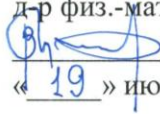



Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет  
Кафедра радиоэлектроники


ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
Руководитель ОПП  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
 В.П. Гермогенов  
« 19 » июня 2017 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА  
**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ**

по основной образовательной программе подготовки бакалавров  
Направление подготовки 03.03.03 - Радиофизика

Поливанова Анна Сергеевна

Руководитель ВКР:  
канд. физ.-мат. наук, доцент  
 О. А. Доценко  
« 17 » июня 2017 г.

Автор работы:  
студент группы № 732  
 А. С. Поливанова

Томск 2017

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет  
Кафедра радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель ООП  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
В.П. Гермогенов  
« 8 » 09 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
по подготовке ВКР бакалавра  
студенту Поливановой Анне Сергеевне группы № 732

1. Тема ВКР: Исследование спектров диэлектрической проницаемости диэлектриков прямоугольным резонатором.

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- а) на кафедре 19.06.2017,  
б) в ГЭК 23.06.2017

3. Краткое содержание работы:

Целью работы является оценка погрешности в измеренных значениях комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов за счет учета реальных размеров образцов и их смещения из пучности электрического поля.

Для этого необходимо решить задачи: провести обзор литературы, проанализировать расчетные формулы, провести измерения с использованием прямоугольного резонатора, провести численную и экспериментальную оценку погрешности метода измерения.

4. Календарный график выполнения ВКР:

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| а) обзор литературы по проблеме бакалаврской работы                        | 08.09.2016–15.04.2017 |
| б) моделирование электромагнитного отклика измерительной ячейки            | 19.09.2016–25.12.2016 |
| в) оценка погрешности математической модели                                | 01.11.2016–01.04.2017 |
| г) измерение спектров диэлектрической проницаемости образцов материалов    | 15.02.2016–01.06.2017 |
| д) обработка результатов измерений   | 15.02.2016–01.06.2017 |
| е) сопоставление погрешности математической модели и результатов измерений | 01.04.2016–03.05.2017 |
| ж) подготовка доклада и выступление на конференции                         | 03.05.2017–25.05.2017 |
| з) оформление отчета по бакалаврской работе.                               | 01.04.2017–15.06.2017 |

5. Дата выдачи задания « 9 » 09 2016 г.

Руководитель ВКР –  
кандидат физ.-мат. наук,  
доцент

 Доценко О.А.

Задание принял к исполнению



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра 38 с., 4 гл., 5 табл., 12 рис., 42 источника

### ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР, КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Объекты исследования – объемный прямоугольный резонатор, композит на основе одностенных углеродных нанотрубок.

Цель работы – оценить погрешность в измеренных значениях комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов за счет учета реальных размеров образцов и их смещения из пучности электрического поля.

В процессе работы проведены: а) корректировка формул для решения прямой задачи в диапазоне частот от 3 ГГц до 13,7 ГГц; б) численное моделирование электродинамической системы; в) экспериментальные исследования комплексной диэлектрической проницаемости композиционного материала на основе одностенных углеродных нанотрубок.

В результате работы:

- а) проведен литературный обзор;
- б) получены расчётные выражения для метода малых возмущений, учитывающие геометрические размеры и смещение образца из пучности электрического поля;
- в) проведено численное моделирование по полученным расчетным выражениям;
- г) изготовлены экспериментальные образцы;
- д) освоена методика и проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости с использованием прямоугольного резонатора;
- е) определено влияние размера образца на результаты измерений диэлектрической проницаемости;
- ж) работа представлена на конференциях: «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск), МНСК-2017 (г. Новосибирск), «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение» (г. Томск) и СНИИ-2017 (г. Томск).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Методы измерений электромагнитных характеристик материалов	6
2 Прямоугольный резонатор	8
2.1 Структура электромагнитного поля	8
2.2 Основной тип колебаний	10
2.3 Вывод формул для расчёта диэлектрической проницаемости с учётом размера и местоположения образца	13
2.4 Вывод формулы для расчёта погрешности в $\Delta\omega/\omega_0$ за счёт неточной установки образца в рамках теории малых возмущений	16
3 Композиционные материалы на основе нанотрубок	19
3.1 Углеродные нанотрубки	19
3.1.1 Свойства углеродных нанотрубок	19
3.1.1.1 Механические свойства	20
3.1.1.2 Электрические свойства	20
3.2 Композиционные материалы	21
4 Экспериментальные исследования	23
4.1 Моделирование диэлектрической проницаемости в программе MathCad	23
4.2 Оценка применимости метода малых возмущений для стержневых образцов	24
4.3 Исходные компоненты для приготовления композита	26
4.4 Изготовление образцов	27
4.5 Методика измерения удельной проводимости образцов	27
4.6 Методика измерения параметров образцов	28
4.7 Измерение диэлектрической проницаемости образцов композиционных материалов	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	34

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке современной аппаратуры необходимо проводить исследования динамических электромагнитных характеристик природных и искусственных материалов (частотных зависимостей комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей), а также коэффициентов отражения, прохождения и поглощения материалов в рабочей полосе частот. Для этих целей используются разные типы измерительных ячеек: измерительные конденсаторы, коаксиальные и микрополосковые резонаторы, рупора, объёмные цилиндрические и прямоугольные резонаторы, открытые резонаторы и т.д. [1, 2]. Каждая из этих установок работает в определенном частотном диапазоне. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости на СВЧ в коаксиальной ячейке [2] используется для исследований небольшого количества исследуемого образца, в связи с малыми размерами ячеек. Преимущества данного метода заключаются в том, что данный метод применим для материалов, поддающихся механической обработке, и является широкополосным [3–5]. Прямоугольный объёмный резонатор используется для измерения параметров материалов в дискретном наборе точек, соответствующих его резонансным частотам [6]. Диапазон измерений зависит от размеров резонатора. Преимуществом объёмного резонатора является возможность измерений малого количества образца исследуемого материала, а также измерения материалов с небольшими величинами электромагнитных параметров. Для определения характеристик исследуемых образцов материалов используется метод малых возмущений (ММВ).

Авторы статьи [7] показали, что формулы для расчёта динамических электромагнитных характеристик образцов материалов, полученные с использованием метода малых возмущений и используемые большинством исследователей, дают погрешность в результатах измерения. Они пишут, что в этом методе считается, что внесение образца не изменяет структуру поля в резонаторе. Однако при внесении образца поле изменяется, и получаемые результаты всегда содержат ошибку. В своей работе авторы приводят измерения известного материала (лавсана, полиэтилентерефталата) и полученные ими поправочные коэффициенты к измеренным значениям. Также авторы отмечают,

что на погрешность получаемых результатов оказывает влияние положение образца в резонаторе, о чем сказано в работах [7, 8, 9].

В статье [10] проведено моделирование измерений электрофизических параметров тонких образцов на основе объемного прямоугольного резонатора, используя метод возмущений, в среде проектирования Microwave Studio в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц. Они доказали, что расхождения между экспериментальными и промоделированными результатами не превышает 20 %, и метод возмущений адекватен и удобен для оценки диэлектрической проницаемости тонких образцов.

Целью выпускной квалификационной работы является оценка погрешности в измеренных значениях комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов за счет учета реальных размеров образцов и их смещения из пучности электрического поля.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- а) провести литературный обзор;
- б) получить расчётные выражения для метода малых возмущений, учитывающие геометрические размеры и смещение образца из пучности электрического поля;
- в) провести численное моделирование по полученным расчетным выражениям;
- г) изготовить экспериментальные образцы;
- д) освоить методику и провести измерения комплексной диэлектрической проницаемости с использованием прямоугольного резонатора;
- е) определить влияние размера образца на результаты измерений диэлектрической проницаемости.

## 1 Методы измерений электромагнитных характеристик материалов

Широкое распространение материалов, поглощающих сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение и используемых в радиоэлектронной технике, приборостроении и других отраслях промышленности, определяет необходимость более глубокого исследования этих материалов, как с позиции эффективного применения, так и с позиции исследования их свойств. Практическое использование существующих, а также разработка новых материалов требует точного контроля электродинамических параметров, ответственных за качество поглощения электромагнитной волны. Как известно, основными электродинамическими параметрами любого вещества, характеризующими взаимодействие электромагнитной волны с материалами, являются диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости [11].

Существуют различные методы по способу измерения параметров материалов: квазиоптические методы или методы свободного пространства [12], волноводные методы [2, 13], резонансные методы [14]. Квазиоптические методы применяются для измерения параметров материалов преимущественно в СВЧ и КВЧ диапазонах. Сущность методов основана на измерении скорости распространения электромагнитной волны и её затухания в исследуемом материале. Волноводные методы широко применяются для измерений в СВЧ диапазоне и, при использовании коаксиальных линий, могут применяться в УВЧ диапазоне. Сущность волноводных методов заключается в том, что отрезок прямоугольного или коаксиального волновода заполняется исследуемым веществом, после чего измеряется скорость и затухание волны, проходящей указанный отрезок. Затем на основе измеренных данных рассчитывается диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь исследуемого образца. Резонансные методы основаны на измерении свойств колебательных систем при введении в них образцов исследуемых веществ. Эти методы применяются в широком диапазоне частот – от единиц МГц до десятков ГГц. Резонансный метод удобен для измерения параметров сыпучих тел и жидкостей. Но когда диэлектрическая проницаемость материала значительно превышает единицу, то при помещении исследуемого образца в резонатор резонансная частота и добротность сильно изменяются, что приводит к большим погрешностям при

вычислении  $\text{tg}\delta$ . Помимо этого, определенные сложности представляют заполнение без зазора твердым материалом всей полости резонатора. Поэтому при измерении параметров твердых образцов применяют метод, когда заполняется только часть объема резонатора с размещением в нем образца вещества, плотно прилегающего к стенкам. Расчёты в этом случае значительно усложняются, поскольку требуется решение трансцендентных уравнений относительно  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  с помощью специальных таблиц и графиков [11, 15].

У каждого из методов есть свои достоинства и недостатки: подготовка образцов необходимых форм и размеров [16], требования к исходным характеристикам образцов при проведении измерений [17] и др.



