

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

По специальности 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Студента(ки) 4 курса факультета нано- и биомедицинских технологий

Шамсутдиновой Елизаветы Сергеевны

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПО СПЕКТРУ
ОТРАЖЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ
МОДЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АГЛОМЕРАТОВ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Научный руководитель

Доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.Э. Постельга

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Заслуженный деятель науки РФ,
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

Введение. Взаимодействие электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне с магнитной жидкостью описывается теорией динамического намагничивания однодоменной частицы во внутреннем поле анизотропии и внешнем намагничивающем поле, начало которой положено в работах [1, 2]. Это подтверждено экспериментально в работе [3], в которой описано влияние температуры на коэффициент отражения электромагнитной волны от магнитной жидкости. Также в данной работе были согласованы между собой экспериментальные и расчетные данные. Однако авторы [3] не учитывали влияние агломератов, которые образовывались под действием внешнего магнитного поля. Учет агломератов должен приводить к более точному теоретическому описанию взаимодействия магнитной жидкости с электромагнитной волной СВЧ диапазона и, соответственно, к увеличению точности определения параметров [4]. Диапазон значений магнитных полей, при которых необходимо учитывать пространственное распределение агломератов магнитных частиц, а также их геометрические размеры, представляет интерес ввиду необходимости проведения измерения зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне от частоты в условиях ферромагнитного резонанса. Необходимо отметить, что ферромагнитный резонанс наблюдается при значениях индукции магнитного поля, при которых магнитные частицы образуют агломераты.

Решение уравнений, описывающих характеристики электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе, заполненном магнитной жидкостью, возможно только численными методами, при этом решение приходится искать в комплексной плоскости. Следовательно, строгий электродинамический расчет параметров структуры, состоящей из магнитной жидкости и агломератов ферромагнитных частиц, довольно затруднителен.

Правомерность использования, обычно применяемого «одномодового» приближения [5] в рассматриваемом нами случае может быть вполне обоснованным вследствие малости размеров агломератов, которые не

превышали нескольких микрон, по сравнению с длиной волны электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне. Обоснованием использования такого приближенного метода можно считать также согласование результатов расчета и эксперимента. Для учета распределения агломератов вдоль волновода восьмимиллиметрового диапазона длин волн применялся метод матриц передачи.

Целью бакалаврской работы являлось определение параметров магнитной жидкости с учетом наличия в её объеме периодически расположенных агломератов.

Бакалаврская работа содержит 7 глав:

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ
2. ВИЗУАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ АГЛОМЕРАТОВ В ОБЪЕМЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ
3. ДИНАМИКА АГЛОМЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СЛОЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ
5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ
6. РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ. Магнитные жидкости представляют собой коллоидные растворы магнитных частиц размером от 5 до 50 нм диспергированных в жидком носителе, который может быть полярным или не полярным.

Магнитные частицы необходимо стабилизировать, чтобы избежать агломерации. Существуют два вида стабилизации магнитных жидкостей, в зависимости от способа стабилизации — ПАВ-содержащие МЖ и ионные МЖ, в которых стабилизация магнитных наночастиц происходит при помощи поверхностно-активных веществ или за счет поверхностного заряда, соответственно.

В настоящее время магнитные жидкости получают физическим или химическим способом. В первом способе, порошок из магнитных частиц микронного размера, смешивают с растворителем и диспергирующим веществом и измельчают в шаровой мельнице в течение нескольких недель. Но наиболее часто используемым способом является химическое осаждение. Смешиваются FeCl_2 , FeCl_3 и вода. Совместное осаждение происходит с добавлением гидроксида аммония, а затем система подвергается различным способам пептизации, магнитной сепарации, фильтрации и, наконец, разведению.

Свойства магнитной жидкости определяются совокупностью характеристик, входящих в нее компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которые можно в довольно широких пределах изменять параметры магнитной жидкости.

2. ВИЗУАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ АГЛОМЕРАТОВ В ОБЪЕМЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ. Процесс агломерации в объеме магнитной жидкости сильно изменяет ее гидродинамические свойства, поэтому знание характеристик этого процесса важно при практическом использовании магнитных жидкостей. [6] Теоретические методы анализа на данный момент не позволяют описать процесс агломерации магнитной жидкости. Но образование агломератов исследовалось экспериментально с помощью оптических методов в работах [7,8]. С помощью оптического микроскопа были получены фазовые диаграммы состояний магнитной жидкости в магнитном поле при различных температурах [8].

3. ДИНАМИКА АГЛОМЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. Гидродинамические свойства магнитных жидкостей сильно изменяются в процессе агломерации магнитных частиц [9]. В работе [9] рассматривалась динамика образования агломератов в магнитной жидкости, магнетитовые частицы которой имеют нанометровые размеры.

Цель работы заключалась в исследовании динамики изменения длин агломератов наночастиц магнитной жидкости при изменении величины индукции приложенного магнитного поля.

В результате измерений были определены пороговые значения индукции магнитного поля:

2.5 мТ — значение индукции магнитного поля, при котором появлялась возможность наблюдать нитевидные агломераты средствами оптической микроскопии, средние значения длин которых составили 5 μm ;

0.1 Т — значение индукции магнитного поля, при котором наблюдалось резкое увеличение среднего значения длин агломератов.

При достижении определенных значений индукции магнитного поля агломераты приобретали сигарообразную форму. Дальнейшее увеличение магнитного поля сопровождалось образованием новых агломератов [9].

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СЛОЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ. Для измерения коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне применялся мостовой метод [10, 11] с использованием двойного волноводного тройника, в измерительное плечо которого помещался слой магнитной жидкости, полностью заполняющий поперечное сечение волновода. На рисунке 1 изображена принципиальная схема радиоинтерференционной установки, использовавшейся для измерений. Источником сигнала служил СВЧ-генератор качающейся частоты 8-мм диапазона 1, включенный через вентиль 2 в Н-плечо двойного волноводного тройника 3. Мощность сигнала, поступающего в Н-плечо тройника, контролировалась с помощью полупроводникового СВЧ-диода 4, установленного в этом плече. В результате интерференции волн, отраженных от нагрузки в опорном плече и от слоя магнитной жидкости 5 в измерительном плече, помещенной между

двумя тонкими, «прозрачными» для электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне диэлектрическими прокладками, препятствующими растеканию магнитной жидкости по волноводу, в Е-плече двойного волноводного тройника формируется разностный СВЧ-сигнал. Для регулировки фаз и значений амплитуды интерферирующих сигналов в опорном и измерительном плечах двойного волноводного тройника расположены подвижные короткозамыкающие поршни 6, 8 и аттенюатор 7. Сигнал, протектированный с помощью СВЧ-диода 9, расположенного в Е-плече волноводного тройника, поступает через аналого-цифровой преобразователь 10 в компьютер 11, где сравнивается с сигналом, поступающим с СВЧ-диода 4. Созданная таким образом резонансная интерференционная система позволяет обеспечить чувствительность, достаточную для регистрации информационного сигнала.

