

## **1. Анкетные данные**

ФИО: Малыхин Роман Евгеньевич

Год рождения: 1992 г.

Образование: Волгоградский Государственный Технический Университет, 2013 г.,  
бакалавр физики по направлению «Физика»

Волгоградский Государственный Технический Университет, 2015 г., магистр физики  
по направлению «Физика»

## 2. Образовательный опыт до поступления в аспирантуру



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный технический университет»  
г Волгоград

ДИПЛОМ  
МАГИСТРА

103424 0592269

ДОКУМЕНТ ОБ ОБРАЗОВАНИИ И О КВАЛИФИКАЦИИ

Регистрационный номер  
2015168

Дата выдачи

30 июня 2015 года

Настоящий диплом свидетельствует о том, что

**Мальхин  
Роман Евгеньевич**

освоил(а) программу магистратуры по направлению подготовки  
03.04.02 Физика

и успешно прошел(ла) государственную итоговую аттестацию.

Решением Государственной экзаменационной комиссии  
присвоена квалификация  
магистр

Протокол № 4 от « 10 » июня 20 15 г.

Председатель  
Государственной  
экзаменационной комиссии

Руководитель организации,  
осуществляющей образовательную  
деятельность





РОССИЙСКАЯ  
ФЕДЕРАЦИЯ



Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего  
профессионального  
образования «Волгоградский  
государственный технический  
университет»  
г Волгоград

ПРИЛОЖЕНИЕ  
К ДИПЛОМУ  
магистра

103424 1068491

Регистрационный  
номер

2015168

Дата выдачи

30 июня 2015 года

## 1. СВЕДЕНИЯ О ЛИЧНОСТИ ОБЛАДАТЕЛЯ ДИПЛОМА

Фамилия **Малыхин**

Имя **Роман**

Отчество **Евгеньевич**

Дата рождения **30 августа 1992 года**

Предыдущий документ об образовании или об образовании и о квалификации

**диплом бакалавра, 2013 год**

## 2. СВЕДЕНИЯ О КВАЛИФИКАЦИИ

Решением Государственной экзаменационной комиссии присвоена квалификация  
**магистр  
по направлению подготовки  
03.04.02 Физика**

Срок освоения программы магистратуры в очной форме обучения

**2 года**



3. СВЕДЕНИЯ О СОДЕРЖАНИИ И РЕЗУЛЬТАТАХ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ МАГИСТРАТУРЫ

Наименование дисциплин (модулей) программы, вид практики	Количество зачетных единиц/ академических часов	Оценка
Философские вопросы естествознания	4 з.е.	отлично
Специальный физический практикум	5 з.е.	зачтено
Иностранный язык	4 з.е.	отлично
Распространение волн в неоднородных средах	4 з.е.	хорошо
Математические методы в физике современных радиоэлектронных технологий	4 з.е.	удовлетворительно
Техника физического эксперимента	3 з.е.	зачтено
Электроника СВЧ	7 з.е.	отлично
Современные проблемы физики	3 з.е.	зачтено
История и методология физики	3 з.е.	зачтено
Радиоизмерения	2 з.е.	зачтено
Физические основы эмиссионной спектроскопии	3 з.е.	зачтено
Электродинамика СВЧ	4 з.е.	удовлетворительно
Компьютерные технологии в науке, образовании	2 з.е.	зачтено
Биологическое действие радиоволн	3 з.е.	зачтено
Электрически активные материалы	3 з.е.	отлично
Моделирование в биофизике	4 з.е.	отлично
Научно-исследовательская работа в семестре	11 з.е.	отлично
Практика	30 з.е.	х
в том числе:		
педагогическая	6 з.е.	отлично
научно-исследовательская	24 з.е.	отлично
Государственная итоговая аттестация:	21 з.е.	х
в том числе:		
Магистерская диссертация на «Возбуждение клеток электромагнитными волнами»	х	отлично
Объем образовательной программы	120 з.е.	х
в том числе объем работы обучающихся во взаимодействии с преподавателем	984 час.	



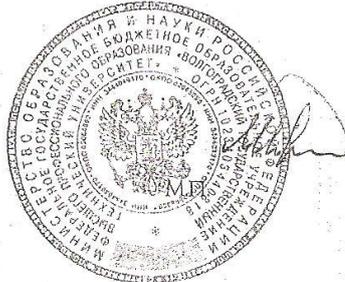
4. КУРСОВЫЕ РАБОТЫ (ПРОЕКТЫ)	ОЦЕНКА
Курсовая работа по дисциплине «Математические методы в физике современных радиоэлектронных технологий»	хорошо
Курсовая работа по дисциплине «Электроника СВЧ»	хорошо
Курсовая работа по дисциплине « Специальный физический практикум»	отлично

5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Форма обучения: очная  
направленность (профиль) образовательной программы: Физика радиоэлектронных технологий

БЕЗ ДИПЛОМА НЕДЕЙСТВИТЕЛЬНО

/ Руководитель организации,  
осуществляющей образовательную  
деятельность



А.В.Наврои

Настоящее приложение содержит \_\_\_\_\_ страниц

**3. Достижения в результате освоения основной образовательной программы  
подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре**

Предполагаемая тема исследования: сверхбыстрые фотохимические процессы.

#### 4. Достижения в научно-исследовательской деятельности



Правительство Волгоградской области  
Совет ректоров вузов Волгоградской области

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Выносятся магистранту Волгоградского  
государственного технического университета

**МАЛЫХИНУ Роману Евгеньевичу**

за работу "*Собственные электромагнитные колебания  
клеток*" (научный руководитель А. В. Харланов), удосто-  
енную **поощрительной премии** на XIX Региональной  
конференции молодых исследователей Волгоградской об-  
ласти в ноябре 2014 года по направлению "Электронные  
устройства и системы".