## 2 Прямоугольный резонатор

### 2.1 Структура электромагнитного поля

В области частот в сотни мегагерц и выше квазистационарные измерительные системы на основе конденсаторов и индуктивностей значительно теряют свою добротность. Этот недостаток устраняется применением электромагнитных колебательных систем, представляющих собой полностью или частично замкнутые объёмы с проводящими стенками, которые называются объёмными резонаторами.

Измерение электромагнитных характеристик образцов исследуемых материалов с помощью прямоугольного резонатора относится к резонансным методам. Такие методы, включая в том числе резонансные методы возмущений, могут обеспечить более высокую точность измерений по сравнению с нерезонансными при низких потерях в материале [18].

Для исследования электромагнитных параметров образцов исследуемых материалов рассмотрим прямоугольный объёмный резонатор (электродинамическая система ЭДС) (рисунок 1). Прямоугольный резонатор представляет собой отрезок прямоугольного волновода, замкнутый с обоих концов проводящими пластинами. В таком резонаторе могут возбуждаться  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$  типы колебаний, где  $m$ ,  $n$ ,  $p$  – индексы, соответствующие числу полуволн, укладывающихся вдоль соответствующих стенок резонатора. Основным типом колебаний такого резонатора является колебание  $H_{10p}$ .

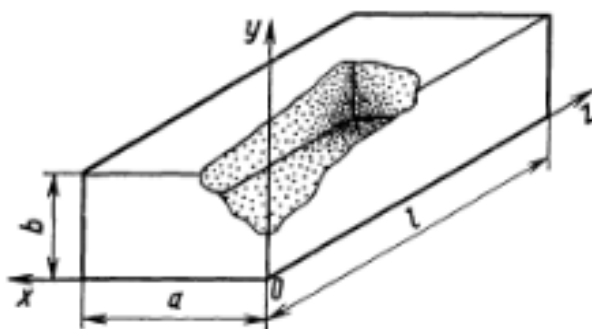


Рисунок 1 – Прямоугольный объёмный резонатор [19]

Если взять резонатор длиной  $L = p\lambda_0/2$ , где  $p = 1, 2, 3, \dots$  – положительное целое число, то получим электромагнитную систему, колебания в которой могут

существовать неограниченно долго без какого-либо воздействия со стороны внешних источников энергии. Частотная характеристика такой системы вблизи резонансной частоты в точности соответствует частотной характеристике обычного колебательного контура с сосредоточенными элементами.

Следует отметить, что в такой электромагнитной системе, в отличие от обычного колебательного контура, имеется бесконечное множество резонансных длин волн, определяемых соотношением:

$$\lambda_{0\text{рез}} = \frac{2L}{p}.$$

Отсюда следует, что при достаточной длине резонатора  $L$  в нём вдоль его длины могут укладываться одна, две, три и т.д. половолны. Каждому допустимому целочисленному значению  $p$  соответствует своя резонансная длина волны и своя характерная структура пространственного распределения векторов электромагнитного поля, представляющая собой тип колебаний в объёмном резонаторе. Типы колебаний в резонаторе называют модами, поэтому в резонаторе возможен многомодовый режим, т.е. один и тот же резонатор может возбуждаться на различных частотах. Последовательное возбуждение резонатора на различных модах (с разным числом  $p$ ) обеспечивает широкополосность резонаторных измерений. В общем случае структура так называемых  $h$ -полей прямоугольного резонатора описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{oz} &= h_0 \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L}, \\ \dot{h}_{ox} &= -h_0 \frac{\chi_x \chi_z}{\chi^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L}, \\ \dot{h}_{oy} &= -h_0 \frac{\chi_y \chi_z}{\chi^2} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{L}, \\ \dot{e}_{ox} &= h_0 \frac{i\dot{\omega}_0 \dot{\chi}_y}{\chi^2} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L}, \\ \dot{e}_{oy} &= -h_0 \frac{i\dot{\omega}_0 \dot{\chi}_x}{\chi^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{L}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\chi_x = \frac{m\pi}{a}$ ,  $\chi_y = \frac{n\pi}{b}$ ,  $\chi_z = \frac{p\pi}{L}$ ,  $\chi^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$ ,  $m, n, p$  – число полувольт по осям  $x, y, z$ :  $m = (0), 1, \dots$ ;  $n = (0), 1, 2, \dots$ ;  $p = 1, 2, \dots$ . Число в скобках означает, что равным нулю может быть либо  $m$ , либо  $n$ . Размеры резонатора по осям  $x, y, z$  равны  $a, b, L$ , соответственно;  $\omega_0$  – собственная частота резонатора, которая может быть найдена по формуле:

$$\omega_0 = \frac{c\pi}{\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu}}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2},$$

$\dot{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$ ,  $\dot{\mu} = \mu' - i\mu''$  – комплексные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей материала, заполняющего объём резонатора [19, 20].

## 2.2 Основной тип колебаний

Для того чтобы получить моду с наибольшей резонансной длиной волны при фиксированных размерах резонансной полости, необходимо возбудить в резонаторе колебания основных (низших) типов. Этому требованию удовлетворяют колебания типа  $H_{10p}$ , из которых вдоль широкой стенки длиной  $a$  укладывается одна стоячая полуволна, а вдоль узкой стенки поле неизменно. Заметим, что строение поля не зависит от величины размера узкой стенки  $b$ , а критическая длина волны равна удвоенному размеру широкой стенки.

Для этого типа колебаний с условием, что  $\chi_x = \pi/a$ ;  $\chi_y = 0$ ;  $\chi_z = \pi/a$ ;  $\chi^2 = (\pi/a)^2$ ;  $\omega_0 = \left(c\pi/\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu}}\right)\sqrt{(1/a)^2 + (p/L)^2}$  структура поля будет иметь вид:

$$\begin{aligned} h_{oz} &= h_0 \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{p\pi z}{L}, \\ h_{ox} &= -h_0 \frac{ap}{L} \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{p\pi z}{L}, \\ h_{oy} &= 0, \\ e_{ox} &= 0, \end{aligned} \tag{2}$$

$$e_{oy} = -h_0 \frac{i\sqrt{L^2 + p^2 a^2}}{L} \sqrt{\frac{\dot{u}}{\dot{\varepsilon}}} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{p\pi z}{L}.$$

При возбуждении основного типа колебания  $H_{10p}$  в центре резонатора находится пучность электрического поля, силовые линии направлены параллельно оси  $Oy$ . Силовые линии электрического поля в прямоугольном резонаторе в центре сгущаются, и мы имеем максимум мощности, а к стенкам происходит разряжение и при  $x = 0$ ,  $x = a$ ,  $z = 0$  и  $z = 1$  тангенциальная составляющая электрического поля равна нулю (рисунок 2). Это условие отсутствия токов, текущих по внутренней поверхности резонатора [21].

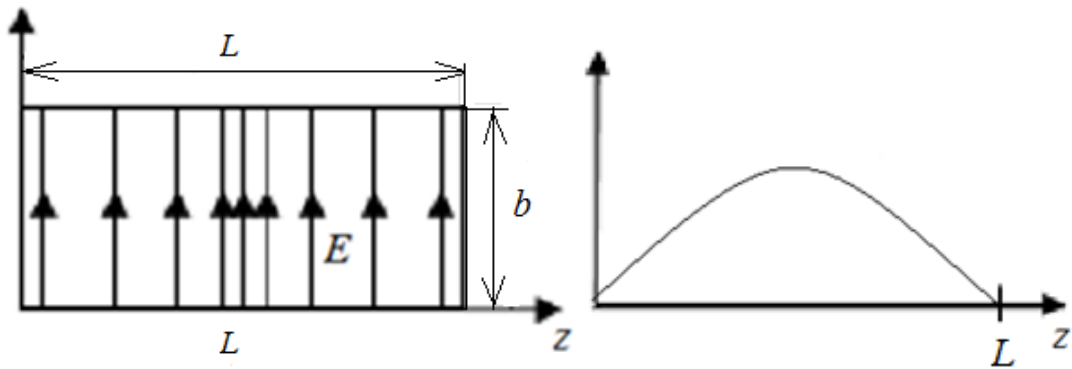


Рисунок 2 – Распределение электрического поля в резонаторе  
вдоль оси  $z$  для волны  $H_{101}$

Как известно, магнитные силовые линии направлены по окружности относительно электрических линий (рисунок 3). И в центре резонатора также находится пучность магнитного поля. Причём в объёмном резонаторе в случае максимума электрического поля в центре магнитное поле равно нулю, и наоборот. При этом происходит "перекачивание" энергии магнитного поля в энергию электрического поля, и наоборот.

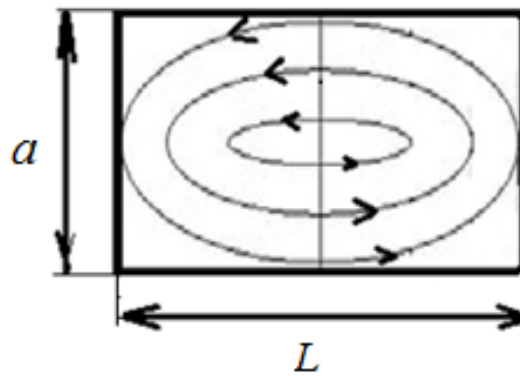


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля в резонаторе  
вдоль оси  $z$  для волны  $H_{101}$

На рисунке 4 представлены мгновенные картины распределения силовых линий электромагнитного поля в резонаторе с колебаниями  $H_{101}$  в пределах половины периода.

