

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
РАСТВОРОВ И КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**  
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ  
ПОДГОТОВЛЕННОЙ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
(ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса 4ТЭ группы  
направления 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи  
факультета nano- и биомедицинских технологий

Гулманова Эльдара Эркеновича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание



\_\_\_\_\_  
подпись, дата

С.А. Сергеев

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов – 2017

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность задачи**

Научно-технический прогресс в создании современных электронных и микроэлектронных устройств в настоящее время напрямую зависит от тех материалов, из которых изготавливается активная исполнительная часть прибора. Эволюция технических приборов и устройств, переход их на новый уровень требует увеличения производительности электрических аппаратов, производства быстродействующих управляющих и вычислительных комплексов, регулирующих систем и узлов электронного контроля. Изобретение, разработка и производство высокотехнологичных систем в настоящее время возможно с использованием синтеза или модификации различных материалов и структур. В данной задаче особую роль играет определение электрофизических параметров синтезированных объектов.

В зависимости от электрофизических свойств, конкретный материал и вещество имеет уникальный набор электрических характеристик и параметров. Точное определение электрофизических параметров материала позволяет оценить область его конкретного применения. Помимо этого, сам метод определения может использоваться для повышения уровня контроля качества материалов во время производства.

Одним из основных электрофизических параметров материала является его диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость вещества отображает степень ослабления электромагнитного поля, прошедшего через исследуемый образец, тем самым, количественно характеризуя степень поляризации диэлектрика в электрическом поле. Величина относительной диэлектрической проницаемости вещества определяется механизмами поляризации. Значение диэлектрической проницаемости в большой степени зависит от агрегатного состояния вещества. При переходах исследуемого материала из одного состояния в

другое сильно изменяется плотность вещества, а также его изотропность и вязкость.

Изучение электрофизических параметров материалов, в частности диэлектрической проницаемости, позволяет снять ограничения по агрегатным состояниям объектов. Определение диэлектрической проницаемости возможно как для газов, жидкостей, так и для твердых материалов и структур.

Таким образом, измерение диэлектрических свойств веществ позволяет получать информацию о параметрах и свойствах, которые являются ключевыми при проектировании во многих областях электротехники и микроэлектроники. Так, например, потери в изоляции электромагнитного волновода, частота электрического резонатора, значение импеданса подложки напрямую зависят от их диэлектрических свойств. Подобные исследования полезны для улучшения и усовершенствования свойств поглотителей, ферритов и схем компоновки. Обладание конкретными знаниями диэлектрических свойств материалов и веществ дает преимущества их в применении в области промышленной микроволновой обработки керамики, пластика или продуктов питания.

Возможность оценки электрофизических свойств и параметров материалов и структур является огромным преимуществом при выполнении научно-исследовательских работ. Разработка и отладка методов измерения, создания принципов построения измерительных приборов является актуальной на сегодняшний день.

В данной работе будет произведен анализ и описание различных методов определения электрофизических параметров материалов, а так же будут получены конкретные значения параметров на практике.

## **Цель работы:**

Получение и исследование свойств водных растворов этилового спирта, нитрата свинца, красителя родамина, коллоидов сульфида кадмия, наночастиц магнетита, водотопливных эмульсий и нановолокон поликапралактона, определение границ применимости моделей эффективных сред.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Получение необходимых растворов и коллоидных систем с определенными значениями концентраций веществ и размеров частиц.
2. Теоретическое исследование диэлектрической проницаемости различных веществ с использованием известных моделей эффективных сред.
3. Калибровка модели расчета диэлектрической проницаемости по экспериментальным данным для веществ с известной диэлектрической проницаемостью.
4. Определение диэлектрической проницаемости на основе решения обратной задачи по спектрам отражения электромагнитной волны в волноводе, полностью заполненном исследуемым веществом.
5. Сравнительный анализ результатов теоретического расчета по моделям эффективных сред и вычисленных по экспериментальным данным, определение областей применения моделей.

**Новизна исследований**, проведенных в ходе работы, состоит в следующем:

1. Впервые проведен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью волноводного метода измерений и моделей Максвелла Гарнетта, Бруггемана, Оделевского и К. Лихтенеккера.
2. Определены области применения моделей эффективных сред для исследуемых материалов.
3. Получены количественные характеристики водных растворов этилового спирта, нитрата свинца, красителя родамина, коллоидов

сульфида кадмия, наночастиц магнетита, водотопливных эмульсий и нановолокон поликапралактона.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Выработаны конкретные подходы и рекомендации по определению диэлектрической проницаемости растворов и коллоидных систем. Ряд результатов работы используется в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям электроника, материаловедение и технология материалов и управление качеством.
- 2) Определены области применения моделей эффективных сред, позволяющие определить диэлектрическую проницаемость системы.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов. Основные применяемые формулы и модели используют доказанную теорию.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) На основании исследований водных растворов этилового спирта разных концентраций показано, что волноводный метод может быть использован для определения диэлектрической проницаемости водных растворов, коллоидов и эмульсий.
- 2) На основании данных, полученных волноводным методом и по моделям эффективных сред, позволило определить применимость конкретных эффективных моделей для каждого типа веществ: модель эффективной среды Оделевского подходит для определения диэлектрической проницаемости растворов, модель эффективной среды Максвелла Гарнетта подходит для определения диэлектрической проницаемости коллоидов, модель эффективной среды К. Лихтенеккера подходит для определения диэлектрической проницаемости эмульсий.

3) С использованием волноводного СВЧ-метода и разработки алгоритма решения задачи были получены численные значения диэлектрической проницаемости для растворов и коллоидных систем разных концентраций.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

- Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2012»., г. Москва.
- Электроника и микроэлектроника СВЧ. III Всеросс. конф: Сборник трудов. – СПб: ООО «Технолит», 2014
- I Городской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Город как среда обитания», 12 декабря 2012. – Саратов
- XI Междунар. науч.- техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012.
- «Студенческая наука: перекрестки теории и практики». I Внутривузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов. – Саратов: 2013 г.
- III Всеросс. конф.: – СПб: ООО «Технолит», 2014 г.
- Всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника СВЧ». 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2017 г., Санкт-Петербург.
- VI Международная конференция «Композит-2013». «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология». 2013 г., г. Саратов.
- Поволжская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Проблемы развития рискогенных систем». 2013 г., г. Саратов.
- Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». 2013 г, 2014 г., 2015 г., Саратов.

- International conference for young scientists «Presenting Academic Achievements to the World». Natural Science., 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, Saratov.

**Личный вклад автора** выразился в проведении экспериментальных работ, в создании теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, проведении математических расчетов и анализе полученных результатов.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов научных работ, 3 учебных и методических пособия.

### **Структура и объем.**

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 105 страницах, содержит 31 рисунок и список литературы из 167 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении сформулированы цели работы, описывается актуальность темы, вынесены главные положения на защиту, отображена структура и объем работы.

