

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Факультет «Компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники»
Кафедра «Инфокоммуникационных технологий»

Допустить к защите

Рецензент направления

И.И. Прокопов

“ 17 ” 06. 2016г.

Руководитель направления

Ю.Т. Карманов

“ 17 ” 06. 2016 г.

"Разработка лабораторного стенда для исследования
электро-акустического эффекта"

Направление 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

ЮУрГУ – М.11.04.02.2016.050.00 ПЗ

Научный руководитель:

В.К. Баранов

“ 17 ” июня 2016 г.

Магистрант:

студент группы КТУР-289

Д.К. Тамбовцев

“ 17 ” июня 2016 г.

Нормоконтролер:

В.Д. Спицына

“ 17 ” июня 2016 г.

Челябинск
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Факультет «Компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники»

Кафедра «Инфокоммуникационных технологий»

Специальность «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель направления

 Ю.Т. Карманов

2016г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу (проект) студента

Тамбовцеву Денису Константиновичу

Группа КТУР-289

1 Тема работы (проекта)

**Разработка лабораторного стенда для исследования
электроакустического эффекта**

утверждена приказом по университету от _____ 20 г. №_____

утверждена распоряжением по факультету от _____ 20 г. №_____

2 Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) _____

3 Исходные данные к работе (проекту)

Цель работы: Разработка лабораторного стенда для исследования электроакустического эффекта в различных средах и проведения критериальных опытов

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Показать, что работа относится к области электромагнитной совместимости с радиоэкологической направленностью. Представить исследования возможных эф-

ектов прямого воздействия высокочастотного поля в физиотерапии. Разработать методику экспериментов и создать лабораторный стенд. Рассмотреть механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим диэлектрике с целью обнаружения акустического эффекта. Представить материальные эксперименты.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, плакатов в листах формата А1)

Таблица восприятия РЧ импульсов

Приборы для исследования

Осцилограммы экспериментов-1

Осцилограммы экспериментов-2

Схема установки с чашкой Петри

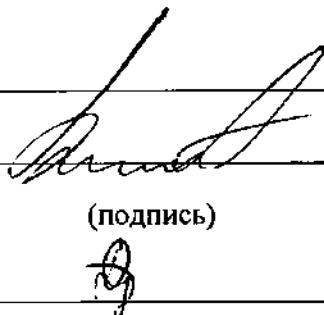
Подготовка лабораторной установки

Всего 6 листов

6 Консультанты по работе (проекту), с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
1 раздел	Тамбовцев В.И.		
2 раздел	Кыдырбаева Д.А.		
3 раздел	Тамбовцев В.И.		

7 Дата выдачи задания _____



(подпись)

Баранов В.К.

руководитель _____



(подпись студента)

Тамбовцев Д.К.

Задание принял к исполнению _____

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы на 49 с.,
3 раздела, 12 ил., 5 табл., 23 источника.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиозвук, амплитудная модуляция, электроакустическое преобразование, физиотерапия, радиоэкология.

Объектом исследования являются эффект электроакустического преобразования модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотный электрический на неидеальном диэлектрике.

Цель работы: Разработка лабораторного стенда для исследования электроакустического эффекта в различных средах и проведения критериальных опытов.

Работа относится к области электромагнитной совместимости. Представлены исследования возможных эффектов прямого воздействия высокочастотного поля в физиотерапии. Рассматриваются механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим диэлектрике с целью обнаружения акустического эффекта. Анализируется микроволновый звуковой эффект как наблюдаемое явление преобразования высокочастотного радиосигнала в акустические колебания в сегнетоэлектрике. Разрабатывается лабораторный стенд для наблюдения и исследования электроакустического эффекта в жидкой среде (физиологический раствор, кровеносная система) с целью решения проблемы радиочастотной экологии и физиотерапии.

Механизм преобразования модулированного ВЧ сигнала в акустический НЧ ещё не изучен и представлен в виде гипотез. В виду крайне малой мощности поглощения на преобразователе (меньше 0,1 Вт) получен эффект на сегнетоэлектрическом преобразователе. Интерес представляет также получение НЧ сигнала.

Данная работа исследовательской направленности и выполнена с целью разработки лабораторного стенда для изучения электроакустического эффекта и проведения критериальных опытов.