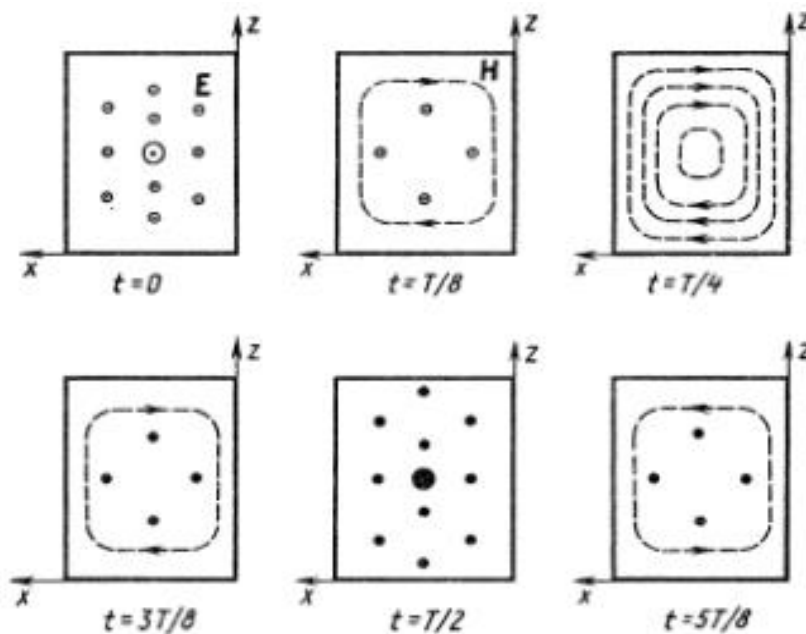


Рисунок 4 – Структура электромагнитного поля для колебаний типа  $H_{101}$   
в последовательные моменты времени [22]

Кроме того, наблюдается пространственное разделение местоположений пучностей и, соответственно, узлов электрического и магнитного полей, расстояние между которыми равно четверти длины волны в волноводе.

### 2.3 Вывод формул для расчёта диэлектрической проницаемости с учётом размера и местоположения образца

Задача о прямоугольном резонаторе и образцом имеет строгое решение, когда образец без зазоров заполняет поперечное сечение измерительной ячейки или весь объём резонатора. При измерении электромагнитных параметров материалов с потерями на объём исследуемого вещества накладываются ограничения, и возникают проблемы с изготовлением тонкого плоскопараллельного образца и установки его в резонаторе. Выбор другой формы образца переводит задачу в ряд нерегулярных, т.е. имеющих замкнутые аналитические решения. Разрешить возникшее затруднение возможно, если использовать метод малых возмущений, рассматривая нерегулярную задачу, как регулярную, но претерпевшую некоторое отклонение (возмущение) исходных условий. Запишем формулу теории возмущений, которая определяет реакцию резонансной системы на помещение в её полость исследуемого материала с магнитной  $\dot{\mu} = \mu' - i\mu''$  и диэлектрической  $\dot{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$  проницаемостями:

$$\frac{\Delta\dot{\omega}}{\dot{\omega}} = - \frac{\int_{V_s} \left( \Delta\dot{\epsilon} \vec{e} \vec{e}_0^* + \Delta\dot{\mu} \vec{h} \vec{h}_0^* \right) dV}{\int_{V_r} \left( \dot{\epsilon} \vec{e} \vec{e}_0 + \dot{\mu} \vec{h} \vec{h}_0 \right) dV}, \quad (3)$$

где  $\Delta\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} - \epsilon_0$ ,  $\Delta\dot{\mu} = \dot{\mu} - \mu_0$ ;  $V_s$ ,  $V_r$  – объёмы образца и резонатора, соответственно;  $\vec{e}_0$ ,  $\vec{h}_0$  – составляющие начального электромагнитного поля;  $\vec{e}$ ,  $\vec{h}$  – составляющие "возмущённого" электромагнитного поля;  $\Delta\dot{\omega} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_0$ ;  $\dot{\omega}_0 = \omega'_0 + i\omega''_0$ ,  $\dot{\omega} = \omega + i\omega''$  – комплексные частоты ненагруженного резонатора и "возмущённого" внесением образца, соответственно [22].

Формула (3) является точным соотношением, но наряду с известными величинами в неё входят неизвестные комплексные амплитуды векторов "возмущённого" поля. Данная формула может быть использована, если можно сделать достоверные предположения о структуре рассматриваемого "возмущённого" поля.

Вещественная часть комплексной собственной частоты  $\omega'_0 = \text{Re } \dot{\omega}_0$  является круговой частотой, а  $\omega''_0 = \text{Im } \dot{\omega}_0$  есть коэффициент затухания. Мнимая часть частоты связана с добротностью резонатора [23]:

$$Q = \frac{\omega'}{2\omega''}. \quad (4)$$

Рассмотрим прямоугольный резонатор, в котором помещённый образец имеет форму цилиндра (рисунок 5). В таком резонаторе возбуждаются колебания  $H_{10p}$ .

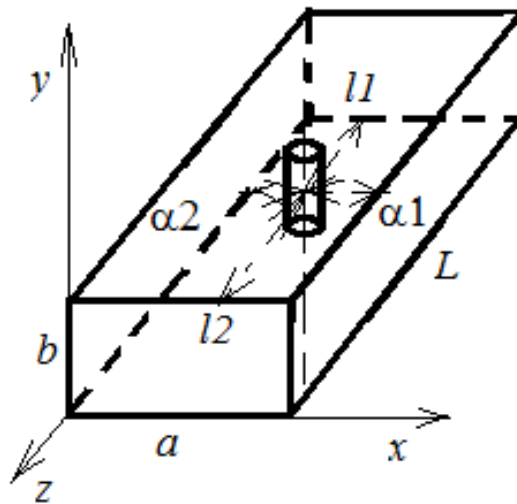


Рисунок 5 – Прямоугольный резонатор с помещённым в него образцом цилиндрической формы

Для колебаний типа  $H_{10p}$  (система уравнений (2)) числитель формулы (4):

$$\begin{aligned} \int_{V_s} \left( \Delta \vec{\epsilon} \vec{e} \vec{e}_0^* + \Delta \vec{\mu} \vec{h} \vec{h}_0^* \right) dV &= \frac{2\epsilon_0 h_0^2 (L^2 + a^2 p^2) \dot{\mu}_0^2 \Delta \dot{\epsilon}}{(\dot{\epsilon} + \epsilon_0) \epsilon_0 \mu_0 L^2 4} \times \\ &\times \left[ \alpha_2 - \alpha_1 - \frac{a}{\pi} \cos(\alpha_2 + \alpha_1) \frac{\pi}{a} \times \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] (\beta_2 - \beta_1) \times \\ &\times \left[ l_2 - l_1 - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right] + \frac{2\mu_0 h_0^2 \Delta \dot{\mu}}{(\dot{\mu} + \mu_0) 4} \times \\ &\times \left[ \alpha_2 - \alpha_1 + \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (\alpha_2 + \alpha_1) \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \times \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& \times (\beta_2 - \beta_1) \left[ l_2 - l_1 - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right] + \\
& + \frac{\Delta \dot{\mu} h_0^2 a^2 p^2}{4L^2} \left[ \alpha_2 - \alpha_1 - \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (\alpha_2 + \alpha_1) \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \times \\
& \times (\beta_2 - \beta_1) \left[ l_2 - l_1 + \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right].
\end{aligned}$$

Для колебаний типа  $H_{10p}$  (система уравнений (2)) знаменатель формулы (4):

$$\begin{aligned}
\int_{V_r} \left( \dot{\vec{e}} \vec{e}_0 + \dot{\vec{h}} \vec{h}_0 \right) dV &= 2\varepsilon_0 \int_{V_r} |\vec{e}_0|^2 dV = 2\mu_0 \int_{V_r} |\vec{h}_0|^2 dV = \\
&= h_0^2 \frac{(L^2 + p^2 a^2)}{2L^2} \mu_0 V_r,
\end{aligned} \tag{6}$$

где  $V_r = abL$ .

Разделим уравнение (5) на (6), получим  $\Delta \dot{\omega} / \omega$ :

$$\begin{aligned}
-\frac{\Delta \dot{\omega}}{\omega} &= \frac{h_0^2 (L^2 + a^2 p^2) \mu_0 (\dot{\varepsilon} - \varepsilon_0) 2l^2}{2(\dot{\varepsilon} + \varepsilon_0) L^2 h_0^2 (L^2 + a^2 p^2) \mu_0 V_r} F + \frac{\mu_0 h_0^2 (\dot{\mu} - \mu_0) 2L^2}{(\dot{\mu} + \mu_0) 2h_0^2 (L^2 + a^2 p^2) \mu_0 V_r} D + \\
&+ \frac{\Delta \dot{\mu} h_0^2 a^2 p^2 2L^2}{4L^2 h_0^2 (L^2 + a^2 p^2) \mu_0 V_r} K = \frac{(\dot{\varepsilon} - \varepsilon_0) F}{(\dot{\varepsilon} + \varepsilon_0) V_r} + \frac{(\dot{\mu} - \mu_0) L^2 D}{(\dot{\mu} + \mu_0) (L^2 + a^2 p^2) V_r} + \\
&+ \frac{(\dot{\mu} - \mu_0) a^2 p^2 K}{2(L^2 + a^2 p^2) \mu_0 V_r},
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{где } F = \left[ \alpha_2 - \alpha_1 - \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (\alpha_2 + \alpha_1) \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] [\beta_2 - \beta_1] \times$$

$$\times \left[ l_2 - l_1 - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right], \tag{8}$$

$$D = \left[ \alpha_2 - \alpha_1 + \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (\alpha_2 + \alpha_1) \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] [\beta_2 - \beta_1] \times$$

$$\times \left[ l_2 - l_1 - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right], \tag{9}$$



$$K = \left[ \alpha_2 - \alpha_1 - \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (\alpha_2 + \alpha_1) \sin \frac{\pi}{a} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] [\beta_2 - \beta_1] \times$$

$$\times \left[ l_2 - l_1 + \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (l_2 + l_1) \sin \frac{p\pi}{L} (l_2 - l_1) \right]. \quad (10)$$

Если  $p=2L$  (где  $L = 1, 2, \dots$ ), то  $F=0$ ; если  $p=(2L+1)$ , то

$$F = 2\beta h \left( \alpha + \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right) = 2\alpha\beta h \left( 1 + \frac{\sin \theta}{\theta} \right), \text{ где } \theta = \frac{\pi\alpha}{a},$$

$$D = \left[ \frac{a}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{a}{2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{a}{\pi} \cos \pi \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right] \beta \left[ h - \frac{L}{p\pi} \cos p\pi \sin \frac{p\pi h}{L} \right] =$$

$$= \left[ \left( \alpha - \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right) \beta (h - h \cos p\pi) \right].$$

Если  $p=2L$ , то  $D=0$ ; если  $p=2L+1$ , то  $D = 2\beta h \alpha \left( 1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$ , где  $\theta = \frac{\pi\alpha}{a}$ ,

$$K = \left( \alpha + \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right) \beta (h + h \cos p\pi).$$

Если  $p=2L$ , то  $K = 2\beta h \alpha \left( 1 + \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$ , где  $\theta = \frac{\pi\alpha}{a}$ , если  $p=2L+1$ , то  $K=0$ .