В первом разделе представлен критический анализ современного состояния методов исследований электрофизических параметров и структур материалов, которые используются в СВЧ-электронике. Показана значимость определения диэлектрической проницаемости различных веществ.

Во втором разделе проведен литературный обзор известных СВЧ-методов определения электрофизических параметров материалов и структур, в том числе и диэлектрическую проницаемость.

В третьем разделе приведены математические методы расчёта диэлектрической проницаемости многокомпонентных систем. Описаны математические формулы, а так же область применения данных моделей для определения эффективной диэлектрической проницаемости.

В четвертом разделе представлена экспериментальная часть работы. Были разработаны алгоритмы на основе существующих моделей для расчета значений эффективной диэлектрической проницаемости. Были получены численные данные для конкретных растворов и коллоидных систем. На практике были синтезированы и получены растворы и коллоидные системы, которые были исследованы с помощью волноводного СВЧ-метода. Результаты волноводного СВЧ-исследования были использованы для определения диэлектрической проницаемости каждого раствора и коллоидной системы. Для этого был разработан алгоритм расчета диэлектрической проницаемости по полученным значениям коэффициентов отражения и ослабления. После этого был произведен сравнительный анализ результатов, которые были получены используя волноводный СВЧ-метод и метод теоретического расчета эффективных значений диэлектрической проницаемости.

В заключении представлены ключевые результаты и сформулированы выводы работы.

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Диэлектрическая проницаемость представляет собой один из фундаментальных электрофизических свойств различных материалов и структур. Получение значений диэлектрической проницаемости материала, в том числе изучение изменения комплексной диэлектрической проницаемости при изменении частоты и других параметров, имеет важное техническое и научное значение. Диэлектрические свойства материала определяют его перспективность в дальнейшем применении в той или иной технологической области.

## СВЧ-МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

За последние годы было проведено и разработано большое количество различных СВЧ-методов для изучения электрофизических параметров различных материалов в СВЧ-диапазоне. Использование этих методов является важной частью в современной промышленности. Эти методы применяются при создании электронных приборов и систем, разработке новых компонентов, а также для синтеза новых материалов и веществ с уникальными свойствами и характеристиками. В настоящее время СВЧ-методы измерения нашли свое применение благодаря важным преимуществам по сравнению с другими методами. СВЧ-методы измерения являются бесконтактными, без разрушительными методами, позволяют исследовать свойства веществ в широком диапазоне температур, изучать как твердые материалы, так и жидкие растворы, коллоидные и эмульсионные системы. В тоже время СВЧ-методы обладают и рядом недостатков, таких как: высокая стоимость приборов для измерения, а так же получение косвенное определение необходимых параметров при получении СВЧ-характеристик веществ и материалов.

Одна из сложностей, возникающая при исследовании структур известными методами заключается в том, что, как правило, методы определяют не более двух параметров исследуемых структур, при наличие гораздо большего количества неизвестных параметров изучаемых веществ и материалов.

Все известные и используемые СВЧ-методы измерения характеристик структур и материалов можно разделить на несколько ключевых видов: волноводный метод измерения электрофизических параметров материалов, резонансный метод измерения электрофизических параметров материалов, балансный метод измерения электрофизических параметров материалов, волноводно-диэлектрический резонансный метод измерения электрофизических параметров материалов, автодинный метод измерения электрофизических параметров материалов, использование

синхронизированных генераторов для измерения электрофизических параметров материалов, использование ближнеполевой СВЧ-микроскопии для измерения электрофизических параметров материалов, использование периодических структур для СВЧ измерения электрофизических параметров материалов.

## МЕТОД РАСЧЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МНОГОКОМПАНЕНТНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД

### Модель Максвелла Гарнетта

В начале XX века ученым Дж. К. Максвеллом Гарнеттом была выдвинута теория для расчётов диэлектрической проницаемости гетерогенных систем, образованными редкими изолированными включениями в матрицу[1]. Для описания данной модели необходимо рассмотреть среду-матрицу с некоторым значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . В данной среде находятся редкие изолированные включения в виде шариков с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ . Ограничим несколько включений воображаемой сферой

Объемная доля включений. Значение индекса  $k$  нумерует включения. Из равенства правых частей можно получить выражение для значения эффективной диэлектрической проницаемости в подобной модели. Это выражение называется формулой Максвелла-Гарнетта:

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon} = f_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon}{\epsilon_1 + 2\epsilon} \quad (1)$$

### Модель Бруггемана

В данной модели рассматривается двухкомпонентная гетерогенная система, в которой существуют факторы заполнения  $f_1$  и  $f_2$ . Факторы  $f_1$  и  $f_2$  близко расположены друг к другу, вследствие чего невозможно разделить

среду-матрицу и включенный компонент в матрицу. В модели представления это выглядит как среда, в которой схематические шары накладываются друг на друга. Подобная гетерогенная система хорошо описывает процессы в твердых телах для такой гетерогенной системы было предложено ученым Д.А.Г. Бруггеманом приближение эффективной среды. Данная модель известна как теория самосогласованного поля [2].

$$f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_1} + f_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_2} = 0 \quad (2)$$

Данная формула называется формулами Бруггемана.

### Модель Оделевского

Вышеописанные методы хорошо описывают модели для суспензий и твердых тел (модели Максвелла-Гарнетта и Бруггемана соответственно). Для определения эффективной диэлектрической проницаемости растворов в 1909 была выведена формула Л.В. Лоренц-Лоренца, которая применима для неупорядоченной смеси двух компонентов не взаимодействующих друг с другом, то есть без образования химической реакции между собой.

Эффективная диэлектрическая проницаемость рассчитывалась следующим образом:

$$\varepsilon_z = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_1 y_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 + \frac{1 - y_2}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – значения диэлектрической проницаемости первого и второго компонента раствора,  $y_1$ ,  $y_2$  – объемные концентрации первого и второго компонента раствора,  $\varepsilon_z$  – эффективное значение диэлектрической проницаемости раствора.

В 1951 году модель Л.В. Лоренц-Лоренца была модернизирована ученым В. Н. Оделевским. Выражение для эффективной диэлектрической проницаемости пробрало следующий вид:

$$\varepsilon_z = a \sqrt{a^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}, \quad (4)$$

где  $a = \frac{(3y_1-1)\varepsilon_1 + (3y_2-1)\varepsilon_2}{4}$  (5),  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – значения диэлектрической проницаемости первого и второго компонента раствора,  $y_1, y_2$  – объемные концентрации первого и второго компонента раствора,  $\varepsilon_z$  – эффективное значение диэлектрической проницаемости раствора.

## 2.4 Модель К. Лихтенеккера

В данной модели для расчета эффективной диэлектрической проницаемости смеси предполагается, что ее отдельные компоненты не вступают друг с другом в химические реакции, т.е. смесь является физической. Составляющие смеси расположены в пространстве хаотично. Модель впервые была введена ученым К. Лихтенеккером в 1926 году. Она подходит для расчета диэлектрической проницаемости эмульсий т.е. в дисперсной системе, состоящей из микроскопических капель жидкости (дисперсной фазы), распределенных в другой жидкости (дисперсионной среде).