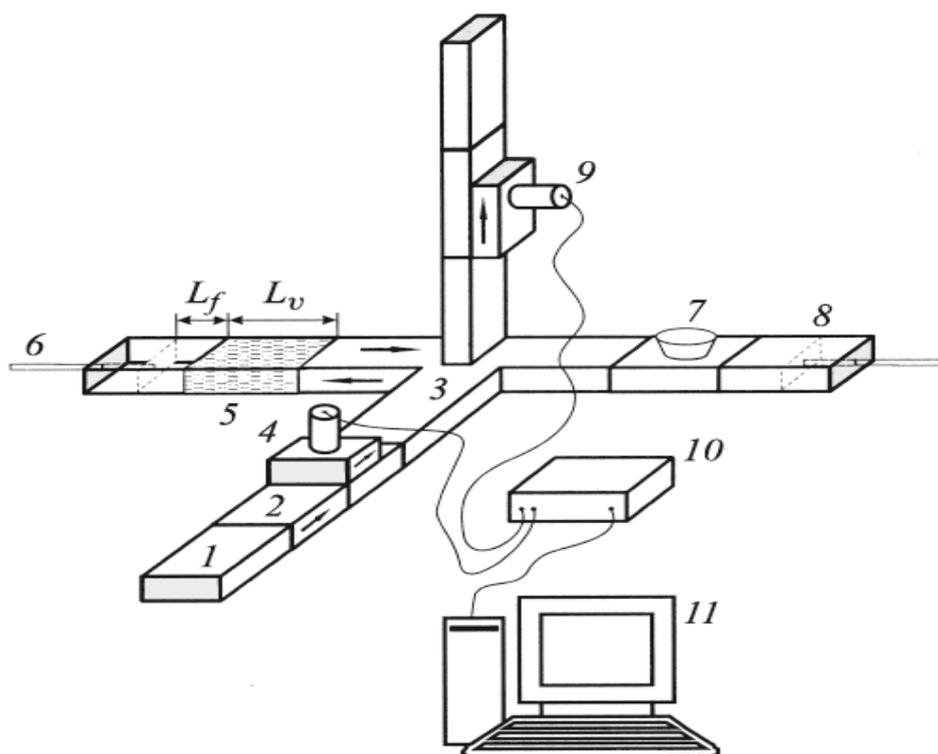


Рисунок 1. Схема эксперимента по исследованию температурной зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне от слоя магнитной жидкости.

Были измерены частотные зависимости коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости при приложении магнитного поля с

напряженностью 11.5 кЭ при температурах 253 и 293 К. Толщина слоя составляла 20 мм, расстояние до короткозамыкающего поршня 175 мм.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ. Сумму квадратов отклонений экспериментальных значений коэффициента отражения $R_{exp}(\omega)$ от теоретических $R(\omega_i, d, \varphi, \varepsilon, tg \delta)$ можно записать в виде функционала (1).

Расчет параметров производится в ходе решения обратной задачи. Необходимо найти такие значения параметров, при которых функция невязки (1) будет иметь наименьшее значение.

$$S(d, \varphi, \varepsilon, tg \delta) = \sum_{i=1}^n (R(\omega_i, d, \varphi, \varepsilon, tg \delta) - R_{exp}(\omega_i))^2, \quad (1)$$

Здесь d – диаметр феррочастиц, φ – объемная доля твердой фазы магнитной жидкости – искомые параметры обратной задачи, ε – диэлектрическая проницаемость магнитной жидкости и $tg \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

$$R = \frac{\gamma_0^2 sh(\gamma L_f)(1 + e^{-2\gamma_0 L_v}) - 2\gamma \cdot \gamma_0 ch(\gamma L_f) e^{-2\gamma_0 L_v} - \gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 - e^{-2\gamma_0 L_v})}{\gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 + e^{-2\gamma_0 L_v}) + 2\gamma \cdot \gamma_0 ch(\gamma L_f) + \gamma^2 sh(\gamma L_f)(1 - e^{-2\gamma_0 L_v})}, \quad (2)$$

где γ_0 – постоянная распространения СВЧ волны в пустой части волновода, γ – постоянная распространения в участке волновода, полностью заполненном магнитной жидкостью, L_v – расстояние до короткозамыкающего поршня, L_f – толщина слоя магнитной жидкости, R_{exp} – экспериментальные значения (n шт.) коэффициента отражения для различных частот ω_i и температур, R – теоретически рассчитанный коэффициент отражения для различных частот ω_i и температур.

Наличие агломератов учитывается в постоянной распространения на участке волновода, полностью заполненном магнитной жидкостью.

Для учета распределения агломератов по поперечному сечению (рисунок 12) будем использовалась теория возмущений.

