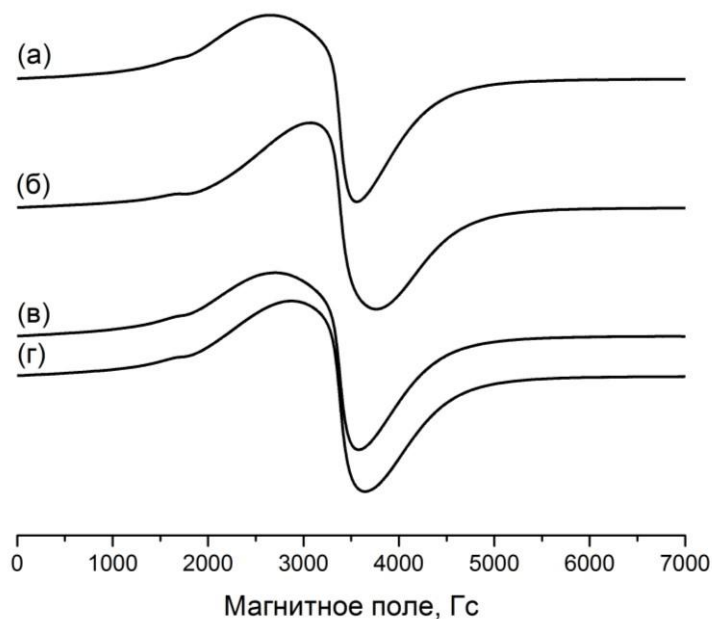


Рис. 7. Спектры ФМР образца наночастиц Fe_3O_4 в ДМСО при температуре регистрации 140 К при различных положениях ампулы в заданном магнитном поле 3500 Гс: (а) – начальное положение, (б) – спектр при повороте ампулы на угол $\frac{\pi}{2}$, (в) – спектр при повороте на угол π ; (г) – начальное положение при заморозке в отсутствии внешнего магнитного поля

На рис. 7 приведены спектры ФМР наночастиц магнетита, полученные при температуре 140 К после заморозки образца во внешнем магнитном поле при различных положениях ампулы и спектр при той же температуре после заморозки в отсутствии поля. Спектр при исходном положении ампулы π представлен кривой (а). Спектр образца после поворота ампулы на угол $\frac{\pi}{2}$ (б) отличается формой сигнала. У данного спектра меньше ширина линии ΔH_{p-p} и более симметричная форма. Линия поглощения при повороте на угол π (в) совпадает с линией поглощения в начальном положении (а). Спектр образца, полученный при замораживании в отсутствии внешнего поля (г), отличается от всех спектров, замороженных в поле.

5. Основные результаты и выводы

1. Исследован образец феррофлюида на основе наночастиц магнетита в диметилсульфоксиде методом ЭМР в диапазоне температур 120-300 К;
2. Показали, что при понижении температуры в спектрах ФМР наблюдается уширение линии, соответствующее неполному усреднению неоднородностей локального резонансного поля для ансамбля магнитных наночастиц. В области температур 140-150 К обнаружено изменение пиковой ширины и интенсивности сигнала поглощения, связанное с затвердеванием ДМСО.
3. Изучение влияния магнитного поля на характер замерзания феррофлюида показало, что, хотя магнитное поле не приводит к агломерации или разрушению феррофлюида, при замораживании во внешнем магнитном поле наблюдается изменение магнитной анизотропии образца, что может быть зарегистрировано в эксперименте ФМР как изменение формы линии поглощения при повороте ампулы с замороженным образцом.

Список литературы

1. Genc S., Derin B. Synthesis and rheology of ferrofluids: A review // Curr. Opin. Chem. Eng. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 3. P. 118–124.
2. Kirillov V.L. et al. Dimethylsulfoxide as a media for one-stage synthesis of the Fe₃O₄-Based ferrofluids with a controllable size distribution // Mater. Chem. Phys. Elsevier, 2019. Vol. 225, № December 2018. P. 292–297.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество / ed. Салецкая О.В. Москва: Физматлит, 2019.
4. Lu A.-H. et al. Nanoengineering of a Magnetically Separable Hydrogenation Catalyst // *Angew. Chemie Int. Ed.* 2004. Vol. 43, № 33. P. 4303–4306.
5. Gupta A.K., Gupta M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications // *Biomaterials.* 2005. Vol. 26, № 18. P. 3995–4021.
6. Hyeon T. Chemical synthesis of magnetic nanoparticles // *Chem. Commun.* 2003. Vol. 3, № 8. P. 927–934.
7. Lu A.-H., Salabas E.L., Schüth F. Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application // *Angew. Chemie Int. Ed.* 2007. Vol. 46, № 8. P. 1222–1244.
8. Büscher K. et al. Nanoparticle Composition of a Ferrofluid and Its Effects on the Magnetic Properties // *Langmuir.* 2004. Vol. 20, № 6. P. 2435–2444.
9. Auzans E. et al. Synthesis and properties of Mn-Zn ferrite ferrofluids // *J. Mater. Sci.* 1999. Vol. 34, № 6. P. 1253–1260.
10. Hong R.Y. et al. Rheological properties of water-based Fe₃O₄ ferrofluids // *Chem. Eng. Sci.* 2007. Vol. 62, № 21. P. 5912–5924.
11. Yang Z. et al. Crystallization behavior of poly(ε-caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites // *J. Appl. Polym. Sci.* 2010. Vol. 116, № 5. P. 2658–2667.
12. Фертман В.Е. Магнитные жидкости, справочное пособие. Минск: Выш. шк., 1988.
13. Дзюба С.А. Основы магнитного резонанса, учебное пособие.

Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.

14. Слинкин А.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В ИССЛЕДОВАНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ // УСПЕХИ ХИМИИ. 1968. Vol. XXXVII, № 8. P. 1521–1543.
15. Michele O. et al. Magnetization experiments on frozen ferrofluids // J. Phys. Condens. Matter. 2004. Vol. 16, № 3. P. 427–443.