Эффективная диэлектрическая проницаемость рассчитывается следующим образом:

$$\log \varepsilon_\Sigma = \sum_i y_i \log \varepsilon_i \quad (6),$$

где  $\varepsilon_\Sigma$  – эффективное значение диэлектрической проницаемости системы,  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемости  $i$ -го компонента,  $y_i$  – объемная концентрация  $i$ -го компонента.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ И КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ

### Используемые вещества

В данной работе применялись водные суспензии наночастиц сульфида кадмия концентрацией 20 мг/мл, 2 мг/мл и 0,2 мг/мл, а также суспензии с наночастицами магнетита.

Помимо этого в данной работе применялись растворы нитрата свинца концентрацией в 20 мг/л, 2 мг/л и 0,2 мг/л, с наночастицами магнетита. Растворы получались путем смешивания дистиллированной воды и раствора  $Pb(NO_3)_2$  концентрацией  $10^{-3}$  моль/л.

Водные суспензии были получены с концентрацией магнетита 3 мг/мл. Для получения суперпарамагнитных наночастиц магнетита использовался метод, представляющий собой модификацию метода, ранее предложенного Рене Массартом [3].

В данной работе были исследованы диэлектрические свойства водных растворов этилового спирта в различных концентрациях. Растворы получались путем смешивания дистиллированной воды и этилового спирта со следующими процентными содержаниями спирта в воде: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%.

Кроме того, были исследованы свойства водных растворов родамина. В этой работе будет рассмотрен родамин 6Ж, а точнее водные растворы родамина различной концентрации (1 мг/мл, 0,5 мг/мл, 0,1 мг/мл и 0,05 мг/мл). Родамин 6Ж – краситель красного цвета. Даже при минимальных концентрациях родамина в воде порядка 0,05 мг/мл раствор имеет ярко красный цвет.

В данной работе были исследованы электросформированные пленки из поликапролактона, которые были модифицированы ядрами из карбоната кальция и наночастицами магнетита.

В данной работе для исследования получены водотопливные эмульсии на основе бензина/керосина эмульсии, которые оставались равномерными (не

происходило расслоения на углеводород и воду) в течение суток с концентрациями углеводорода 95, 97, 99 и 99,5% от общего объёма. Эмульсии получали объёмами по 40 мл.

**Расчёт диэлектрической проницаемости исследуемых веществ с использованием модели Максвелла Гарнетта, Оделевского, Бруггемана и К. Лихтенеккера.**

Ниже приведены табличные данные диэлектрической проницаемости используемых веществ [4]:

Таблица 1. Табличные значения диэлектрической проницаемости различных веществ

	Дистиллированная вода	CdS	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Этиловый спирт
Значение диэлектрической проницаемости $\epsilon$ при 25 <sup>0</sup> C	81	9,3	37,7	6	24,3
	Ca <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ПКЛ	Керосин		
	12	8	1,8		

Результаты теоретического расчета диэлектрической проницаемости представлены ниже:

Таблица 2. Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов спирта.

	вода 100%/ спирт 0%	вода 90%/ спирт 10%	вода 80%/ спирт 20%	вода 70%/ спирт 30%	вода 60%/ спирт 40%	вода 50%/ спирт 50%
Значение диэлектрической проницаемости	81	70,3	62,1	57,6	51,3	50,35

	вода 40%/ спирт 60%	вода 30%/ спирт 70%	вода 20%/ спирт 80%	вода 10%/ спирт 90%	вода 0%/ спирт 100%
Значение диэлектрической проницаемости	46,2	42,5	36,2	29,1	24,6

Таблица 3 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов нитрата свинца с наночастицами магнетита

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,98	80,89	79,94

Таблица 4 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов нитрата свинца

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,66	80,57	79,62

Таблица 5 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов сульфида кадмия с наночастицами магнетита

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,97	80,79	78,97

Таблица 6 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов сульфида кадмия

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл

Значение диэлектрической проницаемости	80,65	80,47	78,66
--	-------	-------	-------

Таблица 7 Значения диэлектрической проницаемости для ПКЛ пленок модернизированных ядрами карбоната кальция и наночастицами магнетита

Процентное содержание Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0%	4 %	5%	6,67%	8,33%	10%	12,5%	20%
Значение диэлектрической проницаемости	9,03	8,73	8,64	8,51	8,37	8,27	8,07	7,48

Таблица 8 Значения диэлектрической проницаемости для водотопливных эмульсий с разным процентным содержанием керосина в воде.

	вода	ТВЭ 0,5%	ТВЭ 1%	ТВЭ 3%	ТВЭ 5%	керосин
Значение диэлектрической проницаемости	81	79,47	77,97	72,26	66,96	1,80

Анализируя полученные результаты можно отметить, что для всех растворов и коллоидных систем с увеличением объемной доли компонента в воде приводит к уменьшению значения диэлектрической проницаемости всей системы в целом. Добавление наночастиц магнетита приводит к увеличению значений эффективной диэлектрической проницаемости. В пленках ПКЛ, модернизированных ядрами карбоната кальция и наночастицами магнетита с увеличением объемной концентрации наночастиц магнетита, значение диэлектрической проницаемости системы уменьшается. Для водотопливных эмульсий увеличение объемной доли керосина в воде ведет к уменьшению значения диэлектрической проницаемости системы.

### **Экспериментальное получение и исследование спектров КСВН**

В данной работе были измерены частотные зависимости коэффициента

стоячей волны по напряжению (КСВН) дистиллированной воды, водной суспензии наночастиц магнетита, дистиллированной воды «загрязненной» солями тяжелого металла  $Pb(NO_3)_2$  и сульфидом кадмия, водной суспензии наночастиц магнетита с добавлением  $Pb(NO_3)_2$  и  $CdS$ , а так же водных растворов этилового спирта и родамина в диапазоне частот  $7,8 \div 10,3$  ГГц.

Водные растворы  $Pb(NO_3)_2$  и  $CdS$  были исследованы в волноводной секции длиной 52 мм. Исследования проводились в интервале температур от  $26^\circ C$  до  $45^\circ C$ . Для изменения температуры исследуемых жидкостей к участку волновода через термопасту были установлены последовательно соединенные резисторы постоянного сопротивления с общим сопротивлением 8 Ом на которые подавался постоянный ток 12 В с возможностью изменения значения силы тока. Контроль изменения температуры проводился с помощью термопары, устанавливаемой на стенку волноводной секции. В ходе проведенной серии исследований, было выяснено, что при изменении температуры зависимость не меняет свой характер, наблюдается снижение значения КСВН при увеличении температуры во всем диапазоне частот.