Зам. председателя Правительства  
Волгоградской области

А. И. Блошкин

УДК 538.569

А. В. Харланов, Р. Е. Малыхин

A. V. Harlanov, R. E. Malyhin

## ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КАПИЛЛЯРЕ С ЖИДКОСТЬЮ THE ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN A CAPILLARY WITH A LIQUID

Волгоградский государственный технический университет  
Volgograd State Technical University

E-mail: physic@vstu.ru

Целью данной работы является экспериментальное определение коэффициента поглощения СВЧ - излучения для воды и водных растворов в диапазоне частот от 37,50 ГГц до 53,57 ГГц. Для этого была собрана экспериментальная установка, с помощью которой были получены экспериментальные данные. На их основе проводится анализ зависимости коэффициента поглощения от концентрации раствора.

*Ключевые слова:* коэффициент поглощения, частота, вода, водный раствор, концентрация, волновод, электромагнитная волна, резонанс, капилляр, СВЧ излучение

The aim of this research is to experimentally determine the absorption coefficient of microwave radiation for the water and aqueous solutions in the range of frequencies from 37,50 GHz to 53,57 GHz. For this purpose an experimental facility was created, with which experimental data were obtained. On their basis the analysis of the dependence of the absorption coefficient on solution concentration.

*Keywords:* absorption coefficient, frequency, water, aqueous solution, concentration, waveguide, electromagnetic wave, resonance, capillary, microwave radiation

Влияние электромагнитных волн ММ – диапазона на биологические объекты изучается с середины прошлого века. В настоящее время только в РФ ММ - терапия используется во многих медицинских учреждениях, выпущено более 20 000 аппаратов с различной формой ММ - сигналов (узкополосные, широкополосные шумовые, с импульсной, амплитудной, частотной модуляцией).

В связи с этим, большой интерес представляет рассмотрение вопросов, связанных с поглощением электромагнитных волн в капиллярах, заполненных жидкостью (аналог кровеносных сосудов). Так, например, в работе [1] проведено теоретическое исследование распространения  $H_{10}$ -волны через волноводно-капиллярный резонатор, содержащий капилляр квадратного поперечного сечения, заполненный жидкостью и помещенный в волновод перпендикулярно его широким стенкам. Также эффекты влияния ЭМИ на жидкость в капилляре изучались в работах [2 – 5].

Исследуем поглощение волны  $TE_{m0}$  типа в прямоугольном волноводе с диэлектрической неоднородностью (капилляром с кровью).

Как аналог крови (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 64$  при  $f = 1 \text{ ГГц}$  [6]) и межклеточной жидкости, можно использовать воду и водные растворы. В работе используется вода с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 81$ .

Определим частотную зависимость коэффициента поглощения для дистиллированной

воды и водных растворов в диапазоне частот от 37,50 ГГц до 53,57 ГГц, а также проанализируем зависимости поглощения излучения от концентрации водных растворов в данном частотном диапазоне.

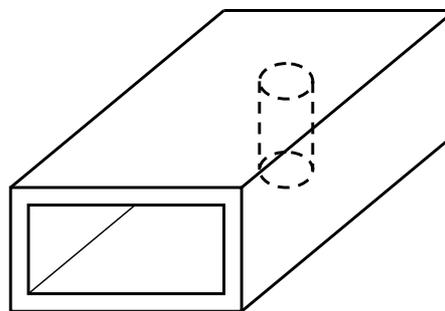


Рис. 1. Прямоугольный волновод с диэлектрической неоднородностью

В работе исследуется структура поля в капилляре, находящемся в прямоугольном волноводном тракте (рис.1) при следующих условиях:

- 1) рассматриваются только падающие  $TE_{m0}$  – волны;
- 2) ось капилляра параллельна вектору электрического поля;
- 3) диэлектрик считается изотропным, однородным, линейным, в нем могут быть потери;
- 4) капилляр распространяется на всю высоту волновода и располагается по его центру;
- 5) стенки волновода являются идеальными проводниками.

**Экспериментальная установка для определения коэффициента поглощения СВЧ излучения**  
Структурная схема установки для измерения поглощения волн водой и водными растворами приведена на рис. 2.

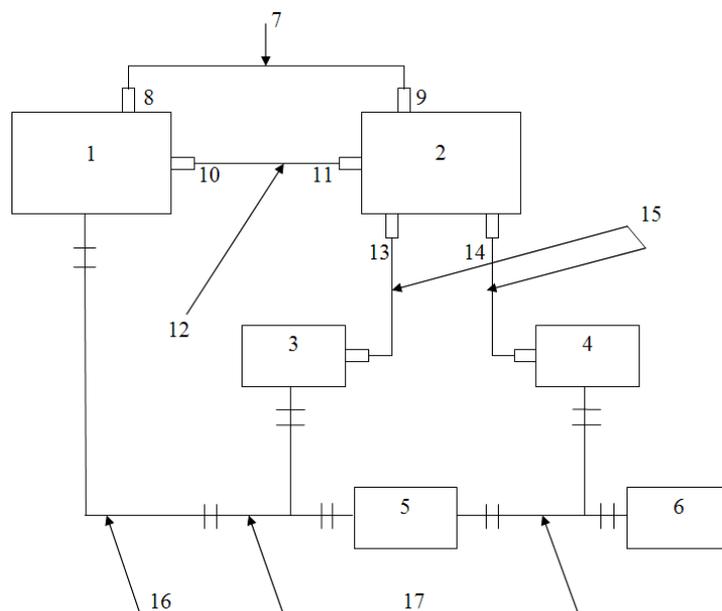


Рис. 2. Схема соединения блоков и волноводных устройств прибора для измерения ослабления:  
1 – генератор качающей частоты; 2 – индикатор КСВН и ослаблений Я2Р-67; 3,4 – головка детекторная; 5 – проверяемое устройство; 6 – нагрузка НСН; 7 – кабель; 8 – гнездо «Индикатор»; 9 – гнездо «Блок цифровой»; 10,11 – гнездо «АРМ»; 12 – кабель соединительный в.ч. НЕЭ4 851 081-9Сп; 13 – гнездо «Пад»; 14 – гнездо «Отраж»; 15 – кабель низкочастотный; 16 – волновод; 17 – ответвитель направлений

### Экспериментальное определение коэффициента поглощения

На установке, изображенной на рис. 2, проводились измерения коэффициента поглощения СВЧ – излучения для различных концентраций водных растворов. Исследовалось поглощение в дистиллированной воде, а также в водном рас-

творе сахара (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) и уксусной кислоты (2%, 8%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%). Коэффициент поглощения измеряли в ходе эксперимента для различных частот.