Если образец расположен в пространстве с координатами  $\frac{a}{2} \pm \frac{\alpha}{2}$ ,  $\frac{b}{2} \pm \frac{\beta}{2}$ ,  $\frac{L}{2} \pm \frac{h}{2}$ :

а) при  $p=2L$ :  $F=0$ ,  $D=0$ ,  $K = 2\beta h \alpha \left( 1 + \frac{\sin \theta}{\theta} \right) = 2V_{\text{обп}} \left( 1 + \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$ , где  $\theta = \frac{\pi\alpha}{a}$ ;

б) при  $p=2L+1$ ,  $F = 2V_{\text{обп}} \left( 1 + \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$ ,  $D = 2V_{\text{обп}} \left( 1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$ ,  $K=0$ , где  $\theta = \frac{\pi\alpha}{a}$ .

2.4 Вывод формулы для расчёта погрешности в  $\Delta\dot{\omega}/\omega_0$  за счёт неточной установки образца в рамках теории малых возмущений

При расчёте полей внутри образца встречаются три функции  $F$ ,  $D$  и  $K$ , связанные со структурой поля в резонаторе (формулы (8), (9), (10)). В предыдущем разделе было показано, что, в зависимости от местоположения образца и номера моды, эти функции могут принимать нулевые значения.

Для образца, изображённого на рисунке 5, формула (7) принимает вид:

$$\frac{\Delta\dot{\omega}}{\omega_0} = -\frac{\dot{\varepsilon} - \varepsilon_0}{2\varepsilon_0 V_r} V_s F. \quad (11)$$

Пусть  $\alpha_1 = \frac{a}{2} - \Delta - \frac{\alpha}{2}$ ;  $\alpha_2 = \frac{a}{2} - \Delta + \frac{\alpha}{2}$ ;  $\beta_1 = \frac{b}{2} - \frac{\beta}{2}$ ;  $\beta_2 = \frac{b}{2} + \frac{\beta}{2}$ ;  $l_1 = \frac{L}{2} - \Delta_1 - \frac{h}{2}$ ;  
 $l_2 = \frac{L}{2} - \Delta_1 + \frac{h}{2}$ , здесь  $\alpha, \beta, h$  – размеры образца;  $\Delta, \Delta_1$  – отклонения по оси  $x$  и  $z$ ,  
 соответственно. Тогда

$$F = \left[ \frac{a}{2} - \Delta + \frac{\alpha}{2} - \frac{a}{2} + \Delta + \frac{\alpha}{2} - \frac{a}{\pi} \cos(a - 2\Delta) \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right] \beta \times$$

$$\times \left[ h - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (L - 2\Delta_1) \sin \frac{p\pi h}{L} \right] = \left[ \alpha - \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (a - 2\Delta) \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right] \beta \times$$

$$\times \left[ h - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (L - 2\Delta_1) \sin \frac{p\pi h}{L} \right].$$

Рассмотрим предельные случаи, когда:

а)  $\Delta=0, \Delta_1=0$ .

$$F = \left[ \alpha + \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi\alpha}{a} \right] \beta \left[ h - \frac{L}{p\pi} \cos p\pi \sin \frac{p\pi h}{L} \right].$$

Для  $\alpha \ll a$   $\sin \frac{\pi\alpha}{a} = \frac{\pi\alpha}{a}$ , для  $L \gg h$   $\sin \frac{p\pi h}{L} = \frac{p\pi h}{L}$ . Отсюда следует, что

$$F = \left[ \alpha + \frac{a}{\pi} \frac{\pi\alpha}{a} \right] \beta \left[ h - \frac{Lp\pi h}{p\pi L} \cos p\pi \right].$$

Если  $p=2n$ , то  $F = 2\alpha\beta[h - h(+1)] = 0$ , получим  $\frac{\Delta\dot{\omega}}{\omega_0} = 0$ .

Если  $p=2n+1$ , то  $F = 2\alpha\beta[h - h(-1)] = 4\alpha\beta h = 4V_s$  и получим

$\frac{\Delta\dot{\omega}}{\omega_0} = \frac{(\varepsilon' - i\varepsilon'' - 1)2V_s}{V_r} = \frac{\Delta\Omega_{\max}}{\omega_0}$  – максимальное отклонение комплексной частоты

резонатора за счёт диэлектрических свойств образца.

б)  $\Delta=0, \Delta_1=L/2p$ .

$$F = 2\alpha\beta \left[ h - h \cos \frac{p\pi}{L} \left( L - \frac{2L}{2Lp} \right) \right] = 2\alpha\beta h \left[ 1 - \cos \left( \frac{p\pi L}{L} - \frac{p\pi}{p} \right) \right] =$$

$$= 2V_s [1 - \cos(p\pi - \pi)] = 2V_s [1 - \cos \pi(p-1)].$$

Если  $p=2n$ , то  $\cos \pi(p-1) = -1$ ,  $F = 4V_s$ ; если  $p=2n+1$ , то  $\cos \pi(p-1) = 1$ ,  $F=0$ .

Если в центре резонатора находится пучность магнитного поля, то максимальное отклонение  $\Delta l$  от этого центра (в указанных пределах) даст  $\Delta\Omega_{\max}$ , и, наоборот, если в центре была пучность электрического поля, то максимальное отклонение  $\Delta l$  приведёт нас в точку, где изменение частоты равно нулю.

в)  $\Delta = a/2p$ ,  $\Delta l = 0$

Если  $\Delta = \frac{a}{2}$ , то  $\cos \frac{\pi}{a}(a-a) = 1$  и  $F=0$ .

В общем случае  $0 \leq \Delta \leq \frac{a}{2}$ ;  $0 \leq \Delta l \leq \frac{L}{2p}$ :

$$F_o = \alpha\beta h \left[ 1 - \frac{a}{\pi\alpha} \sin \frac{\pi}{a\alpha} \cos \frac{\pi}{a}(a-2\Delta) \right] \left[ 1 - \frac{L}{p\pi h} \sin \frac{p\pi h}{L} \cos \frac{p\pi}{L}(L-2\Delta l) \right] =$$

$$= V_s \left[ 1 - \frac{\sin \frac{\pi\alpha}{a}}{\frac{\pi\alpha}{a}} \cos \frac{\pi}{a}(a-2\Delta) \right] \left[ 1 - \frac{\sin \frac{p\pi h}{L}}{\frac{p\pi h}{L}} \cos \frac{p\pi}{L}(L-2\Delta l) \right], \text{ тогда}$$

$$\frac{\Delta\dot{\omega}_{\text{общ}}}{\omega_0} = -\frac{(\varepsilon' - i\varepsilon'' - 1)}{2V_{\text{рез}}} V_s F_o, \quad \Delta\dot{\omega}_{\text{общ}} = -\frac{(\varepsilon' - i\varepsilon'' - 1)}{\omega_0 2V_{\text{рез}}} V_s F_o.$$

$$\frac{\Delta\Omega_{\max} - \Delta\omega_{\text{общ}}}{\Delta\Omega_{\max}} = \left( 1 - \frac{1}{4} F_o \right),$$

$$\frac{\Delta\Omega_{\max} - \Delta\omega_{\text{общ}}}{\Delta\Omega_{\max}} = 1 - \frac{1}{4} \left[ \left[ 1 - \frac{\sin \frac{\pi\alpha}{a}}{\frac{\pi\alpha}{a}} \cos \frac{\pi}{a}(a-2\Delta) \right] \left[ 1 - \frac{\sin \frac{p\pi h}{L}}{\frac{p\pi h}{L}} \cos \frac{p\pi}{L}(L-2\Delta l) \right] \right] -$$

относительное изменение комплексной частоты от максимального значения за счёт неточной установки по осям  $x$  и  $z$  (расположение образца параллельно полю).

### 3 Композиционные материалы на основе нанотрубок

#### 3.1 Углеродные нанотрубки

Нанотрубки – это выдающееся открытие современной науки. Такие необычные структуры были обнаружены японским учёным Иджимой в 1991 году, когда он изучал осадок при образовании на катоде при распылении графита в электрической дуге. Осадок состоял из микроскопических нитей и волокон. С помощью электронного микроскопа Иджима проделал измерения, которые показали, что диаметр этих нитей не превышает нескольких нанометров, а длина от одного до нескольких микрон. А также учёные обнаружили, что такие тонкие трубочки состоят из одного или нескольких слоев, каждый из которых представляет гексагональную сетку графита. Основой является шестиугольники, в вершинах углов которых расположены атомы углерода [24, 25]. Такие протяжённые структуры, состоящие из свёрнутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах, получили название «углеродные нанотрубки» (рисунок 6).

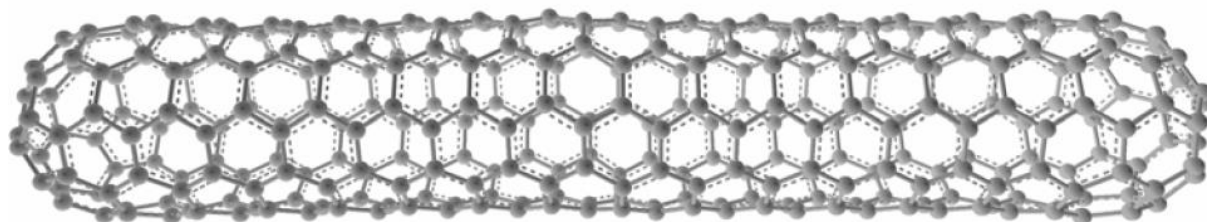


Рисунок 6 – Углеродная нанотрубка

Углеродные наноматериалы обладают широким перечнем уникальных свойств, что определяет их использование во многих областях [26]. Нанотрубки представляют собой одностенные или многостенные полые графитовые цилиндры. В данной работе в качестве наполнителя используются одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ).