На рис. 1-2 представлены графики зависимостей КСВН и ослабления от частоты растворов спирта с различной концентрацией воды, а также деионизованной воды в диапазоне частот  $7,8 \div 10,2$  ГГц для волноводной секции длиной 5 мм.

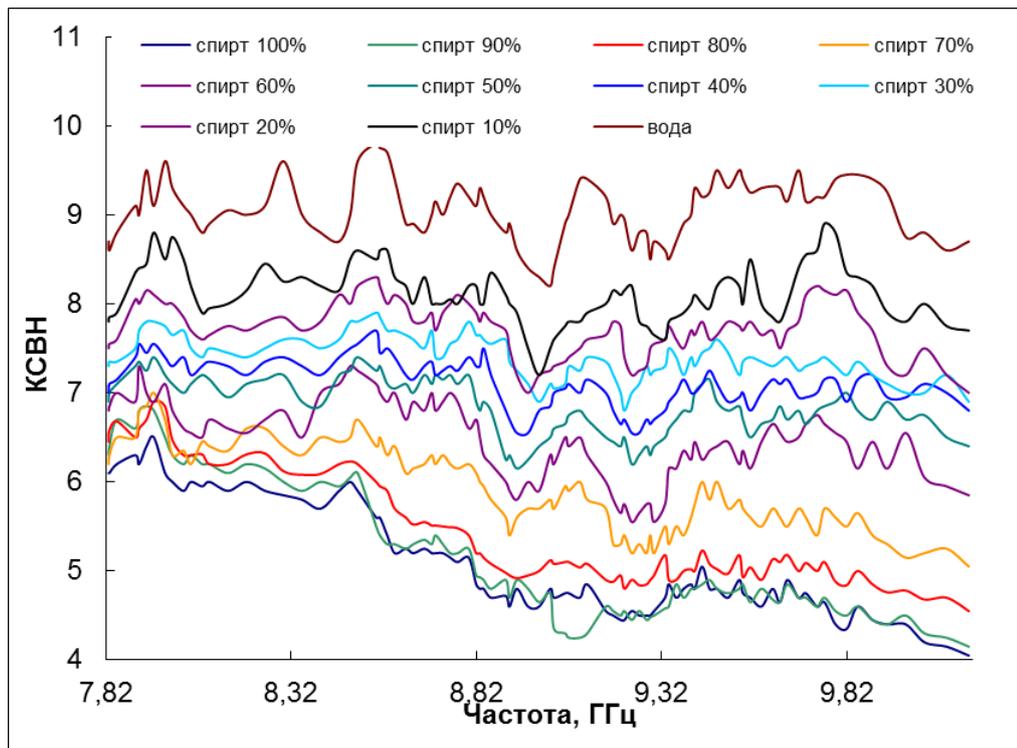


Рис. 1 Зависимости КСВН от частоты для водных растворов этилового спирта разных концентраций

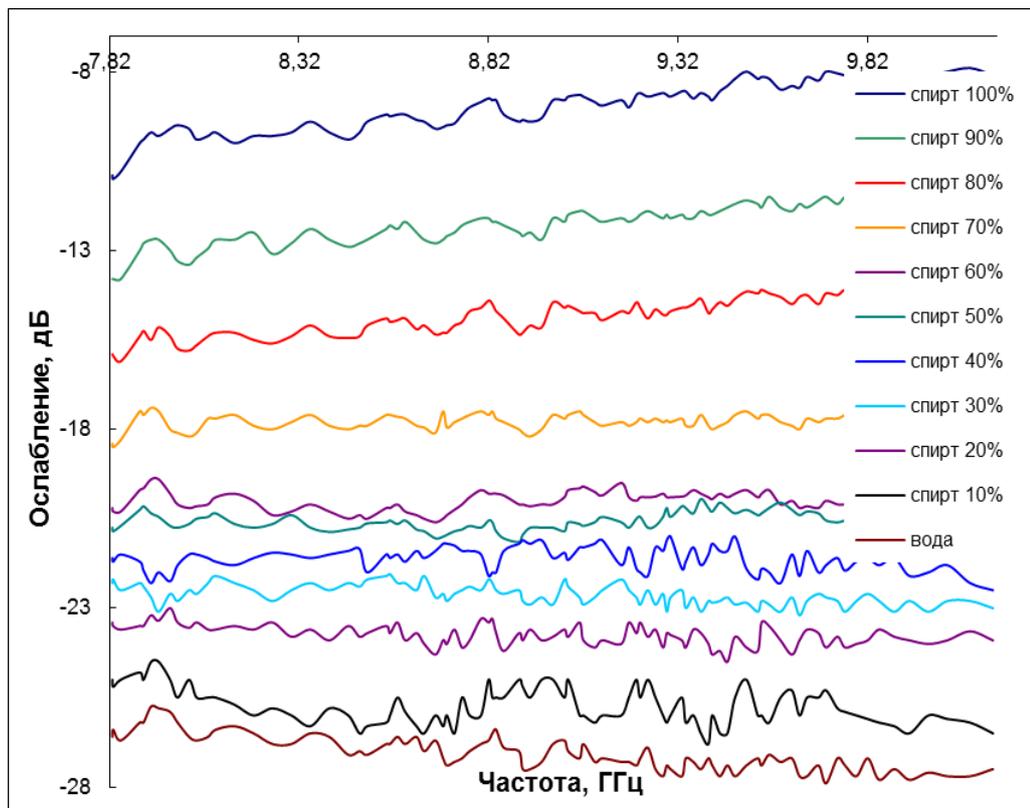


Рис. 2 Зависимости ослабления от частоты для водных растворов этилового спирта разных концентраций

Видно, что при увеличении концентрации воды в растворе значения КСВН увеличивается во всем диапазоне частот: для чистого спирта КСВН составляет  $4 \div 6,3$ , для воды –  $8,2 \div 9,8$ . Наиболее существенно КСВН меняется при изменении концентрации спирта в растворе от 0 до 5 %, а наименее существенно – 90 ÷ 95 %. Ослабление с ростом концентрации воды в растворе также увеличивается: наиболее существенно изменения происходят при увеличении концентрации воды в растворе от 5 до 40 %. По полученным данным были рассчитаны частотные зависимости коэффициента поглощения эмульсиями микроволнового излучения, которые показали, что увеличение массовой доли воды приводит к росту поглощения. Поглощение также растет с увеличением длины волноводной секции.