Иzm.	Лист	№ документа	Дата	11.04.02.2016.050.00 ПЗ		
Разраб.	Тамбовцев Д.К.			Разработка лабораторного	Лит.	Лист
Провер.	Баранов В.К.			стенда для исследования		Листов
Н.контр	Спицына В.Д.			электроакустического		
Утверд.	Карманов Ю.Т.			эффекта	Кафедра «ИКТ»	

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЗАДАНИЕ	2
РЕФЕРАТ	3
ОГЛАВЛЕНИЕ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 Радиозвуковой эффект Фрея	8
1.1 Открытие радиозвука	9
1.2 Эффективные параметры радиочастотного излучения	12
1.3 Зависимость РЧ-восприятия от возможностей слуха	13
1.4 Схожесть слуховой реакции на РЧ сигнал и обычного акустического восприятия	14
1.5 Механизм РЧ-звука: термоупругое расширение	18
1.6 Значение радиочастотного слухового восприятия	25
2 Воздействие модулированного РЧ сигнала на вещество	29
2.1 Микроволновый эффект преобразования ВЧ сигнала НЧ звуковой	29
2.2 Сверх высокочастотное воздействие мобильного телефона	30
2.3 О физическом механизме преобразования	32
2.4 Комбинационное преобразование спектра	34
3 Исследование электроакустического эффекта	37
3.1 Амплитудная модуляция ВЧ сигнала	37
3.2 Амплитудно-импульсная модуляция ВЧ сигнала	39
3.3 Установка для лабораторных исследований в жидкой среде	40
ВЫВОДЫ	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	46
ВЕДОМОСТЬ	49

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Э/М – электромагнитный (сигнал),

ЭМС – электромагнитная совместимость,

ФЭ – физиологический эффект,

РС - радиосигнал,

ИРС – импульсный радиосигнал (радиолокатора),

РВ – радиоволны,

НЧ – низкие частоты,

ВЧ – высокие частоты,

ГГц – гигагерцы,

АМ – амплитудная модуляция,

АИМ – амплитудно-импульсная модуляция,

Ф/Р – физиологический раствор,

РЗ – радиозвук (эффект Фрея, 1961 г.),

ЭАП – электроакустическое преобразование,

РЭК – радиоэкология.

СанПин – санитарные правила и нормы.

Кохлеарная микроакустика – кохлеарный микрофонный эффект или восприятие улиткой электрического сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Работа относится к области электромагнитной совместимости. Представлены исследования возможных эффектов прямого воздействия высокочастотного поля в физиотерапии. Рассматриваются механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим диэлектрике с целью обнаружения акустического эффекта. Анализируется микроволновый звуковой эффект как наблюдаемое явление преобразования высокочастотного радиосигнала в акустические колебания в сегнетоэлектрике [1]. Разрабатывается лабораторный стенд для наблюдения и исследования электроакустического эффекта в жидкой среде (физиологический раствор, кровеносная система) с целью решения проблемы радиочастотной экологии.

Человеческая слуховая реакция на импульсы радиочастотной энергии открыто в середине прошлого столетия и названо Фреем «радиозвуком» [2]. РЧ-индуцированные звуки могут быть охарактеризованы низкой интенсивностью и слышны только в тихой обстановке.

Место преобразования РЧ в акустическую энергию находится внутри, на периферии улитки, и подобны акустическому шуму на высоких звуковых частотах. Следует заметить, что механизм преобразования модулированного ВЧ сигнала в акустический НЧ ещё не изучен и представлен в виде гипотез. Требуется разработка лабораторных средств для физического исследования явления, чему и посвящена работа. На лабораторных стендах проведены пробные или критериальные измерения, подтверждающие о существовании исследуемого эффекта.

В виду крайне малой мощности поглощения на преобразователе (меньше 0,1 Вт) получен эффекта нелинейно-поляризационного преобразования модулированного ВЧ сигнала в НЧ звук на сегнетоэлектрическом преобразователе. Это открывает возможности к исследованию всех РЧ и акустически-зависимых эффектов с целью их использования в физиотерапии. Также может быть решена проблема ВЧ электромагнитной совместимости.