##### 3.1.1 Свойства углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства молекул и твердого тела и рассматриваются некоторыми исследователями как промежуточное состояние вещества.

### 3.1.1.1 Механические свойства

УНТ может быть представлена как тонкая цилиндрическая оболочка. Упругие механические свойства протяженной цилиндрической структуры характеризуются набором параметров (модулей упругости), представляющих собой коэффициенты пропорциональности между напряжением и деформацией такой оболочки в определенном направлении. Модули упругости определяются при условиях малой нагрузки, когда деформация имеет упругий обратимый характер.

Основным параметром УНТ, характеризующим её прочность на растяжение, является продольный модуль Юнга  $E$ , который определяется выражением:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{N}{2\pi R h \varepsilon},$$

где  $\sigma$  – продольное напряжение, представляющее собой отношение продольного растягивающего усилия  $N$ , приложенного к нанотрубке, к площади поперечного сечения,  $\varepsilon$  – относительное растяжение (изменение длины нанотрубки) при таком напряжении,  $R$  – радиус нанотрубки,  $h$  – толщина её стенок. Показано, что УНТ обладают рекордно высоким значением модуля Юнга [27–30]. Это обусловлено совершенством их структуры и силой химической связи между атомами углерода. Данная характеристика нашла применение в получении сверхпрочных волокон. Так, результаты многочисленных экспериментов показывают, что величина модуля Юнга однослойной УНТ превышает рекордное значение 1 ТПа. Столь высокая жесткость нанотрубок в сочетании с их гибкостью, относительно низким удельным весом и химической стабильностью заставляет относиться к данному объекту как к основе будущих материалов, обладающих уникальными механическими свойствами.

### 3.1.1.2 Электрические свойства

Наиболее интересное свойство углеродных нанотрубок заключается в том, что они могут быть металлическими или полупроводящими в зависимости от их диаметра и хиральности. Термин хиральность относится к направлению сворачивания трубки относительно графитового листа.

Металлические нанотрубки проводят электрический ток даже при абсолютном нуле температур, в то время как проводимость полупроводниковых трубок равна нулю при абсолютном нуле и возрастает при повышении температуры. Иначе говоря, у полупроводниковых трубок есть энергетическая щель на поверхности Ферми [31].

Под сверхпроводимостью понимается полное отсутствие электрического сопротивления, которое наблюдается в определенных материалах при их охлаждении ниже температуры сверхпроводящего перехода.

### 3.2 Композиционные материалы

Композиционный материал – искусственно созданный материал, состоящий из двух или более компонентов.

При изготовлении композиционных материалов (КМ) конструкционного назначения основной целью наполнения является получение усиленного полимерного материала, т.е. материала с улучшенным комплексом физико-механических свойств. При создании КМ со специальными свойствами наполнители, как правило, вводятся для того, чтобы придать материалу не механические, а желаемые электрофизические, термические, сенсорные и др. свойства [32].

Много исследований в последнее время посвящено КМ с нанотрубками в качестве наполнителей. В статье [33] авторы обнаружили, что в области концентраций нанотрубок от 0.4 до 2 масс. % в композите из эпоксидной смолы и нанотрубок действительная и мнимая части ведут себя немонотонно и могут уменьшаться в несколько раз. Ученые предположили, что это связано с перестройкой структуры пучков нанотрубок в композите.

В работах [33, 34] показано, что электромагнитные характеристики композита на основе УНС меняются при изменении их морфологии.

Добавка 1 масс. % УНТ в стекломассу и ее перетирание до технологической операции спекания приводит к повышению прочности модифицированного пенного стекла в 4-5 раз. Структура такого стекла характеризуется наличием сферических пор с широким распределением по размерам от нано- до микрометров [35]. Полученные результаты указывают на существенное повышение

характеристик строительных и полимерных КМ, модифицированных добавками фуллеренов и УНТ.

В [36] проведено исследование композитов на основе УНТ для определения возможности их применения в качестве радиоотражающих или радиопоглощающих материалов. Показано, что с увеличением концентрации нанотрубок до 1 мас. % ДП увеличивается. При концентрациях 2 мас. % и выше наблюдается переход композита по электрическим свойствам от непроводящего к проводящему материалу.

При добавлении 0,05 масс. % многостенных углеродных нанотрубок в состав эпоксидной смолы ЭДТ-10 происходит увеличение предела прочности при сжатии на 23,7 %, в остальных случаях у ЭД-20 и КДА подобного эффекта не наблюдается, а наоборот, происходит незначительное снижение величины предела прочности при сжатии на 7,5 и 5,5 %, соответственно [37]. Результаты, полученные для смолы ЭДТ-10, свидетельствуют о перспективности применения УНТ в производстве полимерных композиционных материалов.

#### 4 Экспериментальные исследования

##### 4.1 Моделирование диэлектрической проницаемости в программе MathCad

На языке программирования MathCad промоделирован объёмный прямоугольный резонатор с помещённым в него образцом цилиндрической формы.

По формуле (11) был проведён расчёт изменения ухода частоты резонатора при внесении в его полость исследуемого образца.

Входные данные для расчёта:  $a = 0,023$ ;  $b = 0,010$ ;  $L = 0,25$ ;  $\alpha = 0,002$ ;  $h = 0,002$ ;  $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ ;  $p = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\varepsilon' = 2$ ;  $\varepsilon'' = 0$ .

Сдвиг образца относительно центра резонатора вдоль оси  $x$  и  $z$ , соответственно:  $\Delta = 0,0002, 0,0003 \dots a/2$ ;  $\Delta_1 = L/2$ .

Объёмы резонатора и образца, соответственно:  $V_r = a \times b \times L$ ;  $V_s = \alpha \times h \times b$ ;

$$F_0(\Delta) := \left[ \alpha - \frac{a}{\pi} \cos \frac{\pi}{a} (a - 2\Delta) \sin \frac{\pi \alpha}{a} \right] \times b \times \left[ h - \frac{L}{p\pi} \cos \frac{p\pi}{L} (L - 2\Delta_1) \sin \frac{p\pi h}{L} \right].$$

Добротность является величиной, обратной относительно изменению ухода частоты. На рисунке 7 приведена зависимость добротности резонатора от местоположения образца для разных значений  $\varepsilon'$  при  $p = 3$ .

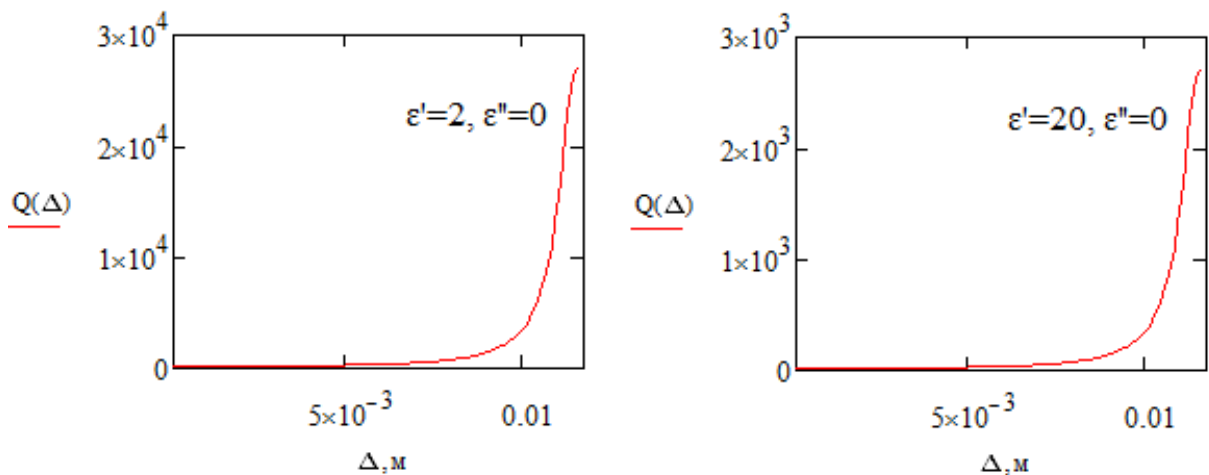


Рисунок 7 – Зависимость  $Q$  от сдвига по широкой стенке резонатора для разных величин  $\varepsilon'$  (образец находится в центре резонатора относительно длинной стенки резонатора)

Из рисунка 7 видно, что при сдвиге образца потери уменьшаются. Об этом свидетельствует рост добротности системы. Ход полученных зависимостей одинаков, но величина добротности зависит от значения  $\varepsilon'$ : когда образец



находится около узкой стенки резонатора, в случае  $\epsilon' = 2$  добротность  $3 \times 10^4$ , а при  $\epsilon' = 20$  добротность  $3 \times 10^3$ , т.е.  $\epsilon'$  оказывает влияние на добротность системы при внесении исследуемого образца.

На рисунке 8 приведена зависимость добротности от местоположения образца для разных значений  $\epsilon'$  при  $p = 3$  (сдвиг образца относительно центра резонатора вдоль оси  $x$  и  $z$ , соответственно:  $\Delta = a/2$ ;  $\Delta_1 = 0,0002, 0,0003 \dots L/2$ ).