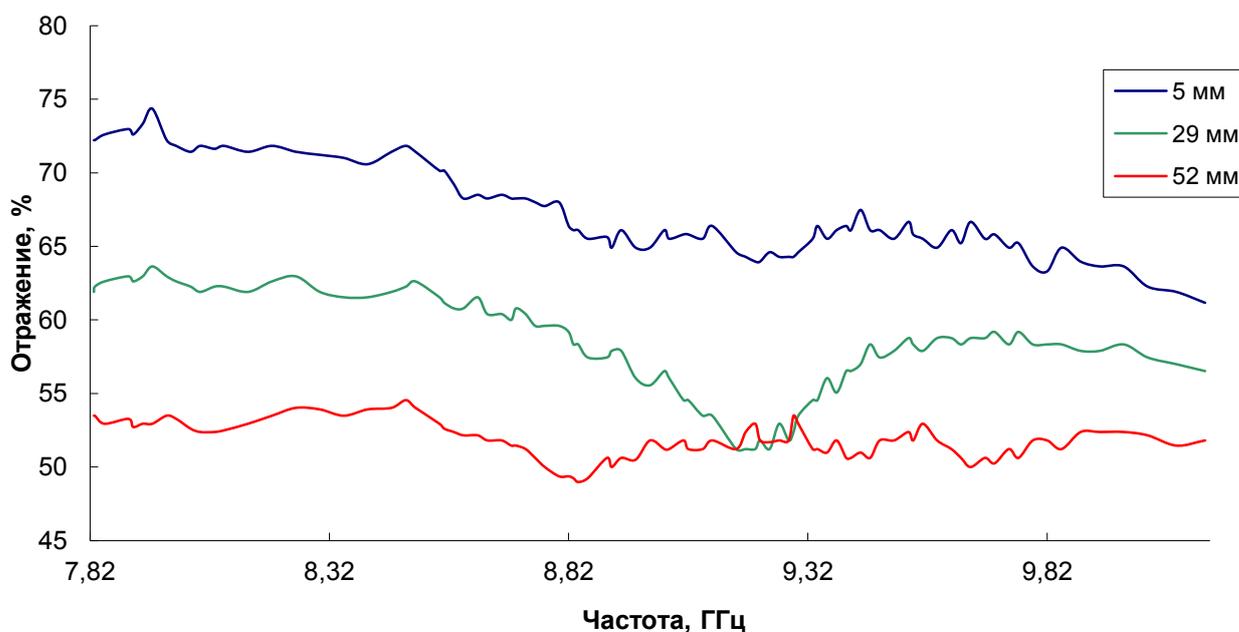


Рисунок 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента отражения от частоты для чистого спирта для различных длин слоя жидкости. По данному графику можно сказать, что с увеличением длины столба жидкости коэффициент отражения уменьшается на всем исследуемом диапазоне частот. Можно заметить также схожий характер изменения

зависимостей, наличие минимумов и максимумов для всех кривых, находящихся на одних и тех же частотах. Так, например, в интервале частот от 7,85 до 8 ГГц находится небольшой пик, который с увеличением длины слоя жидкости смещается вправо, т.е. в более высокочастотную область.

Для исследования свойств водных растворов родамина в эксперименте использовалась волноводная секция, представляющая собой отрезок прямоугольного волновода стандартного сечения длиной 10 мм с тонкими слабопоглощающими пробками, изготовленными из материала, прозрачного для СВЧ излучения, на фланцах, пространство между которыми полностью заполнялось исследуемыми жидкостями.

По полученным зависимостям КСВН и ослабления от частоты для водных растворов родамина бЖ различных концентраций (1 мг/мл, 0,5 мг/мл, 0,1 мг/мл и 0,05 мг/мл), можно заметить, что с ростом концентрации родамина в воде значение КСВН уменьшается, а значение ослабления увеличивается. Увеличение коэффициента ослабления говорит о том, что при увеличении концентрации красителя, через слой жидкости прошла только какая-то часть СВЧ-сигнала, а уменьшение КСВН говорит о том, что меньшая часть сигнала отражается от слоя жидкости при увеличении концентрации красителя. Можно заметить общий характер изменения зависимостей, наличие схожих максимумов и минимумов. На частотном спектре КСВН в диапазоне частот от 8 до 8,3 ГГц можно заметит ярко выраженный минимум, который смещается в более длинноволновую область.

По полученным зависимостям КСВН от частоты для пленок ПКЛ, пленок ПКЛ, модифицированных наночастицами магнетита и для пленок ПКЛ, модифицированных наночастицами магнетита и ядрами карбоната кальция, можно отметить, что на интервале частот от 8,4 до 9,15 ГГц модификация ПКЛ пленок ядрами карбоната кальция снижает значение КСВН, а модификация пленок наночастицами магнетита увеличивает значение КСВН в данном частотном диапазоне.

В эксперименте с водотопливными эмульсиями использовались волноводные секции, представляющие собой отрезки прямоугольного волновода стандартного сечения длиной 29, 52 и 114 мм.

По полученным зависимостям КСВН от частоты для нефти, чистого бензина, а также для эмульсий бензина с разной концентрацией воды в диапазоне частот от 7,8 ГГц до 10 ГГц для волноводной секции длиной 29 мм, видно, что при увеличении концентрации воды в эмульсии значение КСВН растет. Также на данном графике в интервале частот от ~ 8,9 ГГц до ~ 9,2 ГГц присутствует максимум КСВН (максимальное значение для эмульсии с максимальной концентрацией воды). В диапазоне частот от ~9 ГГц до ~9,3 ГГц присутствует минимум КСВН для всех растворов (минимальное значение КСВН – 1,25 для чистого бензина).

#### **Расчёт диэлектрической проницаемости исследуемых веществ с использованием результатов СВЧ-измерения**

По результатам зависимостей КСВН от частоты были рассчитаны значения диэлектрической проницаемости, ее мнимой и действительной части.

Теоретически коэффициент отражения считали по следующей формуле

$$R = \frac{(\gamma_0^2 - \gamma^2) \cdot i \cdot \sin(\gamma \cdot L)}{2 \cdot \gamma_0 \cdot \gamma \cdot \cos(\gamma \cdot L) + (\gamma_0^2 + \gamma^2) \cdot i \cdot \sin(\gamma \cdot L)} \quad (7),$$

где  $\gamma_0$  – коэффициент распространения волны в пустом волноводе,  $\gamma$  – коэффициент распространения волны в заполненном волноводе

$$\gamma_0 = \sqrt{\omega^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (8),$$

$$\gamma = \sqrt{\omega^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \mu_0 \cdot \mu - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (9),$$

круговая частота –  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$  – комплексная диэлектрическая постоянная исследуемого вещества, которое помещается в волновод,  $a$  – ширина кюветы,  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума,  $\mu$  – магнитная постоянная исследуемого вещества,  $L$  – длина заполненной части волновода.

Результаты расчета диэлектрической проницаемости приведены в таблицах 8-15.

Таблица 8. Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов спирта для разной длины волноводных секций

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5 мм	24	30	35	43	48	50	53	58	62	69	81
29 мм	24	29	37	41	45	48	52	56	65	71	82
52 мм	23	30	35	44	48	49	51	55	59	67	80
114 мм	23	32	37	45	50	54	59	63	67	72	79

Таблица 9. Среднее Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов спирта.