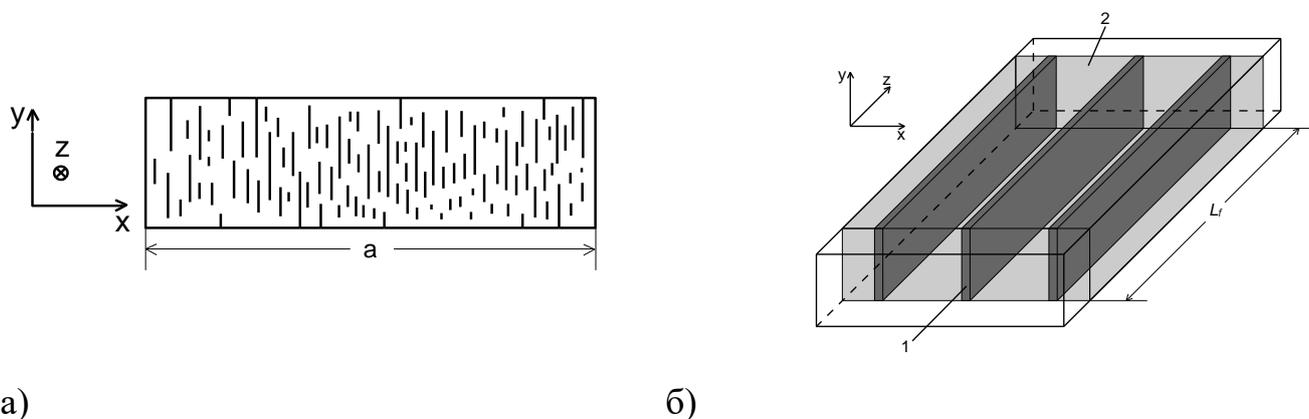


Рисунок 2. а) Схематичное изображение агломератов в поперечном сечении волновода, a – длина широкой стенки волновода; б) схематичное изображение агломератов, протяженных вдоль направления распространения СВЧ излучения, вдоль оси z , 1 – агломераты магнитных частиц в магнитной жидкости 2, L_f –толщина слоя магнитной жидкости.

Для учета распределения агломератов вдоль использовался метод матриц передач.

6. РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. Искомыми являются значения параметров магнитной жидкости, при которых функция невязки (1), приобретает минимальное значение.

Для определения распределения агломератов слой магнитной жидкости при приложении магнитного поля напряженностью 11,5 кЭ исследовался с использованием оптического микроскопа HIROX KH-7700.

Было сделано предположение, что распределение агломератов на достаточно небольшом участке волновода в рамках теории возмущения можно заменить одним агломератом, размер которого будет соответствовать площади агломератов в данном сечении волновода (рисунок 3). Поперечное сечение волновода представлялось в виде периодической маски, каждый элемент которой представлял собой участок волновода площадью $step_x \cdot b$ (b – высота волновода). Если в элементе хранится значение 1, значит добавляем агломерат площадью $d \cdot b$ (d –толщина агломерата), если 0 – агломерата нет.

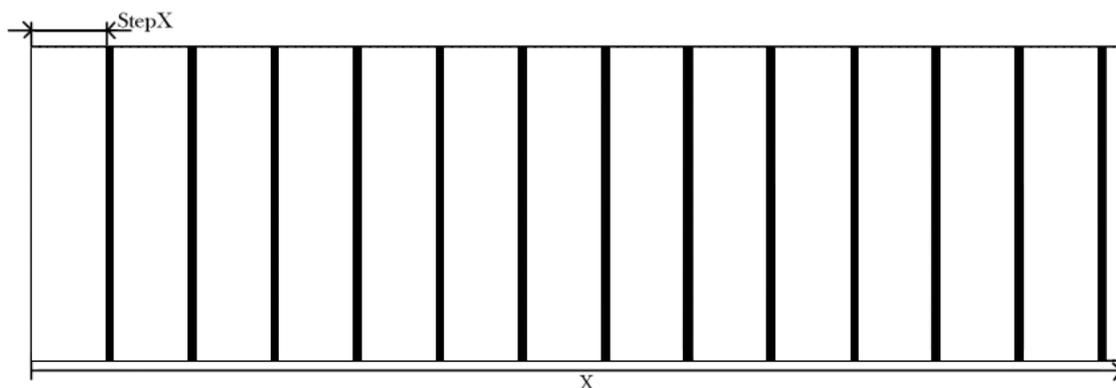


Рисунок 3. Периодическое распределение агломератов внутри волновода.

Путем решения обратной задачи численными методами, была рассчитана эффективная постоянная распространения электромагнитной волны с учетом распределения агломератов вдоль направления распространения электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне.