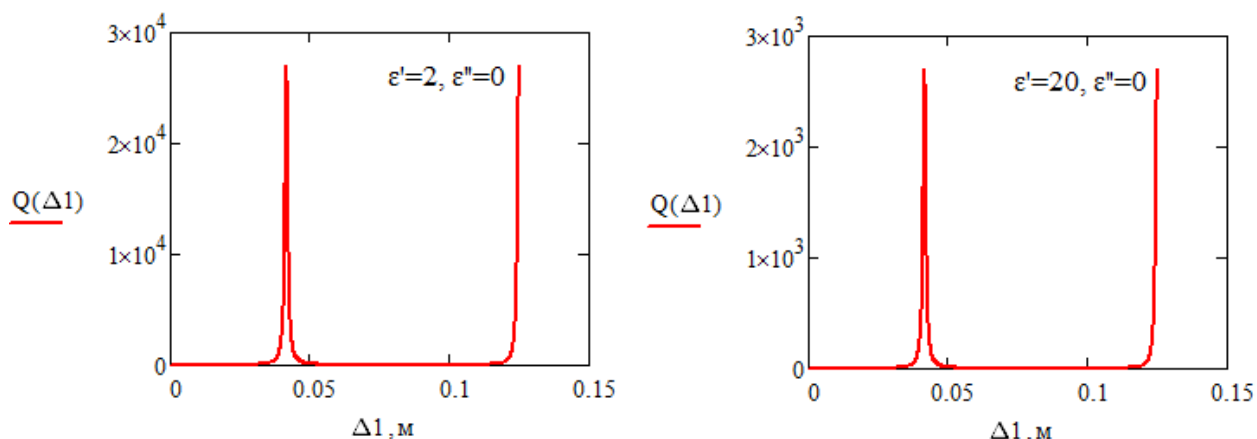


Рисунок 8 – Зависимость  $Q$  от сдвига по длине резонатора для разных величин  $\epsilon'$  (образец находится в центре резонатора относительно широкой стенки резонатора)

Из рисунка 8 видно, что добротность системы при помещении образца в пучность поля минимальная, а добротность системы в случае, если образец находится в узле поля или около стенки резонатора, – наибольшая, так как этом случае образец вносит наименьшие изменения в картину поля в резонаторе.

#### 4.2 Оценка применимости метода малых возмущений для стержневых образцов

Для оценки применимости метода малых возмущений для стержневых образцов исследуемых материалов было проведено моделирование прямоугольного резонатора с помещенным в его полость образцом в виде тонкого стержня из исследуемого материала. Исходными данными при моделировании являлись табличные значения для фторопласта [38]:  $\epsilon'=2,1$  и  $\epsilon''=0,00042$ . Исследование электрофизических характеристик материалов проводилось для основного типа колебания  $H_{10p}$ . Размеры стержней варьировались для того, чтобы

определить допустимую погрешность комплексной диэлектрической проницаемости. А также, были определены максимальные сдвиги образца в полости прямоугольного резонатора [39]. Тем самым, можно оценить границы применимости ММВ.

В таблицах 1 – 3 представлены результаты моделирования относительной погрешности комплексной диэлектрической проницаемости образцов фторопласта для числа вариаций  $p = 1, 3, 5$ .

Таблица 1 – Относительная погрешность комплексной диэлектрической проницаемости образцов фторопласта с учетом размера для  $H_{10p}$

$V_s, \text{мкм}^3$	$p=1$		$p=3$		$p=5$	
	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$
10×10000×10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100×10000×2500	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
2000×10000×2000	0,3	0,7	0,4	0,7	0,4	0,8
2500×10000×100	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица 2 – Относительная погрешность комплексной диэлектрической проницаемости образцов фторопласта  $V_s=2500 \times 10000 \times 100 \text{ мкм}^3$  с учетом местоположения в полости резонатора вдоль широкой стенки для  $H_{101}$

$p=1$			$p=3$			$p=5$		
$\Delta, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$
0,000	0,5	0,97	0,000	0,5	0,97	0,000	0,5	0,97
0,001	1,5	2,74	0,001	1,5	2,74	0,001	1,5	2,74
0,002	4,2	8,10	0,002	4,2	8,10	0,002	4,2	8,10
0,003	8,7	16,53	0,003	8,7	16,53	0,003	8,7	16,53
0,004	14,4	27,44	0,004	14,4	27,44	0,004	14,4	27,44
0,005	21,0	40,02	0,005	21,0	40,02	0,005	21,0	40,02

Таблица 3 – Относительная погрешность комплексной диэлектрической проницаемости образцов фторопласта  $V_s=2500 \times 10000 \times 100 \text{ мкм}^3$  с учетом местоположения в полости по длине резонатора для  $H_{101}$

$p=1$			$p=3$			$p=5$		
$\Delta l, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta l, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$	$\Delta l, \text{м}$	$\Delta\epsilon', \%$	$\Delta\epsilon'', \%$
0,000	0,5	0,97	0,000	0,5	0,97	0,000	0,5	0,97
0,001	0,5	0,98	0,001	0,6	1,11	0,001	0,7	1,14
0,002	0,5	1,02	0,002	0,8	1,53	0,002	1,3	2,52
0,003	0,6	1,11	0,003	1,2	2,23	0,003	2,3	4,44
0,004	0,6	1,22	0,004	1,7	3,20	0,004	3,7	7,09

Продолжение таблицы 3

$p=1$			$p=3$			$p=5$		
$\Delta l$ , м	$\Delta \epsilon'$ , %	$\Delta \epsilon''$ , %	$\Delta l$ , м	$\Delta \epsilon'$ , %	$\Delta \epsilon''$ , %	$\Delta l$ , м	$\Delta \epsilon'$ , %	$\Delta \epsilon''$ , %
0,005	0,7	1,36	0,005	2,3	4,44	0,005	5,5	10,42
0,024	5,1	9,70	0,008	5,1	9,70	0,006	7,5	14,39

Таким образом, из полученных данных видно, что ММВ может быть применим, когда объем образцов много меньше объема резонатора и, например, составляет  $10 \times 10000 \times 10$  мкм<sup>3</sup> по сравнению с  $23 \times 10 \times 250$  мм<sup>3</sup>. При допустимом сдвиге образца в полости резонатора вдоль широкой стенки не более 2 мм относительная погрешность действительной части диэлектрической проницаемости составляет около 5 %, мнимой – около 8 %. А при допустимом сдвиге образца в полости резонатора по длине стенки резонатора не более 5 мм относительная погрешность действительной части диэлектрической проницаемости составляет около 6 %, мнимой – около 10 %.

#### 4.3 Исходные компоненты для приготовления композита

В качестве фазы, взаимодействующей с электромагнитным излучением, были взяты ОУНТ.

ОУНТ произведены фирмой «TUBALL». Материал содержит 75% и более ОУНТ диаметром 1,97 нм (таблица 4). Пилотная промышленная установка синтеза ОУНТ «Graphetron 1.0» установлена в Центре наномодифицированных материалов Технопарка Новосибирского Академгородка, в R&D-центре компании OCSiAl [40].

В качестве связующего использовался клей эпоксидный универсальный марки ЭДП. В комплект вместе с модифицированной эпоксидной смолой (основой) входит отвердитель – полиэтилеполиамин (ПЭПА). Диэлектрическая проницаемость ЭДП:  $\epsilon' = 3,6$  и  $\epsilon'' = 0,258$  [41].

Таблица 4 – Описание используемых углеродных наполнителей

	ОУНТ
Содержание углерода	>85 масс.%
CNT	$\geq 75$ масс.%
Число слоев CNT	1-2 ед.
Средний внешний диаметр	$1,8 \pm 0,4$ нм
Длина CNT	>5 мкм
Фирма-изготовитель	OCSiAl

#### 4.4 Изготовление образцов

Для приготовления образцов композитов в эпоксидную смолу ЭДП добавляли необходимое количество углеродного материала и полученную смесь размешивали вручную до получения однородной массы. Равномерного распределения нанонаполнителя в смеси достигали обработкой в ультразвуковой установке в течение 40 мин (частота 22 кГц, мощность 500 Вт). В качестве отвердителя использовали ПЭПА с массовым отношением ЭДП: ПЭПА = 4:1. Отверждение композита проводили в специальных цилиндрических формах. Полимеризация композитов проводилась при комнатной температуре в течение 24 часов. Образцы для экспериментов представляли собой стержни цилиндрической формы длиной 7 см. Диаметр исследуемых образцов равнялся 2 мм.

Состав экспериментальных образцов приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Компонентный состав образцов

№ образца	смола+отвердитель, %	ОУНТ, масс. %
1	100	0,0
2	99,9	0,1
3	99,5	0,5
4	99,3	0,7

#### 4.5 Методика измерения удельной проводимости образцов

С помощью LCR измерителя измеряется удельная проводимость экспериментальных образцов. Для этого на торцевые поверхности образцов наносится проводящий клей «Контактол». Далее щипцы измерителя присоединяются к торцевым поверхностям образцов. Фиксируется измеренное значение электрической проводимости. Пересчет электрической проводимости в удельную проводимость производится по формуле:

$$\sigma = G \frac{l}{S},$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость,  $G$  – электрическая проводимость,  $l$  – длина образца и  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

На рисунке 9 представлены результаты измерения удельной проводимости образцов композиционного материала.

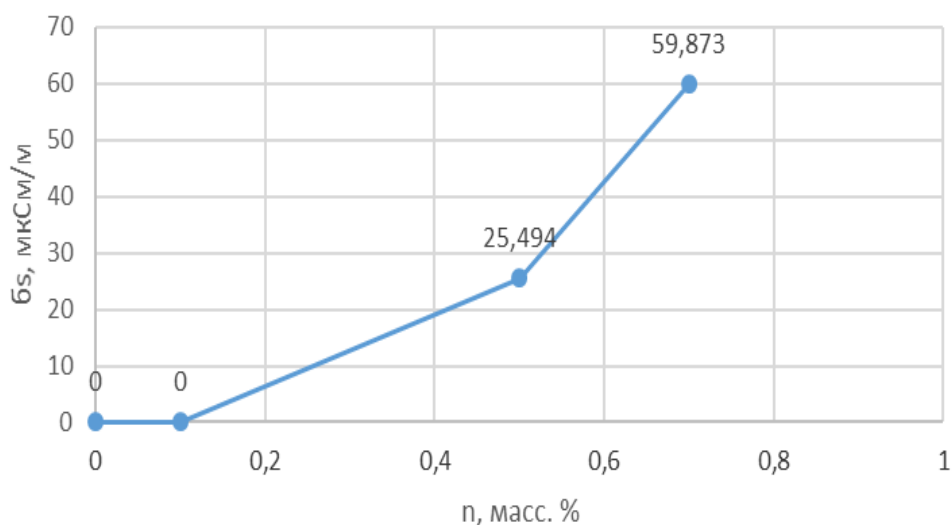


Рисунок 9 – Зависимость удельной проводимости экспериментальных образцов от концентрации нанотрубок

Из рисунка 9 видно, что с увеличением концентрации ОУНТ в композите до 0,7 масс. % происходит резкое увеличение удельной проводимости образцов. Это может быть связано с преодолением перколяционного порога для наполнителя в виде нанотрубок, а нанотрубки – это протяженные проводящие структуры.