	вода 100%/ спирт 0%	вода 90%/ спирт 10%	вода 80%/ спирт 20%	вода 70%/ спирт 30%	вода 60%/ спирт 40%	вода 50%/ спирт 50%
Значение диэлектрической проницаемости	80,5	69,75	63,25	58	53,75	50,25

	вода 40%/ спирт 60%	вода 30%/ спирт 70%	вода 20%/ спирт 80%	вода 10%/ спирт 90%	вода 0%/ спирт 100%
Значение диэлектрической проницаемости	47,75	43,25	36	30,25	23,5

Таблица 10 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов нитрата свинца с наночастицами магнетита

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,3	80,27	80,04

Таблица 11 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов нитрата свинца

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,29	80,11	79,22

Таблица 12 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов сульфида кадмия с наночастицами магнетита

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,927	80,69	78,3

Таблица 13 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов сульфида кадмия

	0,2 мг/мл	2 мг/мл	20 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	80,1	79,9	78,3

Таблица 14 Значения диэлектрической проницаемости для водных растворов родамина

	0,1 мг/мл	0,5 мг/мл	1 мг/мл
Значение диэлектрической проницаемости	68,3	68,67	68,86

Таблица 15 Значения диэлектрической проницаемости для водотопливных эмульсий с разным процентным содержанием керосина в воде.

	ТВЭ 0,5%	ТВЭ 1%	ТВЭ 3%	ТВЭ 5%	керосин
Значение диэлектрической проницаемости	78,6	77,3	70,1	65	3

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что как и при теоретическом определении диэлектрической проницаемости, для всех растворов и коллоидных систем с увеличением объемной доли компонента в воде приводит к уменьшению значения диэлектрической проницаемости всей системы в целом. Добавление наночастиц магнетита приводит к увеличению значений эффективной диэлектрической проницаемости.

Электрофизические параметры, в частности диэлектрическая проницаемость красителя Родамина С в современной литературе не

представлена. Таким образом данное исследование позволило количественно определить значение диэлектрической проницаемости Родамина С для следующих концентраций: 0,1 мг/мл, 0,5 мг/мл, 1 мг/мл.



Рис. 4 Диаграмма зависимости диэлектрической проницаемости водного раствора родамина от концентрации.

### 3.5 Емкостные измерения водных растворов

В данной работе было проведено исследование свойств суспензий с наночастицами магнетита при различных температурах. Для исследования была разработана и изготовлена установка по измерению емкости жидкостей с герметичной ячейкой, изображенная на рис. 5.

Установка представляет собой закрытый цилиндрический корпус из диэлектрического материала с двумя медными электродами диаметром 9 см, закрепленными соосно относительно друг друга с возможностью изменения расстояния между электродами. Измерения емкости проводились с помощью цифровых мультиметров АММ-1062 фирмы Актаком и МУ 64 фирмы Mastech, а также измерителем L, C, R универсальным E7-11.



Рис. 5 Установка для измерения емкости различных жидкостей

Было отмечено, что при увеличении температуры наблюдается рост значения емкости ячейки. Наибольший рост наблюдается для суспензии с наибольшей концентрацией (20 мг/мл). По полученным графикам хорошо видны различия между зависимостями для суспензий наночастиц сульфида кадмия различных концентраций и дистиллированной воды. Это позволяет детектировать степень «загрязнения» дистиллированной воды сульфидом кадмия.

На рисунке 6 представлена зависимость ёмкости ячейки от температуры для дистиллированной воды, а также водных растворов нитрата свинца концентраций 20 мг/мл, 2 мг/мл и 0,2 мг/мл. Видно, что с увеличением концентрации соли свинца в растворе значение ёмкости увеличивается. Наибольший рост ёмкости ячейки с увеличением температуры наблюдается для раствора свинца максимальной концентрации. По данному графику также отчётливо видна разница между дистиллированной водой и растворами нитрата свинца, что свидетельствует об эффективности данного метода в качестве метода детектирования.

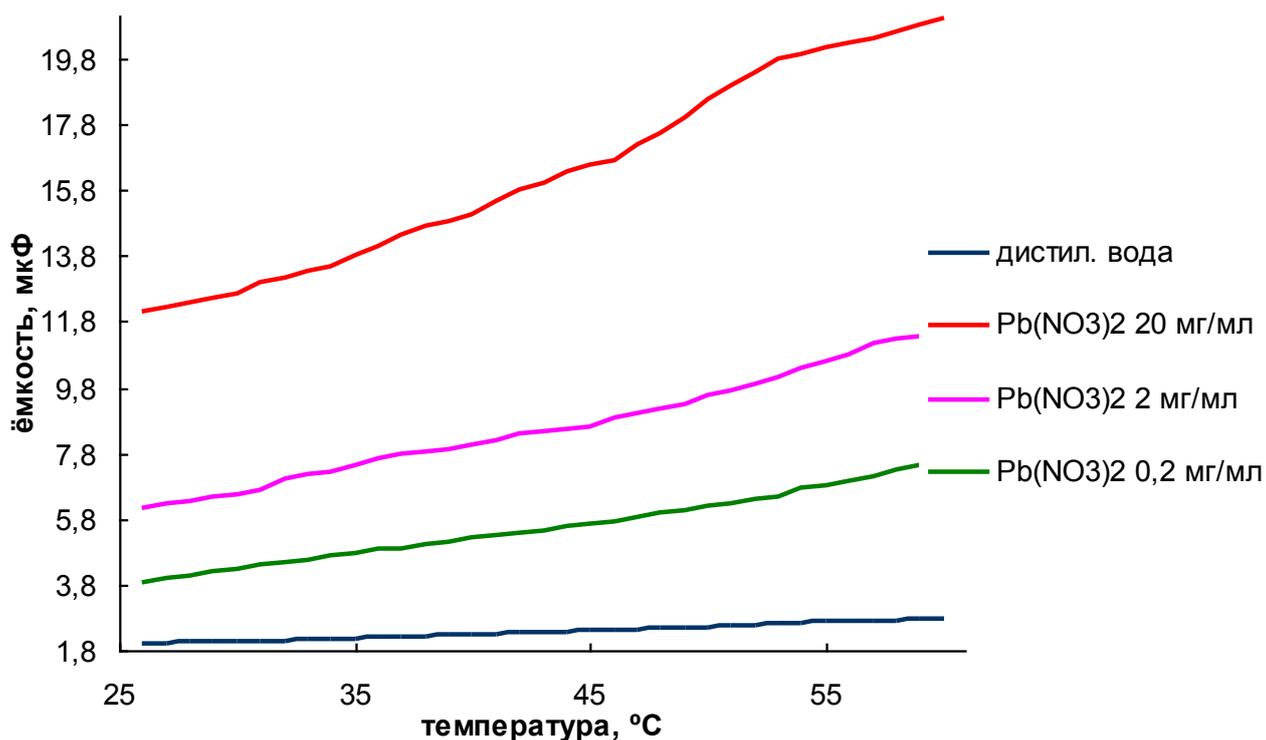


Рис. 6. График зависимости емкости ячейки от температуры для дистиллированной воды и водного раствора нитрата свинца различных концентраций с добавлением наночастиц магнетита

Проблема данного метода заключается в сложности точной установки и контроля расстояния между измеряемыми пластинами, что вносит непостоянство полученных результатов и большую погрешность.