1 Радиозвуковой эффект Фрея

Для того, чтобы подойти к сути исследования, рассмотрим аналитическую статью о слуховой реакции на импульсы радиочастотной энергии за авторством Дж. А. Элдера и К.К. Чжоу [2]. Слуховая система человека реагирует на импульсы радиочастотной (РЧ) энергии, которые обычно называют радиосигналом, считается хорошо изученным явлением [1]. Вызванные радиочастотами звуки могут быть характеризованы, как звуки низкой интенсивности, потому что требуется тихая окружающая среда для получения слуховой реакции на них. Этот звук подобен другим распространенным звукам, таким как щелчок, гудение, шипение, стук или щебет. Эффективные радиочастоты находятся в диапазоне от 2,4 до 10 000 МГц, но способности человека слышать РЧ-звуки зависят от высокочастотного слухового аппарата, слышащего в диапазоне 5 кГц. Место преобразования энергии РЧ звука в акустическую энергию находится в пределах периферической части улитки уха, – как только улитка уха стимулируется, происходит обнаружение и восприятие радиозвука в организме человека, а вызванные слуховые реакции подобны акустическому восприятию у животных. Основная частота индуцированных РЧ-звуков зависит не от частоты радиоволн, но от размеров и пропорций головы. Было доказано, что реакция слуховой системы зависит от энергии за один импульс, а не от средней плотности энергии. Весомое количество свидетельств о результатах воздействия РЧ на людей и животных, а также исследований на моделях, поддерживает теорию термоупругого расширения как объяснения слухового восприятия РЧ (в разделе 2 рассматривается поляризационно-инерционное запаздывание). Индуцированные РЧ-звуки воспринимаются через костную проводимость термически генерируемыми переходными процессами, то есть слышимые звуки воспроизводятся путем быстрого теплового расширения в результате рассчитанного повышения температуры лишь на $5 \cdot 10^{-6}$ °С в тканях из-за поглощения энергии РЧ-импульса. Появление РЧ-индуцированных звуков при уровнях воздействия на много порядков большей величины, чем порог слуха, считается биологическим эффектом без последствий для здоровья. Это заключение подтверждается срав-

нением индуцированных в организме радиочастотных импульсов к давлению, связанным с опасной акустической энергией и энергией клинических ультразвуковых процедур.

1.1 Открытие радиозвука

Возник информационный анонс, описывающий наблюдения, сделанные в 1947 на основании эффекта появления звуков от работающего радара, в то время, когда испытуемый стоял близко к антенне. Люди это восприняли со скептицизмом и, когда они сообщили сотрудникам о слуховых явлениях, то возникли вопросы об их умственном здоровье [3]. Скептицизм, сопровождающий ранние сообщения о РЧ-звуке, был основан на знании механизма человеческого слуха. Ухо, как известно, является чувствительным к давлению волн, но не имеет никакой чувствительности к электромагнитным волнам в микроволновых частотах (300 МГц ... 300 ГГц). Скептицизм помогает объяснить, почему первое систематическое исследование РЧ-звука, услышанного Фреем в 1961, появлялось спустя многие годы после первых наблюдений этого эффекта в 1947. Исследование Фрея описывало слуховые явления в виде гудящих звуков, слышимые людьми, которые находились на пути потока РЧ-энергии от радара. Очевидное местоположение звука, который был описан как короткое расстояние позади головы, было тем же самым независимо от ориентации тела на радар [4]. В более поздних сообщениях [5], слуховое явление РЧ-звука было описано как "гудение, щелчок, шипение, или удар". Таблица 1 содержит описания этих и других звуков, о которых сообщали люди, подверженные импульсным РЧ-полям. Когда металлический щит, в виде экрана из алюминия, был помещен между субъектом и радаром, никакие РЧ звуки не слышались [6]. Конкретная область, обнаруживающая звуки от РВ, была описана как область височной доли мозга, потому что размещение маленькой части металлического экрана (5 x 5 см) на этой области полностью прекратило звук [5]. Испытуемые Фрея [4] сообщали, что увеличение РЧ уменьшало звуковой уровень, при этом использовались затычки для ушей, чтобы уменьшить окружающий уровень шума [7]. "Звук был как от пчелы, гудящей на окне, но, возможно, с более высокими ча-

стотами. Звук, казалось, шел приблизительно от метра-двух выше головы", согласно [8]. В другом сообщении, вызванный РЧ-звук был описан, как появляющийся в области уха, со стороны противоположной антенне. Все субъекты услышали гудящий звук при частоте повторения пульса (ЧПП) большей, чем 100/с, а некоторые и при ЧПП ниже 100/с. Cain and Rissmann [4] сообщали, что испытуемые услышали отдельные щелчки, или в голове, или позади головы, когда они подвергались влиянию импульсных полей [9]. Индивидуальные импульсы раздавались столь же самостоятельными и отдельными щелчками, с шагом сигнала, соответствующего ЧПП [10].

Индукрованный радиочастотный звук, казалось, происходит из пределов (или вблизи) задней части головы. В этот отчет также включена записка, что передаваемые цифровые сигналы, закодированные вручную, могут быть точно истолкованы субъектом. Два сообщения описали вызванные РЧ-звуки как многотоновые и как "звон в ушах" - [9] и [10]. Радиочастотные звуки были описаны добровольцами, которые подверглись воздействию на голову катушками, используемыми в магнитно-резонансной томографии (МРТ), как щебет или щелчки высокой ноты для коротких импульсов (меньше 50 мкс) и как скрип, или скрежет, более низкой частоты для длинных импульсов (больше 100 мкс).