Полученные результаты были оформлены в виде графиков, которые приведены ниже (рис. 3 – 5).

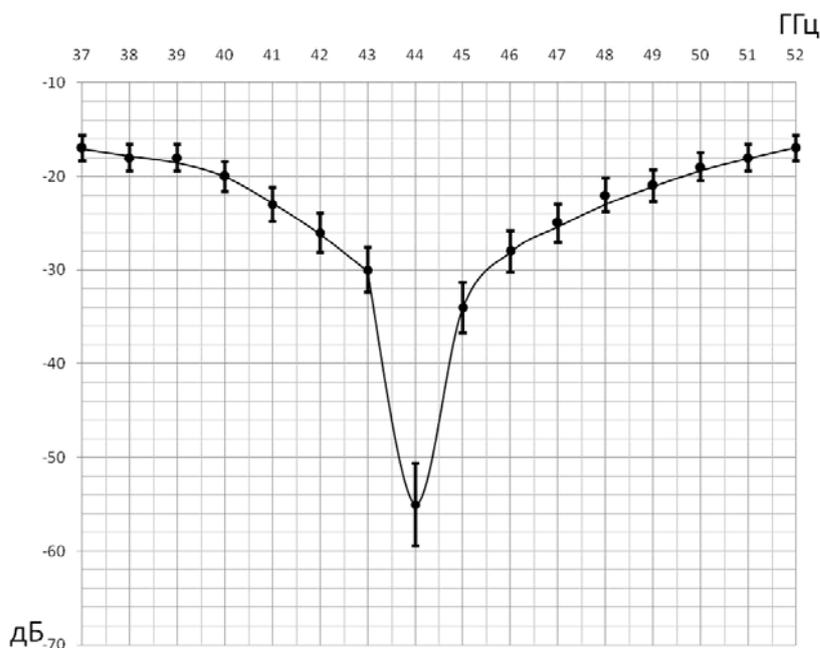


Рис. 3. Зависимость поглощения от частоты для дистиллированной воды  
Максимальное поглощение: – 55 дБ на частоте 44 ГГц

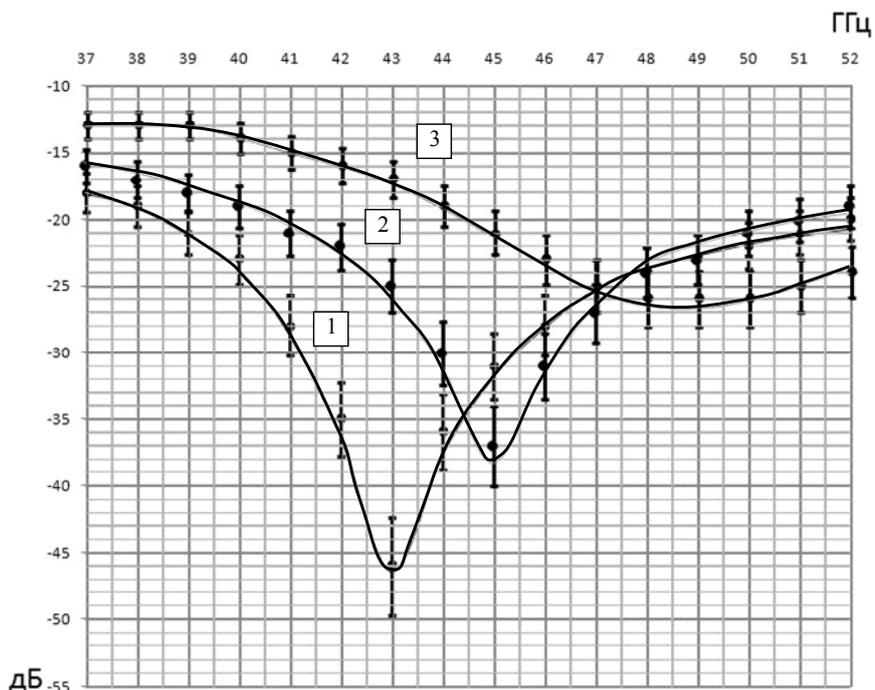


Рис. 4. Зависимость поглощения от частоты для водного раствора сахара (1 - 5%, 2 - 10%, 3 - 30%)

На графиках видно, что максимальное поглощение наблюдается для дистиллированной воды (-55 дБ), а также, что с увеличением концентрации уменьшается коэффициент поглощения и максимум поглощения сдвигается в область высоких частот [7, 8]. Абсолютная погрешность измерений рассчитывалась по формуле:

$\Delta A = \pm(0,05 \cdot A + 0,75), \text{дБ}$ ; относительная погрешность:  $\delta A = \Delta A/A, \%$ . Где  $A$  – измеренное поглощение. Пределы допускаемого значения относительной погрешности установки частоты метки в режиме качания и погрешность в режиме ручной перестройки не превышает  $\pm 1,5\%$  в рабочих условиях.