### **Сравнительный анализ значений диэлектрических проницаемостей полученных волноводным методом и с использованием модели Максвелла Гарнетта, Бруггемана, Оделевского и К. Лихтенеккера.**

Исходя из полученных данных по исследованию и определению эффективной диэлектрической проницаемости волноводным методом и аналитическим методом можно построить следующие сравнительные диаграммы:

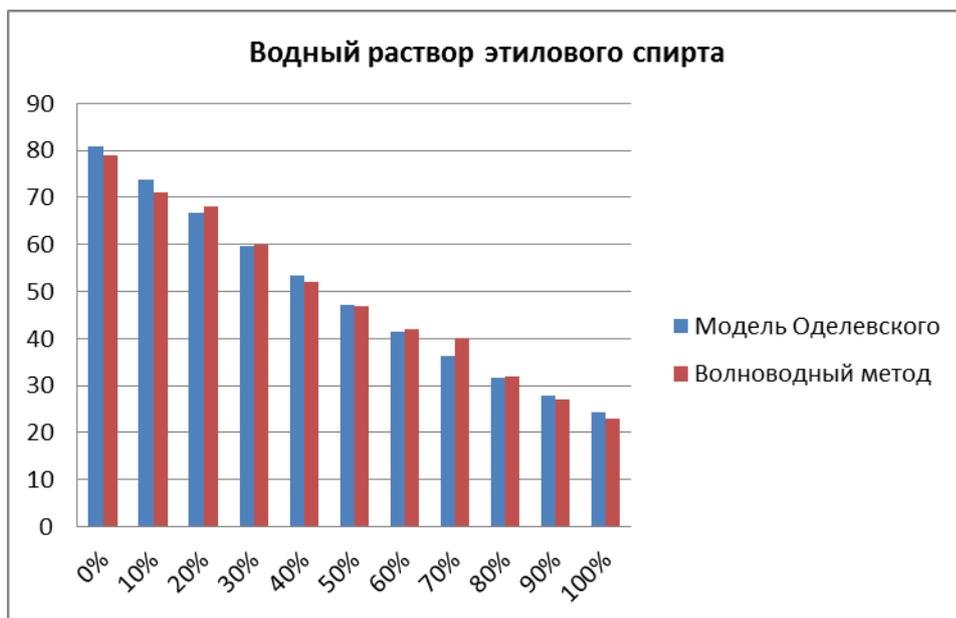


Рис. 7 диаграмма зависимости диэлектрической проницаемости водного раствора этилового спирта от концентрации, полученные волноводным методом и расчётом с помощью модели Оделевского

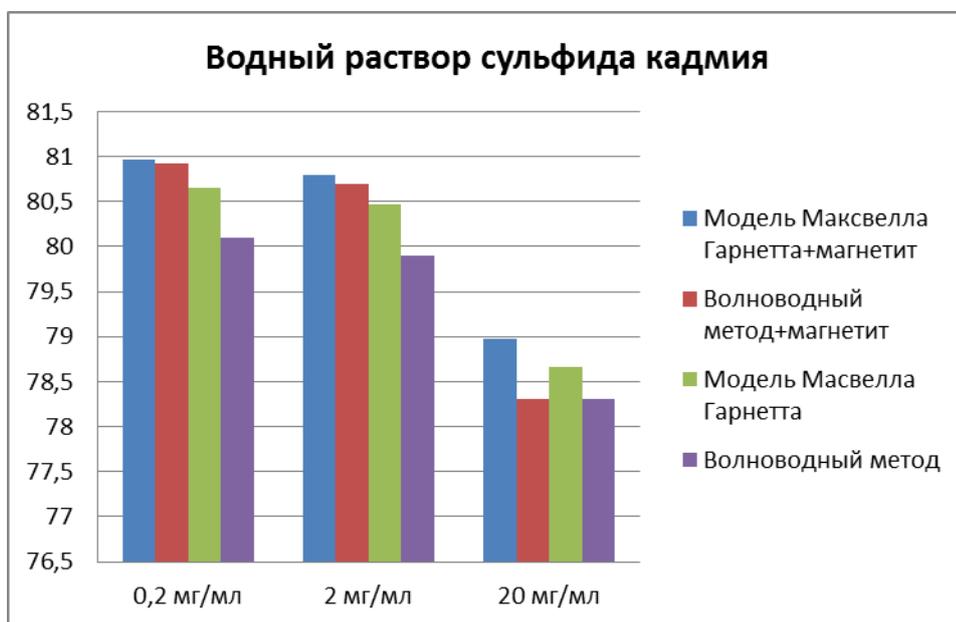


Рис. 8 диаграмма зависимости диэлектрической проницаемости водного раствора сульфида кадмия от концентрации, полученные волноводным методом и расчётом с помощью модели Максвелла Гарнетта с/без добавления наночастиц магнетита

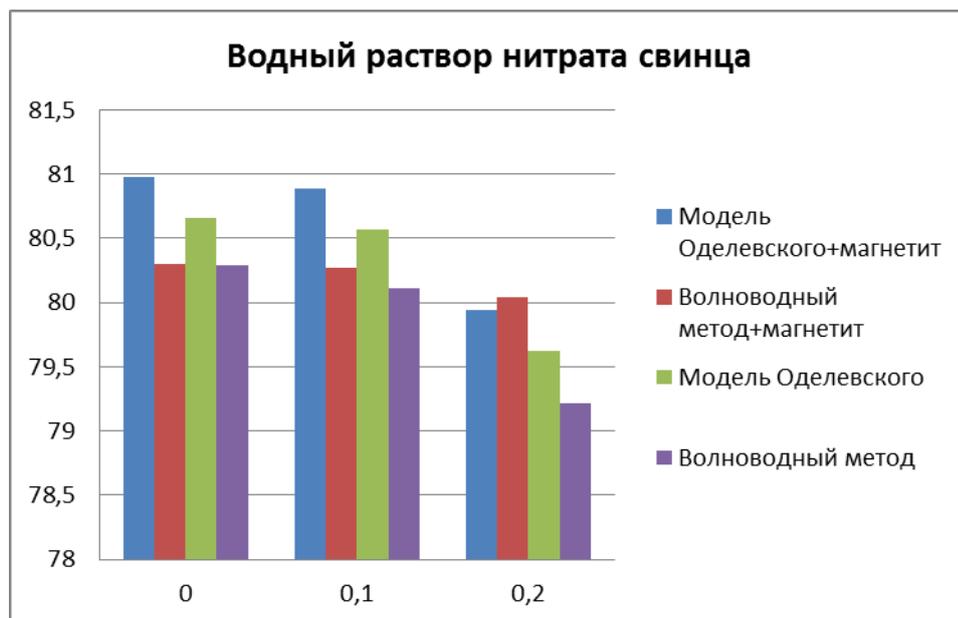


Рис. 9 диаграмма зависимости диэлектрической проницаемости водного раствора нитрата свинца от концентрации, полученные волноводным методом и расчётом с помощью модели Максвелла Гарнетта с/без добавления наночастиц магнетита.