Приведенные выше исследования показывают, что человеческое восприятие импульсного радиочастотного излучения, приводящее к звукам, которые изменяются в некоторым соответствии с модуляционным сигналом, является хорошо установленным и объективно наблюдаемым явлением [2].

Интерес для исследования представляет и низкочастотный электрический сигнал, который, как будет показано ниже в рассмотрении явления радиозвука, провоцирует своим воздействием на нервы звуковой улитки ощущение слышимого звука.

Таблица 1 – Акустическое восприятие импульсного РЧ сигнала людьми

Effect	Comment	Number of subjects	Frequency (MHz)	Pulse repetition rate (s ⁻¹)	Pulse width (μs)	Exposure conditions			Reference
						Peak power density (mW/cm ²)	Average power density (mW/cm ²)	Energy density per pulse (μJ/cm ²)	
RF hearing: heard repetition rate of radar as "high frequency components"	Not given	1300	600	2	(Peak power ~0.5 MW)	0.006	12.5	45 (+plastic foam earmuffs)	Airborne Instruments Laboratory [1956]
RF hearing: "distinct" clicks	Threshold values	8	3000	0.5	5	2500	0.001–0.01	2.3–20.0	Rissmann and Cain [1975]; Cain and Rissmann [1978]
RF hearing: buzz heard at PRR>100; individual pulses heard at PRR<100	3	3000 6500	<100–1000 <100–1000	10 15 1–2 1–2	225–2000 300–1000 2500–50000 2500–50000	0.002–0.007 5 5	4.5–15.0 40	4.5–15.0 40	Constant [1967]
No auditory response						10000–100000	5		
No auditory response	RF hearing: "buzzing sound"	8	1310 2982	<100–1000 <100–1000	0.5 0.5–2	10000–100000 10000–100000 2500–100000	5 5	70–80 (+earplugs) 70–90 (+ear stopples)	Frey [1961] Frey [1962, 1963]
RF hearing: "buzz, clicking, hiss, or knocking"	Threshold values	7	216	244	6	267	0.4		
RF hearing: "tinnitus"	Not given	425	216	400	1	5000	2		
		425	27	27	125	670	4.0		
		425	27	27	250	263	1.0		
		425	27	27	250	271	1.9		
No auditory response		8900	400	2.5	250000	229	3.2		
		8900	400	2.5	250000	254	7.1		
		8900	400	2.5	250000	25	7.1		
RF hearing: matched RF sound to 4.8 kHz acoustic sounds	Subjects were trained musicians	3	1200	12.5–50	<0.5				
RF hearing: "buzzing sound"		4	1245 1245	50 50	10 70	370 90	0.19 0.32		
RF hearing: "clicks, chirps"	Threshold values	2	2450	3	1–32	1250–40000	0.1	40 ^a	Guy et al. [1975]
RF hearing: buzz	Threshold values (not at 10 GHz)	Not given	1310 2982 10000	244 400 10000	6 1	(12 V/cm) (18 V/cm)	0.3 0.18	45 (+earplugs)	Ingalls [1967]
RF hearing: "tinnitus"	Not given		100–20000	10–160					
RF hearing: chirps or clicks of high pitch at short pulses (<50 μs); for >100 μs pulses, creaky or gnashing clacks of lower pitch	Threshold values (head exposure to MRI coils)	6	2.4–170	1.2	3–5000	<9000	<9	(+plastic foam ear muffs)	Khizhnyak et al. [1979, 1980]; Röschmann [1991]
RF hearing: polytonal sound		18	800	1000–1200	10–30	>500	40 (+ear stopples)		Tyazhelov et al. [1979]

^aCalculated peak absorbed energy density per pulse is 16 mJ/kg.