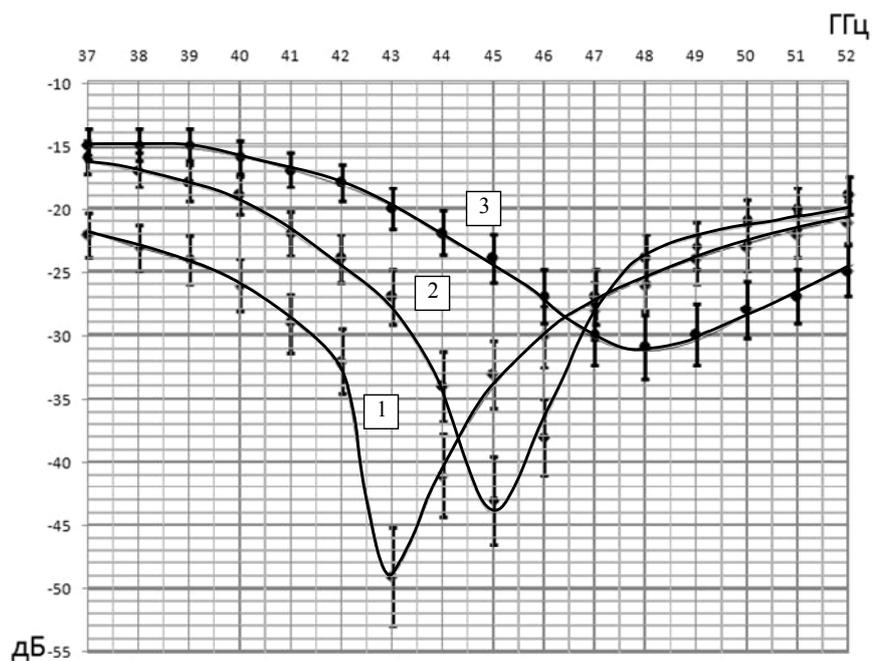


Рис. 5. Зависимость поглощения от частоты для водного раствора уксусной кислоты (1 - 2%, 2 - 15%, 3 - 30%)

### Анализ зависимости коэффициента поглощения от концентрации раствора

На основе полученных графиков, проводился анализ зависимости поглощения СВЧ - излучения от концентрации для водных растворов

сахара и уксусной кислоты [8]. Ниже приведены графики, характеризующие данную зависимость. Видно, что с увеличением концентрации раствора, коэффициент поглощения уменьшается.

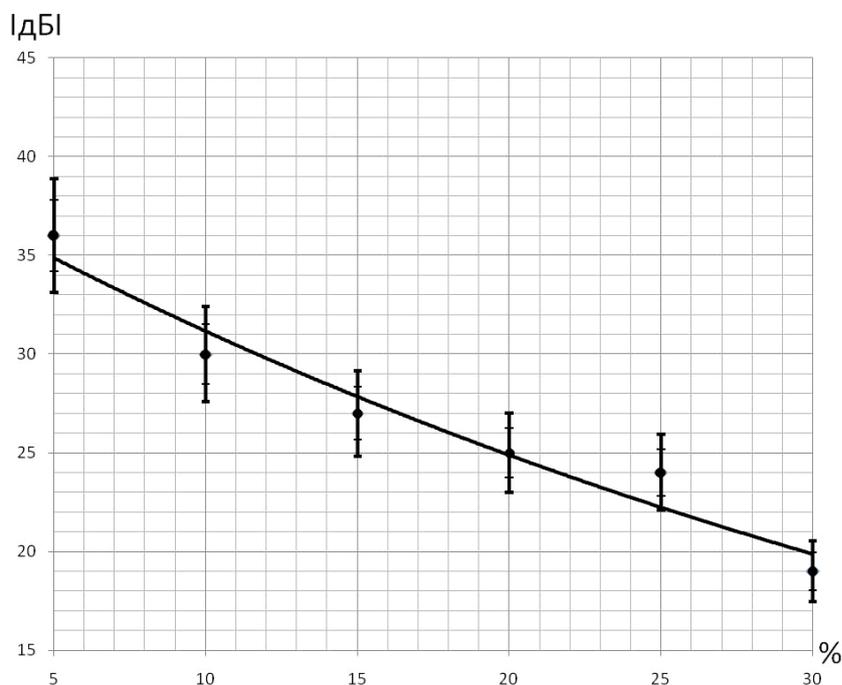


Рис. 6. Зависимость поглощения от концентрации раствора Водный раствор сахара (5-30%). Частота 44 ГГц

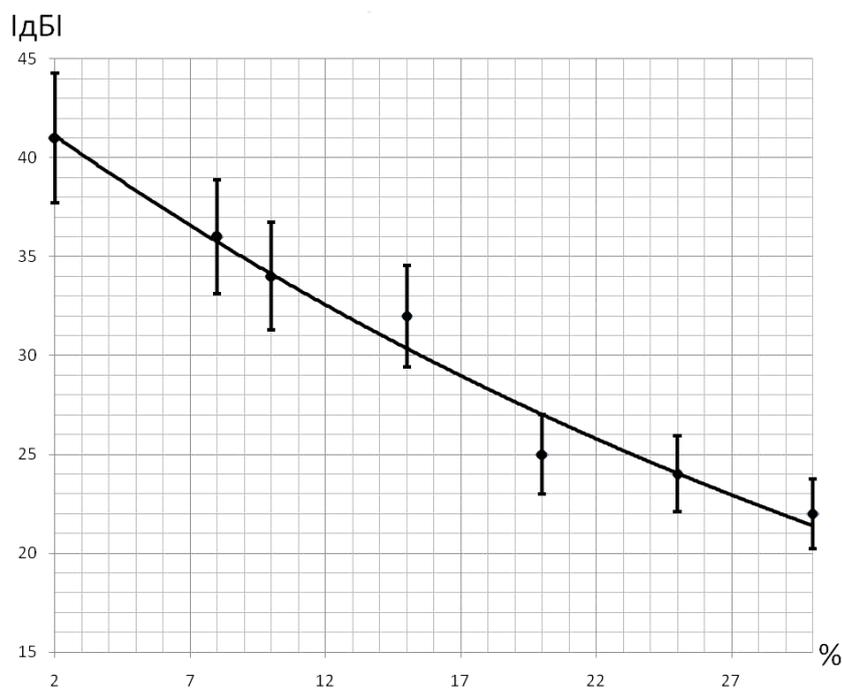


Рис. 7. Зависимость поглощения от концентрации раствора Водный раствор уксусной кислоты (2-30%). Частота 44 ГГц

Уменьшение поглощения объясняется тем, что при увеличении концентрации раствора расстояние между молекулами уменьшаются, что влияет на поглощение СВЧ – излучения каждой молекулой. При поглощении ЭМВ молекула переходит в возбужденное состояние, находясь в котором она обладает меньшей способностью к поглощению. А за счет межмолекулярного взаимодействия между молекулами воды и растворителем, часть молекул воды теряет свою подвижность, в результате чего суммарное поглощение начинает падать.