В итоге, методом последовательных приближений, были найдены искомые значения параметров, при которых функция (1) принимает наименьшее значение.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. На рисунке 4 показаны частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ диапазона для схемы измерений при температурах 253 и 293 К. Кривая 1 рассчитана без учета агломератов, кривая 2 рассчитана с учетом агломератов, образующихся при величине внешнего магнитного поля 11.5 кЭ, распределенных по объему магнитной жидкости, кривая 3 – экспериментальные данные.

В результате решения обратной задачи были определены средний диаметр магнетитовых частиц (8.05 нм), объемная доля твердой фазы (0.128), диэлектрическая проницаемость (3.58) и тангенс угла диэлектрических потерь (0.051).

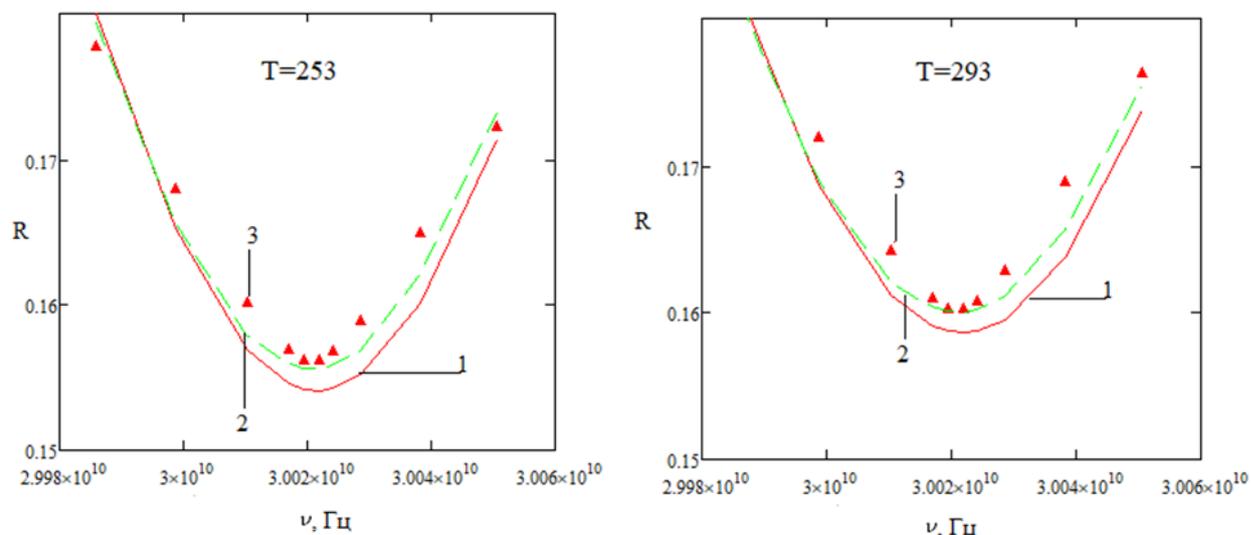


Рисунок 4. Частотные зависимости коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости при температуре 253 и 293 К: 1 – частотная зависимость, рассчитанная без учета агломератов; 2 – частотная зависимость, рассчитанная с учетом агломератов, распределенных по объему магнитной жидкости; 3 – экспериментальные данные.

Закключение. В данной бакалаврской работе было показано, что с помощью учета периодического распределения агломератов внутри волновода, можно рассчитать параметры магнитной жидкости, которые лучше согласуются с экспериментом по сравнению с моделью без учета агломератов в объеме магнитной жидкости. Также полученные результаты схожи с результатами для пространственного распределения агломератов и экспериментальными данными.

Главным достоинством данной модели является меньшее время расчета по сравнению с моделью с пространственным распределением агломератов внутри объема магнитной жидкости, для которой время расчета составило 5 часов, а для модели с периодическим распределением – 5 минут, что в 60 раз меньше.

Недостаток данной модели в том, что с уменьшением объемной доли твердой фазы, принявшей участие в агломератах, при количестве периодически расположенных агломератов N меньше 19, данное упрощение будет вносить значительную погрешность.