#### 4.6 Методика измерения параметров образцов

Одной из задач, поставленной перед данной работой, является исследование электрофизических свойств образцов композиционных диэлектрических материалов. Измерения проводятся на установке E8363B фирмы Agilent Technologies по резонаторной методике. В качестве измерительной ячейки выступает набор прямоугольных многомодовых резонаторов, перекрывающих диапазон частот от 3 ГГц до 13,7 ГГц.

Для измерения электромагнитных характеристик сначала снимается АЧХ пустого резонатора, а затем АЧХ резонатора с помещенным в него образцом (рисунок 10). При этом измеряются резонансная частота ( $\omega$  и  $\omega_0$ ) и полуширина резонансной кривой ( $\omega'' - \omega'$ ,  $\omega_0'' - \omega_0'$ ).

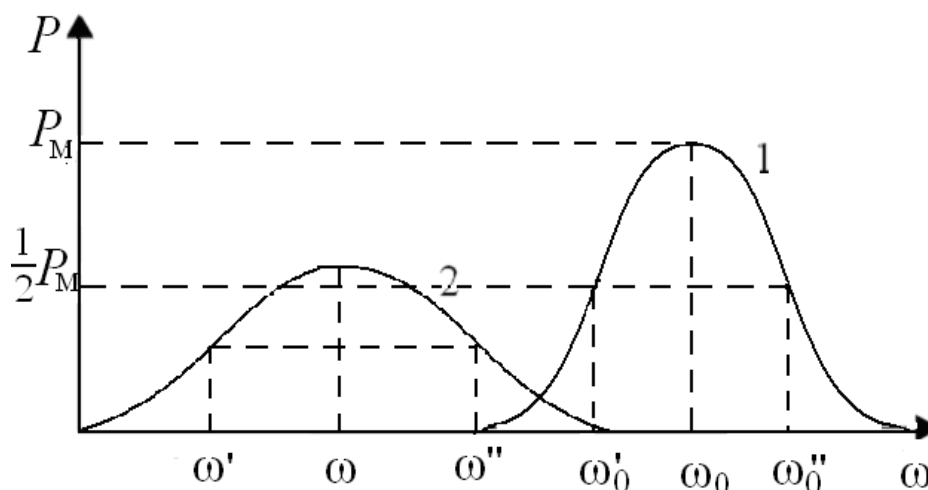


Рисунок 10 – АЧХ невозмущённого объёмного резонатора (кривая 1) и с помещённым в его полость образцом исследуемого материала (кривая 2)

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости в рамках приближений теории возмущений рассчитываются по формулам:

$$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{V_r \Delta\omega'}{2V_s \omega_0}, \quad (12)$$

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0} = \frac{V_r \Delta\omega''}{2V_s \omega_0}, \quad (13)$$

где  $\Delta\omega' = \omega - \omega_0$  – сдвиг резонансной частоты, а  $\Delta\omega'' = (\delta\omega - \delta\omega_0)/2$  – изменение полуширины резонансной линии при внесении исследуемого образца [42].

Расчетные формулы (12) и (13) выведены при условиях: 1) электромагнитное поле в резонаторе не изменяется при внесении образца в резонатор; 2) образец должен быть в одной из предельных форм эллипсоида (длинный стержень, диск, шар, цилиндр); 3) используется квазистатическое приближение (однородное поле в объеме образца); 4) образец находится точно в пучности электрического поля; 5) образец бесконечно тонок, но имеет реальный объем.

#### 4.7 Измерение диэлектрической проницаемости образцов композиционных материалов

Для проведения натурных испытаний с целью проверки корректности формул ММВ были проведены измерения характеристик экспериментальных образцов композитов на основе углеродных нанотрубок, а также рассчитаны зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости на основе формул ММВ и формул, полученных с учетом размеров образца.

На рисунках 11 и 12 представлены результаты измерений спектров комплексной диэлектрической проницаемости образца №2 на основе ОУНТ.

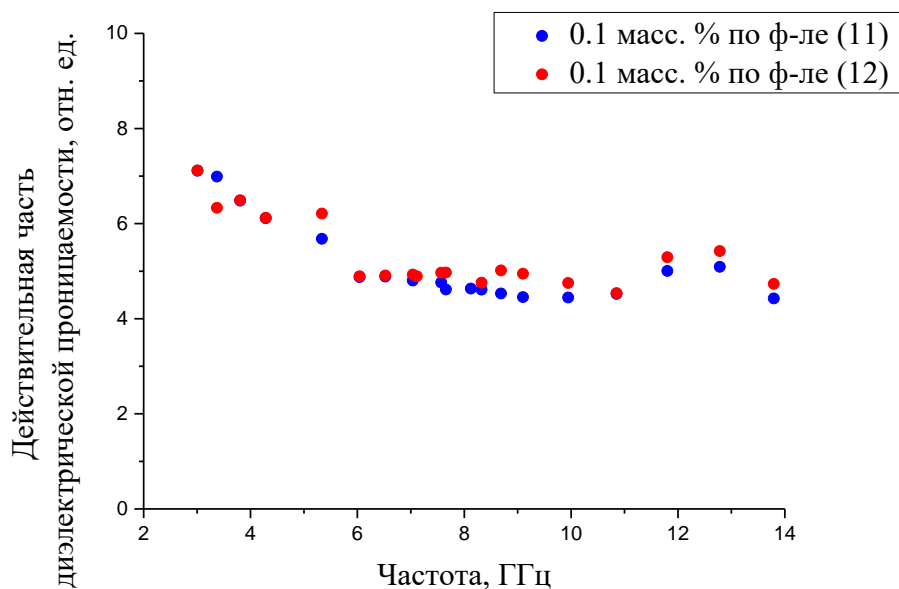


Рисунок 11 – Спектры действительной части диэлектрической проницаемости

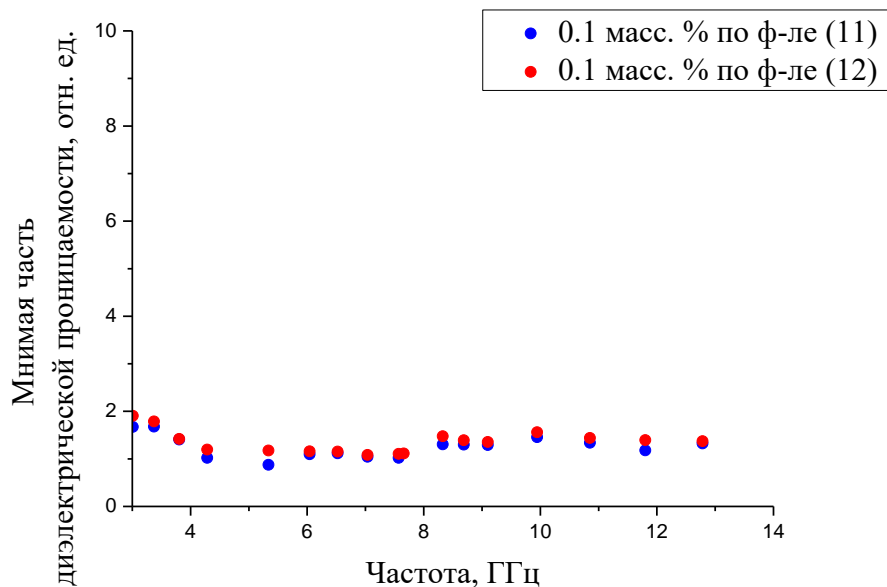


Рисунок 12 – Спектры мнимой части диэлектрической проницаемости

Из рисунков 11 и 12 видно, что при использовании формул (11), в которых проводится учет геометрических размеров образца, значения ДП уменьшаются по сравнению с формулами ММВ (12).

Результаты измерений комплексной ДП, рассчитанной по формуле (11) для композита с концентрацией ОУНТ 0,1 масс. %, могут быть использованы при расчетах поглощающих/отражающих электромагнитное излучение покрытий.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были получены следующие основные результаты:

- а) проведен литературный обзор;
- б) получены расчётные выражения для метода малых возмущений, учитывающие геометрические размеры и смещение образца из пучности электрического поля;
- в) проведено численное моделирование по полученным расчетным выражениям;
- г) изготовлены экспериментальные образцы;
- д) освоена методика и проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости с использованием прямоугольного резонатора;
- е) определено влияние размера образца на результаты измерений диэлектрической проницаемости;
- ж) работа представлена на конференциях: «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск), МНСК-2017 (г. Новосибирск), «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение» (г. Томск) и СНИИ-2017 (г. Томск).

Расчётные формулы для измерения электромагнитных характеристик материалов, представленные в выпускной квалификационной работе бакалавра, будут использованы при разработке учебно-методического пособия по специальному лабораторному практикуму для студентов.

В будущем планируется написать программу решения обратной задачи на языке Pascal, а также провести моделирование электродинамической системы в программе COMSOL.

Результаты работ апробированы на конференциях:

XIX Всероссийская научно-техническая конференция "Современные проблемы радиоэлектроники", г. Красноярск, 2016.

X Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2016.

Международная научная студенческая конференция МНСК, г. Новосибирск, 2017.

IV Всероссийский конкурс научных докладов студентов «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение», г. Томск, 2017.

XIV Всероссийская конференция Студенческих научно-исследовательских инкубаторов, г. Томск, 2017.

Исследование проводилось в центре коллективного пользования Томского государственного университета «Центр радиоизмерений, ТГУ».