1.2 Эффективные параметры радиочастотного излучения

Краткие параметры радиочастот, используемые в клинических исследованиях, показаны в таблице 1. Параметры включают частоту, ЧПП, длительность импульса, пиковую плотность мощности, значение средней плотности мощности и плотности энергии / импульс. Пороговые значения для РЧ-звука были зарегистрированы в нескольких исследованиях, и они также приведены в таблице. РЧ-звук присутствовал в пределах от 2,4 до 10 000 МГц (см. таблицу 1). Хотя в статье [8] упоминается 10000 МГц как эффективная частота, другие исследователи выясняют, что более низкие частоты (8900 и 9500 МГц) при очень высоких уровнях воздействия не вызывали звуки РЧ. Например, частота 8900 МГц не была эффективна в средней плотности энергии 25 мВт/см^2 и пиковой плотности энергии $25\,000 \text{ мВт/см}^2$ [15]. В 216 МГц, средний порог плотности энергии был 4 мВт/см^2 , и пиковая плотность энергии была мВт/см^2 [15]. При самых низких эффективных частотах (2,4 … 170 МГц), описанных в литературе, пиковые пороги плотности энергии были до 9000 мВт/см^2 . Самая низкая пороговая величина выражается в единицах средней плотности мощности падающего излучения и составляет $0,001 \text{ мВт/см}^2$ [4]; Это значение было связано с низкой ЧПП, всего $0,5/\text{с}$ (таблица 1), так как при данной пиковой мощности, средняя плотность мощности зависит от ЧПП. Слуховое восприятие, однако, как уже было сказано, зависит от энергии за один импульс, а не от средней плотности мощности. Guy и другие [7] обнаружили, что порог для РЧ-звука импульсных полей в 2450 МГц был связан с плотностью энергии 40 Дж/см^2 на импульс, или с поглощением энергии в импульсе 16 Дж/г , независимо от пиковой мощности импульса или длительности импульса (менее 32 мкс). Расчеты показали, что каждый импульс при этой плотности энергии приведет к увеличению температуры ткани примерно $5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$. Сравнение РЧ слуховых порогов в теоретической литературе, к порогам, наблюдаемых у человека, подвергшихся полям из катушек МРТ, показало соответствие в широком диапазоне частот (2,4 … 3000 МГц) (рисунок 7 в [4]). Другое сравнение в данном отчете показало, что электрофизиологические измерения у кошки, определило пороги довольно

схожие с результатами тестов РЧ-звука у человека. Обзор таблицы 1 показывает, что многие из пороговых значений были определены в очень тихом месте, или людьми, которые использовали затычки для ушей (наушники), чтобы уменьшить уровень внешних шумов. Как уже упоминалось во введении, затычки для ушей были использованы испытуемыми в первом докладе Фрея в 1961 году. Таким образом, исследователи, как правило, признают, что тихое место было необходимо, – так как, во многих случаях, нормальные уровни шума снаружи, в лаборатории МРТ и окружающей среде маскируют РЧ-звук. В работе Guy [7], например, пороговое значение, приведенное выше, было получено в очень спокойной обстановке, имеющей уровень фонового шума лишь 45 дБ. Когда были использованы затычки для ушей, пороговый уровень для каждого испытуемого снизился с 35 до 28 Дж/см². Порог для субъекта с дефицитом слуха был намного выше, примерно 135 Дж/см² (без ушной затычки).

1.3 Зависимость РЧ-восприятия от возможностей слуха

В Airborne Instruments Laboratory [14] заявили, что два человека с потерей слуха выше 5 кГц не воспринимают РЧ звук так хорошо, как наблюдатели с нормальным слухом до 15 кГц. Более поздние исследования представили больше информации о взаимосвязи между акустическим слухом и РЧ-восприятием звука. Фрей [15] сообщил, что необходимым условием для слушания РЧ-звука является способность слышать радиочастоты выше 5 кГц, и не только по воздушной проводимости. Этот вывод был основан на результатах испытуемых с нормальным слухом, и слухом с дефектами. Одному человеку с нормальной воздушной проводимостью, слышащему ниже 5 кГц, не удалось услышать микроволновые импульсы; этот человек, как было впоследствии установлено, имел существенную потерю костной проводимости слуха. Еще один субъект с нарушениями слуха, с хорошей костной проводимостью, но со слабой воздушной проводимостью, воспринимал РЧ-звук приблизительно такой же плотности, как и люди с нормальным слухом. В более позднем исследовании, испытуемыми определены звуки, вызванные повторяющимися воздействиями пары импульсов РЧ в диапазоне от МГц до звуковых частот вблизи 4,8 кГц [15].