Также происходит сдвиг в область более высоких частот, т.к. диэлектрическая проницаемость вещества уменьшается за счет уменьшения количества молекул воды в единице объема и за счет связывания части молекул воды с растворенными молекулами вещества, как следствие этого, частота увеличивается:

$$v = \frac{c}{\lambda n} = \frac{c}{\lambda \sqrt{\epsilon}}, \text{ где } n \text{ – показатель преломления,}$$

$\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость света.

#### Заключение

С помощью экспериментальной установки были получены частотные зависимости коэффициентов поглощения для воды и водных растворов в диапазоне частот от 37,50 ГГц до 53,57 ГГц.

Из экспериментов найдены частоты, на которых происходит максимальное поглощение СВЧ излучения водой и водными растворами в частотном диапазоне от 37,50 ГГц до 53,57 ГГц; определена зависимость коэффициента поглощения от концентрации раствора. В результате найдено, что с увеличением концентрации по-

глощение уменьшается, а максимум поглощения сдвигается в область более высоких частот [7, 8].

Это позволит по поглощению электромагнитного излучения определить концентрацию растворенных веществ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блудов, Ю. В. Распространение  $H_{10}$ -волны в прямоугольном волноводе с диэлектрической неоднородностью / Ю. В. Блудов // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, вып. 8. – С. 97 – 105.
2. Бецкий, О. В. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты / О. В. Бецкий, Н. Н. Лебедева // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3. – С. 5 – 19.
3. Харланов А.В. Вибрационный механизм изменения адгезии жидкости // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 4. С. 17-23.
4. Polewski, M. Rigorous Modal Analysis of Structures Containing Inhomogeneous Dielectric Cylinders / M. Polewski, R. Lech, J. Mazur // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Vol. 52. - № 5. – P. 1508 – 1516.
5. Харланов А.В. Учет упругих сил при прохождении электромагнитных волн через капилляр с жидкостью // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т. 6. № 6. С. 52-55.
6. Gandhi, O. P. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz / O. P. Gandhi, G. Lazzi, C. M. Furse // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 44. - № 10. – P. 1884 – 1897.
7. СВЧ – анализатор концентрации жидких фармацевтических препаратов / Г. Ф. Бакаушина [и др.] // Электронная техника. – 1986. - № 9. – С. 54 – 56.
8. Беляков, Е. В. СВЧ – установка миллиметрового диапазона для исследования и контроля концентрации водных растворов / Е. В. Беляков, В. М. Храпко // Электронная техника. – 1986. - № 10. – С. 34 – 36.

4. Gaiduk, V. I. The concept of two stochastic processes in liquid water and analytical theory of the complex permittivity in the wavenumber range  $0 - 1000 \text{ cm}^{-1}$  / V. I. Gaiduk, J. K. Vij // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2001. – № 3. – P. 517–518.

5. Gaiduk, V. I. Translational relaxation in aqueous electrolyte solutions : a molecular model for microwave – far – infrared ranges / V. I. Gaiduk, B. M. Tseitlin, J. K. Vij // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2001. – № 3. – P. 523–534.

6. Schwan, H. P. Interaction of Microwave and Radio Frequency Radiation with Biological Systems / H. P. Schwan // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1971. – Vol. 19, № 2. – P. 146–152.

7. Биофизика : учебник для вузов / В. Ф. Антонов [и др.]. – М. : Владос, 2000. – 288 с.

8. Рубин, А. Б. Биофизика. В 2 т. Т. 2. Биофизика клеточных процессов : учебник / А. Б. Рубин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 469 с. : ил.

9. Бецкий, О. В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии / О. В. Бецкий, Н. Д. Девятков, В. В. Кислов // Вопросы физической метрологии. – 1999. – Вып. 1. – С. 44–81.

10. Бецкий, О. В. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты / О. В. Бецкий, Н. Н. Лебедева // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3. – С. 5–19.

11. Волобуев, А. Н. Квантово-механические эффекты при работе ионных каналов / А. Н. Волобуев, В. А. Неганов, Е. И. Нефедов, П. И. Романчук // Вестник новых медицинских технологий. – 1998. – Т. 5, № 2. – С. 7–10.

12. Давыдов, Б. И. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук, В. В. Антипов ; под ред. Ю. Г. Григорьева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.

ВОПРОСЫ БИМЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 538.569

A. B. Харланов, P. E. Малыхин  
A. V. Harlanov, R. E. Malyhin

ДОБРОТНОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ  
Q-FACTOR OF A BIOLOGICAL CELL

Волгоградский государственный технический университет  
Volgograd State Technical University

E-mail: physic@vstu.ru

В данной работе рассматривается проблема численного решения комплексного трансцендентного уравнения для собственных частот электромагнитных колебаний клетки, представленной в виде диэлектрического шара. Эти решения являются комплексными. Также найдены добротности биологической клетки различных типов колебаний.

Ключевые слова: клетка, добротность, колебания, электромагнитные волны, диэлектрический резонатор.

In this paper we consider the problem of numerical solutions of complex transcendental equation for the natural frequencies of electromagnetic oscillations of cells provided in the form of a dielectric sphere. These solutions are complex. Also found Q-factor of a biological cell for different modes.

Keywords: cell, quality factor, oscillations, electromagnetic waves, dielectric resonator.