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Благодарим Сусяева Валентина Ивановича за помощь при постановке целей и задач работы, Журавлёва Виктора Алексеевича и Коровина Евгения Юрьевича за помощь при экспериментальных исследованиях и обсуждении результатов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Егоров В.Н. Микроволновые диэлектрические резонаторы в физических измерениях: Автореф. дисс. ... докт. физ. – мат. наук // Учреждение Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений ФГУП "ВНИИФТРИ". – Иркутск. – 2013. – С. 4 – 95.

2 Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на с.в.ч. // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 5 – 38.

3 Gorriti A. G. Comparison of the different reconstruction techniques of permittivity from S-parameters / A. G. Gorriti, E. C. Slob // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 2005. – V. 43, № 9. – P. 2051 – 2057.

4 Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell / K. Folgero // Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. – 1998. – V. 47, № 4. – P. 881 – 885.

5 Bois K. J. Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials / K. J. Bois, L. F. Handjojo, A. D. Benally // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – V. 48, № 6. – P. 1141 – 1148.

6 Пархоменко М. П. Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне волн. / М.П. Пархоменко, Д.С. Калёнов, Ю.Ф. Абакумов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ – техника. – 2013. Вып. 2. – С. 43 – 57.

7 Nakamura T. Precise measurement of complex permittivity of materials for telecommunications devices / T. Nakamura, Y. Nikawa // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2011. – V. 1, № 3. – P. 66 – 70.

8 Komarov V.V. Modeling control over determination of dielectric properties by the perturbation technique / V.V. Komarov, V.V. Yakovlev // Microwave and optical technology letters. – 2003. – V. 39, № 6. – P. 443 – 446.

9 Gangwar R.K. Study of dielectric constant of (1-x) Zn.xMg.TiO<sub>3</sub> (ZMT) ceramic material at microwave frequencies as a function of composition x and processing temperature / R.K. Gangwar, S.P. Singh, M. Choudhary, N.K. Singh, D. Kumar, O.

Parkash // Journal of Electromagnetic Analysis & Applications. – 2010. – № 2. – P. 664 – 671.

10 Ложкин Л.Д. Моделирование электрофизических параметров тонких образцов на основе объёмных резонаторов в среде проектирования Microwave Studio / Л.Д. Ложкин, А.А. Солдатов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12. – С. 23 – 30.

11 Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн // М.: Наука. – 1978. – С. 145 – 253.

12 Дорофеев И. О. Квазиоптический СВЧ резонатор с литым остеклованным магнитным микропроводом / И. О. Дорофеев, Г. Е. Дунаевский, И. А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9 – 2. С. 30 – 32.

13 Завьялов А. С. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах / А. С. Завьялов, Г. Е. Дунаевский. – Томск, Изд-во ТГУ, 1986. – 355 с.

14 Шестопалов В. Д. Методы измерения диэлектрических проницаемостей вещества на СВЧ / В. Д. Шестопалов, К. П. Яцук // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 24, Вып. 4. – С. 721 – 755.

15 Любченков А.В. Анализ методов измерения электродинамических параметров материалов, поглощающих сверхвысокочастотное электромагнитное излучение / А.В. Любченков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 9. – С. 17 – 19.

16 Пархоменко М. П. Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне волн / М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, Ю. Ф. Абакумов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ – техника, 2013. Вып. 2, С. 43 – 57.

17 Егоров В.Н. Метод  $H_{01p}$  – резонатора для измерения электромагнитных параметров стержней, трубок, порошков и жидкостей. / В.Н. Егоров, Е.Ю. Токарева // Изв. вузов. Физика. – 2013. – №8/2. – С. 350 – 352.

18 Chen L.G. Amendment of cavity perturbation method for permittivity measurement of extremely low-loss dielectrics / L.G. Chen, C.K. Ong, B.T. Tan // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1999. – V. 48, № 6. – P. 1031 – 1037.

- 19 Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн // М.: ЛИБРОКОМ. – 2012. – С. 243 – 310.
- 20 Erdogan L. Dielectric properties of oil sands at 2,45 GHz with TE<sub>1,0,11</sub> mode determined by a rectangular cavity resonator / L. Erdogan, C. Akyel // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 2011. – V. 45, № 1. – P. 15 – 23.
- 21 Говорков В.А. Электрические и магнитные поля // М.: «Государственное энергетическое издательство». – 1960. – С. 132 – 157.
- 22 Сусяев В.И. Прямоугольный многомодовый сверхвысокочастотный резонатор / В.И. Сусяев // Методическое пособие. – Томск: Изд-во Томск. ун-та. – 1994. – С. 4 – 16.
- 23 Гуреев А.В. Расчет добротности СВЧ резонаторов / А.В. Гуреев // Радиотехника. – 1988. – № 5. – С. 79 – 81.
- 24 Pereplet URL: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/742.html> (Дата обращения 19.05.2017).
- 25 Поливанова А.С. Применение углеродных нанотрубок // Труды XII Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – С. 89 – 93.
- 26 Tibbetts Gary G. A review of the fabrication and properties of vapor-grown carbon nanofiber/polymer composites / Gary G. Tibbetts, Max L. Lake, Karla L. Strong, P. Brian // Composites Science and Technology. – 2007. – P. 1709 – 1718.
- 27 Huang Y. Thickness of Graphene and Single-Wall Carbon Nanotubes / Y. Huang, J. Wu, K.C. Hwang // PRB. – 2006. – V. 74, № 24. – P. 245413 (9).
- 28 Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук. 2002. – Т. 172, № 4. – С. 401 – 438.
- 29 Sears A. Macroscopic Properties of Carbon Nanotubes from Molecular-Mechanics Simulation // A. Sears, R.C. Batra // PRB. – 2004. – V. 69, № 23. – P. 235406 (10).
- 30 Yakobson B.I Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities Beyond the Linear Response / Yakobson B.I., Brabec C.J., Bernholc J // PRL. – 1996. – V. 76, № 14. – P. 2511 – 2514.
- 31 Нанотрубки. // URL: <http://museion.ru/nano/page/nanotube.html> (дата обращения 19.05.2017)

32 Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов / В.Г. Шевченко // Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные материалы». – Москва: Изд-во Москв. ун-та. имени М.В. Ломоносова. – 2010. – С. 6 – 20.

33 Мурадян В.Е. Диэлектрические свойства композитов, модифицированных углеродными наноструктурами, в микроволновом диапазоне / В.Е. Мурадян, Е.А. Соколов, С.Д. Бабенко, А.П. Моравский // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, Вып. 2. – С. 83 – 87.

34 Структура, свойства и методы использования углеродных нанотрубок // URL: <http://studyport.ru/referaty/tochnyje-nauki/3737-struktura-svoystva-i-metody-ispolzovanija-uglerodnyh-nanotrubok> (дата обращения 18.05.2017).

35 Соколов Ю.В. Применение фуллеренов и углеродных нанотрубок для создания композиционных материалов / Ю.В. Соколов, Л.А. Битюцкая, В.Т. Перцев, Н.С. Гончарова // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – №6. – С. 94 – 95.

36 Качусова А.О. Исследование спектров диэлектрической проницаемости композитов на основе углеродных нанотрубок / А.О. Качусова, О.А. Доценко // Евразийское научное объединение. – 2015. – № 2. – С. 22 – 24.

37 Никулин С. М. Синтез многослойных углеродных нанотрубок и их применение в производстве композиционных материалов / С. М. Никулин, Д. А. Руденко // Перспективные материалы. – 2011. – С. 54 – 62.

38 Таблица электрических и тепловых свойств изоляционных материалов при нормальных условиях // URL: [http://www.spcable.ru/info/help/fiz\\_mat.html](http://www.spcable.ru/info/help/fiz_mat.html) (дата обращения 20.05.2017).

39 Поливанова А.С. Оценка погрешности метода малых возмущений при расчете диэлектрической проницаемости материалов / А.С. Поливанова // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – С. 20.

40 TUBALL – the universal nanomodifier for materials // URL: <http://ocsial.com/en/product/tuball/> (accessed 28 May 2017).

41 Диэлектрическая проницаемость некоторых материалов // URL: <http://rusautomation.ru/dielektricheskaya-pronicaemost> (дата обращения 20.05.2017).

42 Поливанова А.С. Прямоугольный резонатор для измерения диэлектрической проницаемости композитов на основе многостенных углеродных нанотрубок / А.С. Поливанова, А.О. Качусова, О.А. Доценко // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 347 – 349.

Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

## Отчет о проверке № 1

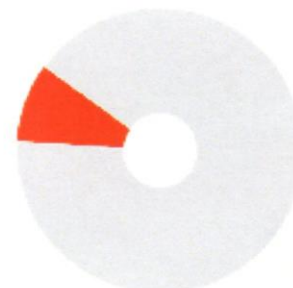
дата выгрузки: 17.06.2017 13:36:55  
 пользователь: [anvuta.poliwanowa@yandex.ru](mailto:anvuta.poliwanowa@yandex.ru) / ID: 4773472  
 отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»  
 на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

### Информация о документе

№ документа: 1  
 Имя исходного файла: Выпускная квалификационная работа 2017 \_с примечаниями\_.doc  
 Размер текста: 1125 кб  
 Тип документа: Прочее  
 Символов в тексте: 46665  
 Слов в тексте: 5341  
 Число предложений: 249

### Информация об отчете

Дата: Отчет от 17.06.2017 13:36:55 - Последний готовый отчет  
 Комментарии: не указано  
 Оценка оригинальности: 90.83%  
 Заимствования: 9.17%  
 Цитирование: 0%



Оригинальность: 90.83%  
 Заимствования: 9.17%  
 Цитирование: 0%

### Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
1.58%	[1] Скачать Современные представления о механизмах образования углеродных наноструктур. Свойства и применение углеродных нанотрубок: курсовая работа	<a href="http://studentbank.ru">http://studentbank.ru</a>	30.01.2017	Модуль поиска Интернет
1.58%	[2] курсовая : Современные представления о механизмах образования углеродных наноструктур Свойства и применение - twidler.ru (2/2)	<a href="http://twidler.ru">http://twidler.ru</a>	03.10.2015	Модуль поиска Интернет
1.35%	[3] Резонатор на основе прямоугольного волновода — текст работы	<a href="http://revolution.allbest.ru">http://revolution.allbest.ru</a>	26.05.2012	Модуль поиска Интернет