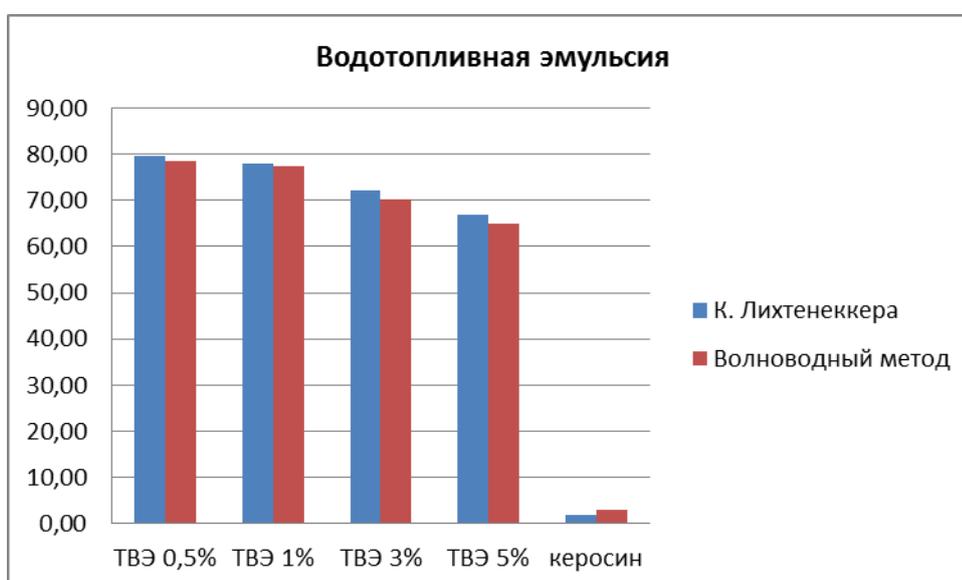


Рис. 10 диаграмма зависимости диэлектрической проницаемости водотопливных эмульсий с разной концентрацией керосина в воде, полученные волноводным методом и расчётом с помощью модели К.Лихтенеккера.

Можно отметить, что и теоретический и практический волноводный методы оказались чувствительными к изменению концентраций этилового спирта, нитрата свинца, сульфида кадмия, родамина, керосина а так же к включениям в растворы наночастиц магнетита. Методы Оделевского, Максвелла Гарнетта, Бруггемана и К. Лихтенеккера позволяют качественно и количественно оценить изменение диэлектрической проницаемости растворов и коллоидных систем.

Среднее значение отклонения результатов, полученных при определении диэлектрической проницаемости для водных растворов этилового спирта, нитрата свинца, родамина составило 2,827%. Данное отклонения относится к методу определения с помощью модели Оделевского.

Среднее значение отклонения результатов, полученных при определении диэлектрической проницаемости для водных коллоидных систем сульфида кадмия составило 0,513%. Данное отклонения относится к методу определения с помощью модели Максвелла Гарнетта.

Среднее значение отклонения результатов, полученных при определении диэлектрической проницаемости для пленок ПКЛ с ядрами кальция карбоната и наночастицами магнетита составило 111,12%. Данное отклонения относится к методу определения с помощью модели Бруггемана. Можно сделать вывод, что для тонких пленок ПКЛ, толщиной порядка 0,1 мм волноводный метод определения диэлектрической проницаемости имеет значительные погрешности. Данная конструкция волновода, метода измерения и диапазон частот не может быть использована для количественного определения диэлектрической проницаемости ПКЛ пленок. Тем не менее, волноводный метод чувствителен к изменению состава ПКЛ пленок, а именно к включению в нее ядер из карбоната кальция и наночастиц магнетита.

Среднее значение отклонения результатов, полученных при определении диэлектрической проницаемости для водотопливных эмульсий составило 11,59 %. Данное отклонения относится к методу определения с помощью модели К. Лихтенеккера .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения работы:

1) Представлен теоритический расчет диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта, сульфида кадмия, нитрата свинца и родамина с/без наночастицами магнетита разных концентраций с помощью моделей эффективной диэлектрической проницаемости Максвелла Гарнетта , Оделевского, Бруггемана и К. Лихтенеккера. Было отмечено, что с увеличением объемной концентрации компонент растворов и коллоидов значение диэлектрической проницаемости уменьшалось. Добавление наночастиц магнетита ведет к возрастанию значения диэлектрической проницаемости.

2) Представлено теоритическое обоснование метода определения диэлектрической проницаемости с помощью волноводного СВЧ-метода. Был разработан алгоритм для вычисления диэлектрической проницаемости с использованием значений коэффициента отражения, полученных из результатов исследования волноводным СВЧ-методом.

3) Экспериментально получены значения коэффициентов отражения и поглощения для коллоидов и растворов разных концентраций с помощь волноводного СВЧ-метода в диапазоне частот 7,8-10ГГц. Экспериментально реализован алгоритм расчёта диэлектрической проницаемости с использованием значений коэффициента отражения, полученных из результатов исследования волноводным СВЧ-методом. Было отмечено, что с увеличением объемной концентрации компонент растворов и коллоидом значение диэлектрической проницаемости уменьшалось. Добавление

наночастиц магнетита ведет к возрастанию значения диэлектрической проницаемости.

4) На основании данных, полученных волноводным методом и по моделям эффективных сред, позволило определить применимость конкретных эффективных моделей для каждого типа веществ: модель эффективной среды Оделевского подходит для определения диэлектрической проницаемости растворов, модель эффективной среды Максвелла Гарнетта подходит для определения диэлектрической проницаемости коллоидов, модель эффективной среды К. Лихтенеккера подходит для определения диэлектрической проницаемости эмульсий

5) Значения диэлектрической проницаемости нановолокон поликапрактона модифицированного микрочастицами карбоната кальция с наночастицами магнетита, полученные с помощью модели эффективной среды Бруггемана и полученные из экспериментальных результатов сильно различаются, т.е. волноводный метод не подходит для исследования таких структур.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:**

- 1) Fröhlich H., Trans.Faraday Soc, 44, 238, (1948).
- 2) Fouss R.M., Kirkwood 1C, J. Amer. Chem. Soc, 63, 385 (1941)
- 3) Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acid media // IEEE Trans. Magn. – 1981. – Vol. 17. – С. 1247-1248
- 4) Young K. F. ,Frederikse H. P. R. Compilation of the Static Dielectric Constant of Inorganic Solid // Institute for Materials Research, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234 J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 2, No.2, 1973