1. Электромагнитные колебания  
диэлектрического шара

Простейшей моделью клетки является открытый диэлектрический резонатор в форме сферы, который допускает аналитическое решение задачи о собственных колебаниях. Итак, будем рассматривать собственные колебания шара [1] радиуса  $a$ , изготовленного из однородного изотропного материала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  и магнитной проницаемостью  $\mu_1$ , находящегося в окружающей среде с материальными параметрами  $\epsilon_2, \mu_2$ .

Исследование будем проводить в сферической системе координат (рис. 1), центр которой совпадает с центром шара. Примем следующую последовательность нумерации координат:  $\theta$  –

полярный угол,  $\varphi$  – азимутальный угол,  $r$  – радиальная координата.

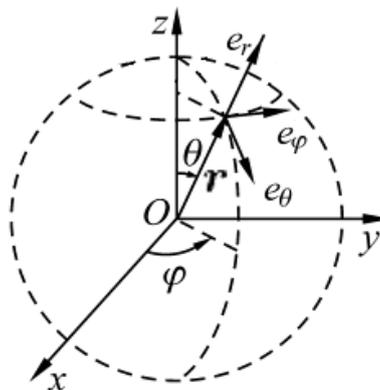


Рис. 1. Сферическая система координат

Существует два семейства волновых решений уравнений Максвелла - поперечно-электрические (типа  $TE$ , или  $H$ ) и поперечно-магнитные волны (типа  $TM$ , или  $E$ ). При этом все компоненты электрического и магнитного полей для волн обоих семейств могут быть выражены через производные некоторых вспомогательных скалярных потенциальных функций  $U$  и  $V$  (функций Борнниса)[2]. Вывод соответствующих соотношений для случая, когда волновые функции  $U$  и  $V$  имеют произвольную зависимость от времени, содержится во многих руководствах по электродинамике и математической физике. Для монохроматических волн выражения упрощаются, и, в случае зависимости от времени в виде  $e^{-i\omega t}$ , формулы для полей в сферической системе координат выглядят следующим образом:

$H$ – моды	$E$ – моды
$E_\theta = \frac{ik\mu}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi}$	$E_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \theta}$
$E_\varphi = -\frac{ik\mu}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}$	$E_\varphi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \varphi}$
$E_r = 0$	$E_r = k^2 \varepsilon \mu V + \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}$
$H_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \theta}$	$H_\theta = -\frac{ik\varepsilon}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi}$
$H_\varphi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \varphi}$	$H_\varphi = \frac{ik\varepsilon}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}$
$H_r = k^2 \varepsilon \mu U + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}$	$H_r = 0$

Здесь, как обычно,  $k = \omega/c$  - волновое число. При этом функции  $U$  и  $V$  удовлетворяют одному и тому же уравнению Гельмгольца в сферической системе координат[3]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right] + k^2 \varepsilon \mu U = 0 \quad (2)$$

Заметим, однако, что граничные условия могут быть различными для функций  $U$  и  $V$ , то есть для  $TE$  и  $TM$  волн.

В итоге, получим следующие формулы для мод типа  $TE$ , или  $H$ :

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{ik}{r \sin \theta} A_s P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi) \tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ E_\varphi &= -\frac{ik}{r} A_s \frac{\partial}{\partial \theta} (P_n^m(\cos \theta)) \Phi(m\varphi) \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ E_r &= 0 \\ H_\theta &= \frac{k}{r} \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{\mu_s}} A_s \frac{\partial}{\partial \theta} (P_n^m(\cos \theta)) \Phi(m\varphi) \tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ H_\varphi &= \frac{k}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{\mu_s}} A_s P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi) \tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ H_r &= \frac{n(n+1)}{\mu_s r^2} A_s P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi) \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \end{aligned} \quad (3)$$

Для мод типа  $TM$ , или  $E$ , аналогичным образом имеем:

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{k}{r} \sqrt{\frac{\mu_s}{\varepsilon_s}} B_s \frac{\partial}{\partial \theta} (P_n^m(\cos \theta)) \Phi(m\varphi) \tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ E_\varphi &= \frac{k}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\mu_s}{\varepsilon_s}} A_s P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi) \tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ E_r &= \frac{n(n+1)}{\varepsilon_s r^2} B_s P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi) \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ H_\theta &= -\frac{ik}{r \sin \theta} B_s P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi) \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ H_\varphi &= \frac{ik}{r} B_s \frac{\partial}{\partial \theta} (P_n^m(\cos \theta)) \Phi(m\varphi) \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}) \\ H_r &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (3)–(4) введены следующие обозначения:  $\tau_n' = \frac{\partial \tau_n}{\partial z}$  ( $z = k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s r}$ ),

$\Phi_m' = \frac{\partial \Phi_m}{\partial \varphi}$ ;  $P_n^m(\cos \theta)$  – полином Лежандра,  $\Phi(m\varphi) = A \cos(m\varphi) + B \sin(m\varphi)$ , индекс  $s$  принимает значение 1 внутри диэлектрика, при ( $r < a$ ),

и значение 2 снаружи диэлектрика в окружающем пространстве ( $r > a$ ), функциональная за-

висимость  $\tau_n$  от радиальной координаты будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}r) &= \sqrt{\frac{\pi k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}r}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}r), \text{ при } r < a, \\ \tau_n(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r) &= \sqrt{\frac{\pi k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r) + i \sqrt{\frac{\pi k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r}{2}} N_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r) = \\ &= \sqrt{\frac{\pi k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}r}{2}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}, \text{ при } r > a. \end{aligned}$$

На поверхности раздела диэлектриков[4], при  $r = a$ , должны выполняться условия непрерывности тангенциальных составляющих элект-

рического и магнитного полей при переходе от внутренней области (среда 1) к внешней области (среда 2):

$$\begin{aligned} E_\theta(r=a)|_1 &= E_\theta(r=a)|_2 & E_\varphi(r=a)|_1 &= E_\varphi(r=a)|_2 \\ H_\theta(r=a)|_1 &= H_\theta(r=a)|_2 & H_\varphi(r=a)|_1 &= H_\varphi(r=a)|_2 \end{aligned} \tag{5}$$