В дополнение к определению стандартных аудиограмм слуха, которые измеряют пороги воздушной проводимости на акустических частотах 250-8000 Гц и костной проводимости до 4000 Гц, Cain и Rissmann [4] измерили слух восьми испытуемых до 20 кГц. Они обнаружили, что, хотя не было никакой очевидной корреляции между способностью слышать импульсные радиочастотные поля на частоте 3000 МГц и слуха, как измерено с помощью стандартных аудиограмм, есть сильная корреляция между порогом слышимости РЧ-звука и порогом воздушной проводимости акустических сигналов выше 8 кГц. Например, трое испытуемых, которые имели нормальный слух ниже 4 кГц, но дефицит слуха на частотах выше 8 кГц, не могли слышать РЧ-звуки. Исследования [4] и [15] показывают, что РЧ-восприятие зависит от высокочастотного слуха, в диапазоне около 5 ... 8 кГц, и костной проводимости слуха при более низких звуковых частотах. Рассчитанные значения основных частот РЧ-индуцированного звука в голове человека, основанные на данных, полученных на животных, или моделях, несколько похожи, – например, 7 ... 10 кГц [9], 8 кГц и 13 кГц, и 7...9 кГц; Результаты этих исследований описаны более подробно ниже.

1.4 Схожесть слуховой реакции на РЧ сигнал и обычного акустического восприятия

Слуховой путь, по которому звуковые волны, обнаруживаемые ухом интерпретируются в звук в головном мозге, хорошо известен. Были проведены несколько исследований, чтобы определить, является ли электрофизиологический ответ слухового тракта на РЧ-импульсы аналогичным реакции на акустическое стимулирование. Первый этап звуковой трансдукции - механическое искажение волосковых клеток улитки, приводящие к кохлеарной микроакустике, электрические потенциалы которых имитируют звуковые формы волны акустических звуков. После обнаружения звука улиткой, электрические потенциалы, связанные с обнаружением звука, могут быть зарегистрированы электродами, расположенными в нейронах, в различных местах вдоль слухового пути. Фрей [15] предложил, что РЧ звук может быть результатом прямого коркового или нервного возбуждения, но результаты более поздних исследований, опи-

санных в данном обзоре, показали, что гипотеза Фрея была неверной. Его предположение было основано, в частности, на его неспособности продемонстрировать, что РЧ-импульсы стимулируют улитку, то есть, **кохлеарная микроакустика** (*кохлеарный микрофонный эффект – восприятие улиткой электрического сигнала*) не была исследована на энергиях больших по величине, чем те, которые требуются, чтобы вызвать ответ слухового нерва [15]. Guy и другие [9] также ошибочно измерили **кохлеарную микроакустику**, но установили, что отсутствие звука было из-за недостаточного поглощения радиочастотной энергии. Chou и другие [7] сообщали об успехе в преодолении технических проблем, которые препятствовали исследователям записывать кохлеарную микроакустику РЧ-звука у животных. Результаты показали, что импульсы радиочастотной энергии привели в действие улитку уха, микро-акустика была зарегистрирована, как и аналогичная, вызванная акустическими стимуляциями [7, 8]. Демонстрация на животных показала, что РЧ-звук вызывает слуховую реакцию, и воспринимается нормальной слуховой системой с помощью улитки уха. Это доказательство идет против предположения, что РЧ-импульсы непосредственно стимулируют нервную систему. Guy и другие исследователи [7] показали важность улитки, определив, что повреждение улитки отменяет индуцированные потенциалы РЧ-звука на более высоких уровнях в слуховом пути. Эти результаты показывают, что местоположение начального взаимодействия импульсно-модулированной СВЧ-энергии со слуховой системой находится в пределах, или на периферии, улитки.

У кошек с неповрежденной улиткой, ученые [2] измерили электрофизиологические реакции в трех последовательных уровнях кошачьей слуховой нервной системы (восьмой черепной нерв, медиальное коленчатое ядро и первичная слуховая кора) к акустическим и СВЧ (2450 МГц) частотам. Они обнаружили, что реакции подобны. Также обнаружили подобные реакции у одиночных слуховых нейронов кошек к импульсным полям на 915 МГц и акустическим щелчкам. Guy и другие [7] показали, что электрофизиологические реакции слухового пути у кошек к радиочастотным импульсам, аналогичны реакции на акустические раздражители и, изучая реакции после повреждения в последова-

тельных частях слухового пути, подтвердили, что основное местоположение трансдукции РЧ-энергии в звук происходило в периферической части улитки. Ожидалось обнаружение электрических потенциалов в слуховых нейронах в ответ на воздействие РЧ, основанное на результатах исследований, которые продемонстрировали субъективное слуховое восприятие [15] и кохлеарную микроакустiku [7]. Описана модель порогов слуховых нейронов к РЧ-импульсам, которые согласуются с порогами, измеренных для кошки (импульсы 20-200 мкс). Известно, что акустические раздражители могут вызывать индуцированные потенциалы в центральных участках нервной системы за пределами слухового пути, и, из-за таких индуцированных потенциалов, слуховой ответ на радиочастотные импульсы был записан [7]. Объясняется, что электрические потенциалы, записанные в любом месте Центральной Нервной Системы (ЦНС) могут быть неправильно истолкованы в качестве прямого взаимодействия РЧ-энергии с отдельной нервной системой, в которой была сделана эта запись, сообщает Фрей [15].

В эксперименте, пороги вызванных электрических реакций медиального коленчатого тела в слуховом пути у кошек, были определены как функции от фонового шума; Guy и другие [7] обнаружили, что уровень шума (50 ... 15000 Гц полосы пропускания), увеличенный с 60 до 80 дБ вызвал лишь незначительное увеличение порога для микроволновых раздражителей, и существенное повышение в пороге для громкоговорителя, производящего акустические волны. Тот факт, что вызванный ответ на СВЧ-раздражители не увеличивался относительно фонового шума, который включал акустические частоты в 15 000 Гц, показал, что импульсная РЧ-энергия может взаимодействовать с высокочастотной частью слуховой системы (выше 15 кГц у кошек). Дополнительная поддержка предположения о зависимости РЧ-звука от высокочастотного акустического слуха обеспечивается теоретическим анализом акустических колебаний, вызванных в головах людей и животных, на основе теплового расширения от импульсов РЧ-энергии. Было установлено, что частота индуцированного звука зависит от размера головы и акустических свойств ткани головного мозга. Таким образом, акустические тона, воспринятые данным субъектом, не зависмы

от частоты РЧ-энергии. Эти вычисления показывают, что основная частота, предсказанная моделью, изменяется обратно пропорционально с радиусом головы, т.е. чем больше радиус, тем ниже частоты воспринимаемого РЧ-звука. По оценкам учёных, приблизительные фундаментальные частоты вибрации для морских свинок, кошек и взрослых людей были 45, 38, и 13 кГц, соответственно; частота для детской головы человека, по оценкам, около 18 кГц. Эти расчеты обеспечивают новые доказательства, что необходимым условием для РЧ-индущированных звуков для человека является способность слышать звуковые волны на частотах выше примерно 5 кГц [4, 5]. Рассчитанная основная частота (45 кГц) у морских свинок соотносится с измерениями Chou [7], который определил 50 кГц кохлеарную микроакустiku для морских свинок, подвергшихся радиочастотным импульсам. В более позднем отчете, Chou (9) нашел, что частота кохлеарной микроакустики для морских свинок и кошек, хорошо коррелирует с размером длинной полости мозга (мозговой впадины), и, основываясь на этих данных, частота СВЧ-индущированной кохлеарной микроакустики для людей может быть между 7 и 10 кГц. Как упоминалось выше были вычислены частоты 8 и 13 кГц. В отличие от этих результатов, одна лаборатория сообщила о реакции в нормальном диапазоне слуха для кошки, которые были несовместимы с головным резонансом, имеющего основную роль в РЧ-слухе. Например, рассчитаны пороги слуха РЧ в 30 ... 300 ГГц [2], но, если таковые имеются, то физиологическое значение этих расчетов РЧ-звука объясняется: (а) их расчетные фундаментальные частоты в голове, порядка нескольких сотен килогерц, что значительно выше максимальной звуковой частоты около 20 кГц для человеческого слуха, и (б) не существует никаких сообщений о восприятии человеком радиочастотных импульсов на частотах выше 10 ГГц (Таблица 1).

Результаты вышеуказанных исследований вызванных электрических потенциалов в слуховой системе, в том числе и демонстрация импульсной РЧ, вызывающей кохлеарную микроакустическую реакцию, убедительно свидетельствуют о том, что обнаружение РЧ-индущированных слуховых ощущений, подобно акустическому обнаружению; место преобразования из РЧ в акустическую энергию находится на периферии улитки, основная частота РЧ-

индуцированного звука не зависит от частоты падающего излучения РЧ-энергии, но зависит от размеров головы, и импульсная РЧ-энергия взаимодействует с высокочастотной частью слуховой системы. Чтобы услышать РЧ-индуцированные звуки, человек должен подвергаться воздействию импульсов РЧ-энергии в диапазоне МГц (см. Таблицу 1) и быть в состоянии услышать акустические волны в диапазоне 5 кГц.