Возьмем компоненты поля моды типа  $TE$  в виде (3) и запишем для них условия непрерывности (5). Поскольку угловые зависимости полей снаружи и внутри диэлектрика совпадают, их можно опустить. После этого найдем, что условия непрерывности  $E_\theta$  и  $E_\varphi$  совпадают друг с другом, так же, как и условия непрерывности  $H_\theta$  и  $H_\varphi$ . Таким образом, четыре условия сшивания поля сводятся только к двум различным уравнениям:

$$A_1\tau_n(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a) = A_2\tau_n(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a)$$

$$A_1\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}}\tau_n'(ka) = A_2\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}}\tau_n'(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a) \tag{6}$$

Граничные условия (6) на поверхности диэлектрика представляют собой пару линейных однородных уравнений относительно амплитудных коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$ . Система (6) является совместной, если ее определитель равен нулю, то есть:

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} \frac{\left( J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a) \right)'}{J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a)} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}} \frac{\left( H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a) \right)'}{H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a)} \tag{7}$$

Если электромагнитные и геометрические параметры шара фиксированы, то равенство (7) представляет собой трансцендентное уравнение относительно волнового числа  $k=\omega/c$ . Решив его[5], можно определить резонансные частоты сферического диэлектрического резонатора.

Для мод типа  $TM$ , используя условия сшивания (5), можно аналогичным образом получить трансцендентное уравнение:

$$\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \frac{\left( J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a) \right)'}{J_{n+\frac{1}{2}}(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a)} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \frac{\left( H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a) \right)'}{H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a)} \tag{8}$$

## 2. Численное решение комплексного трансцендентного уравнения для собственных частот диэлектрического шара

Перепишем уравнения (7) и (8) в более удобном виде [2], с учетом дифференцирования функций Бесселя

$$\left( \tau_n'(p) = -\frac{n}{p}\tau_n(p) + \tau_{n-1}(p) \right):$$

для  $H_{nmz}$ -колебаний

$$\frac{J_{n-\frac{1}{2}}(p)}{J_{n+\frac{1}{2}}(p)} = \frac{q}{p} \frac{H_{n-\frac{1}{2}}^{(2)}(q)}{H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(q)} \tag{9}$$

для  $E_{nmz}$ -колебаний

$$\frac{J_{n-\frac{1}{2}}(p)}{J_{n+\frac{1}{2}}(p)} - \frac{n}{p} = \frac{p}{q} \left( \frac{H_{n-\frac{1}{2}}^{(2)}(q)}{H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(q)} - \frac{n}{q} \right), \tag{10}$$

где  $p = \frac{\omega' - j\omega''}{c} \sqrt{\varepsilon_1\mu_1}a$ ,  $q = \frac{\omega' - j\omega''}{c} \sqrt{\varepsilon_2\mu_2}a$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\mu_1$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости резонатора[6],  $\varepsilon_2$  и  $\mu_2$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости окружающего

резонатор пространства,  $n$  – порядок функции Бесселя или Неймана,  $a$  – радиус шара.

Данные уравнения, (9) и (10), решались относительно резонансной частоты  $\omega' - j\omega''$ . Ниже приведены результаты работы программ для  $E$ - и  $H$ -колебаний.

Так как, в сферическом резонаторе имеет место вырождение по азимутальному индексу  $m$ , то, выберем моды, для которых  $m=0$ . Они имеют наиболее простую структуру поля. В программе задавались:  $n$  – порядок спец. функ-

ции,  $z$  – порядковый номер корня трансцендентного уравнения, брался из решения. Радиус шара  $a = 10$  мкм. Далее приведены графики численного расчета для различных типов колебаний и радиационная добротность резонатора, рассчитанная по формуле

$$Q_u = \omega' / 2\omega'' = X / 2Y,$$

где комплексная диэлектрическая проницаемость представлена в безразмерном виде:

$$X - jY = \frac{\sqrt{\varepsilon_p \mu_p}}{c} R(\omega' - j\omega''). \quad (11)$$

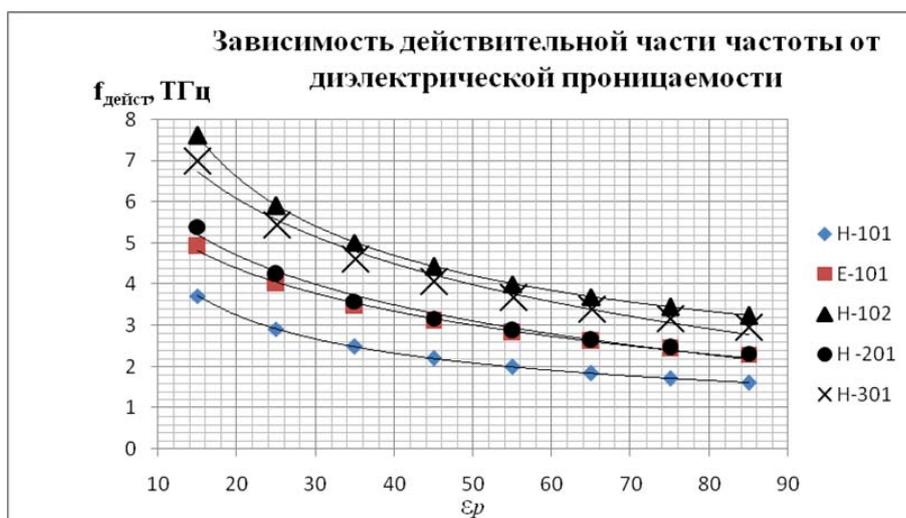


Рис. 2. Зависимость действительной части комплексной частоты от диэлектрической проницаемости резонатора

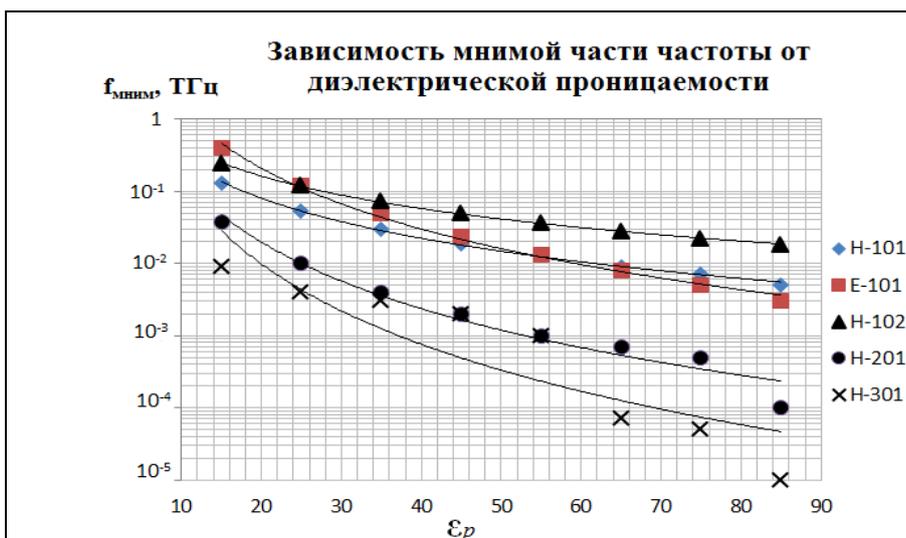


Рис. 3. Зависимость мнимой части комплексной частоты от диэлектрической проницаемости резонатора

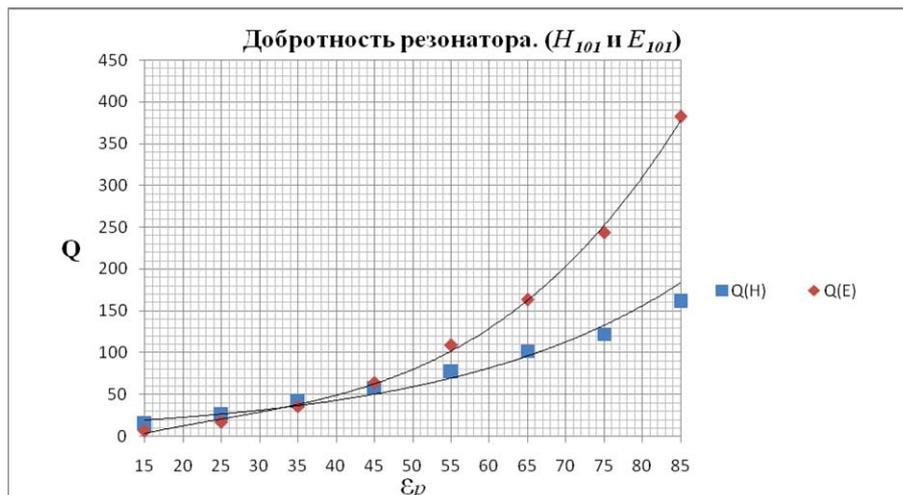


Рис. 4. Зависимость радиационной добротности резонатора от диэлектрической проницаемости.  $H_{101}$  и  $E_{101}$  – колебания

**Заключение**

В ходе проделанной работы было проанализировано комплексное трансцендентное уравнение для сферического резонатора. Также рассчитывалась добротность резонатора, и строились графики зависимостей добротности от диэлектрической проницаемости.

По результатам работы видно, что добротность клетки довольно высока. Это означает, что колебания в системе можно возбудить с меньшими затратами энергии и, с другой стороны, они долго не будут затухать. Также, расчеты показали, что добротность диэлектрического резонатора для других типов колебаний достигает еще более высоких значений. И так как биологическая клетка характеризуется высокой диэлектрической проницаемостью, то, соответственно, и ее добротность также принимает большие значения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ильченко, М. Е. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев.- М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Белокопытов, Г. В. Распределенные колебательные системы. Конспект лекций. Часть II / Г.В. Белокопытов.- М.: Наука, 2009. – 98с.
3. Gastine, M. Electromagnetic Resonances of Free Dielectric Spheres / M. Gastine, L.Courtois, I.L. Dorman // IEEE Trans. – 1967. – Vol. MTT-15, №12.-P. 694-700.
4. Ильченко, М. Е. Учет внешних полей при вычислении параметров сферического диэлектрического резонатора / М.Е. Ильченко, М.А. Старков // Вестн. Киевск. политех. ин-та. Радиотехника.-1980.-Вып. 17.- С. 24-28.
5. Вайнштейн, Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л.А. Вайнштейн.-М.:Сов. радио,1966. - 476 с.
6. Ильченко, М. Е. Характеристики диэлектрического сферического резонатора в волноводе / М.Е. Ильченко, М.А. Старков // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. Сер. Радиотехника.-1981. – Вып.18. – С. 18-21.

УДК 577.352.43(047.3)

*Е. Д. Пономарева, Н. В. Грецова*  
*E. D. Ponomareva, N. V. Gretsova*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПАМЯТИ РАСТЕНИЙ  
 НА ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
 STUDY OF THE EFFECTS OF PLANTS ON THE MEMORY EFFECTS  
 OF MICROWAVE RADIATION**

**Волгоградский государственный технический университет**  
**Volgograd State Technical University**  
 E-mail: soulofaghost@mail.ru, nataliagret@mail.ru

Исследовано влияние микроволн нетепловой интенсивности на семена пшеницы и овса. Показано наличие «эффекта памяти» зерен на воздействие в виде улучшения или ухудшения параметров роста.

*Ключевые слова:* микроволновое излучение, зерна пшеницы и овса, воздействие, всхожесть.

The effect of microwaves of nonthermal intensity on seeds of wheat and oats. Shown the presence of «memory effect» of grains on the impact in the form of improvement or deterioration in growth parameters.

*Keywords:* microwave, wheat and oats, effect, germination.