1.5 Механизм РЧ-звука: термоупругое расширение

Одним из первых вызовов, к предположению Фрея о прямом нервном возбуждении (15) было предположение, что стимуляция улитки через электромеханические поля по воздушной или костной проводимости, оказалось более вероятным объяснением феномена РЧ-восприятия [2]. Другие ученые, которые помогли заложить основу для определения механизма показали, что акустические волны могли быть обнаружены в воде, подвергнутой импульсам радиочастотного излучения, и его анализ волн в этой системе показал, что, в результате теплового расширения, температурный градиент будет генерировать волны напряжения, распространяющиеся далеко от места поглощения энергии. В развернутом анализе этого явления показано [2], что для одиночных длинных импульсов, индуцированная волна напряжения является функцией плотности пиковой мощности (энергии) и, для более коротких импульсов, волна напряжения является функцией плотности пиковой мощности и длительности импульса (или плотности энергии в импульсе). Ученые расширили этот анализ путем проведения экспериментов в воде и растворе KCl, которые подвергли воздействию радиочастотных импульсов, аналогичных тем, которые вызывают звуки у людей. Они показали, как теоретически, так и экспериментально, что изменения давления, которые могут создавать значительные акустические колебания в растворе, будут зависеть от поглощения радиочастотных импульсов. Они пришли к выводу, что слышимые звуки были произведены быстрым тепловым расширением за счет поглощения энергии РЧ. Эти результаты привели их к предложению, что термоупругое расширение и есть механизм РЧ-восприятия. Этот механизм согласуется со следующими результатами их эксперимента:

- 1) РЧ-импульсы, которые вызывают звуки у людей, произвели акустические переходные процессы, которые были записаны с помощью гидрофонов, помещенных в раствор (0,15 KCl), имеющего электропроводность, подобную ткани. Акустические переходные процессы были обнаружены в крови, мышцах, и мозге, подвергшихся в пробирках импульсам радиочастотного излучения.
- 2) РЧ-волна индуцировала давление, создаваемое в дистиллированной воде, когда вода была охлаждена ниже 4 °C, и реакция исчезла при 4 °C, в соответствии с температурной зависимостью свойств теплового расширения воды.
- 3) Из термоупругой теории расширения следует, что максимальное давление в среде пропорционально полной энергии импульса для коротких импульсов и пропорционально пиковой мощности (энергии) для длинных импульсов. Соотношение между шириной импульса и РЧ-генерируемым акустическим переходным процессом в растворе KCl согласуется с этой теорией [15].

Основываясь на этих данных, Фостер и Финч [2] пришли к выводу, что РЧ-индущиванные звуки воспринимаются с помощью костной проводимости термически генерируемых звуковых переходных процессов, вызванных поглощением РЧ энергии. Импульс может быть достаточно кратким (меньше 50 мкс), поэтому максимальное увеличение температуры тканей после каждого импульса очень мало (меньше 10^{-5} °C). Интенсивность пиковой мощности импульса, однако, должна быть умеренно интенсивной (как правило, от 500 до 5000 мВт/см² на поверхности головы). Эти значения находятся в пределах диапазона эффективных интенсивностей пиковой мощности 90 ... 50000 мВт/см² в клинических исследованиях, приведенных в Таблице 1. Математическое моделирование показало, что амплитуда термоупругого генерируемого акустического сигнала такой величины полностью маскирует другие возможные механизмы, такие как радиационное давление, электрострикционные силы, и поле, индуцированное силами РЧ [2]. Эти и другие результаты привели [4, 7] к выводу, что механизм термоупругого расширения является наиболее вероятным физическим механизмом, объясняющим РЧ-индущиванный слуховой эффект у людей. За год до того, как была предложена термоупругая теория, Фостером и Финчем [2] были опубликованы результаты исследования, которые сходятся с этой теорией.

ей. То есть, громкость РЧ-индуцированных звуков в человеческих субъектах зависит от плотности мощности на пик шириной импульса больше 30 мкс; Для более коротких импульсов громкость является функцией полной энергии импульса. В соответствующей работе, результаты экспериментов на животных показали предсказанную пороговую зависимость от ширины импульса. Chou и Guy [10] обнаружили, что порог для РЧ-слуха у морских свинок вызывал электрические реакции в слуховом стволе мозга и зависит от энергии, падающей за импульс, для ширины импульса менее 30 мкс, связанного с пиковой мощностью импульса до 500 мкс. При использовании коротких импульсов шириной 1 ... 10 мкс, Chou и другими [12] было отмечено, что порог слышимости у крыс не зависит от ширины импульса. Эта статья также важна, потому что эти результаты показали, что РЧ-индуцированные слуховые реакции происходят у крыс, при низких напряженностях в циркулярно поляризованном волноводе [16]. Результаты по порогу и громкости можно резюмировать следующим образом: энергия в первых импульсах определяет пороговые уровни громкости, независимо от ширины импульса. Для более широких импульсов (больше 90 мкс), громкость связана с пиковой мощностью, а не с энергией, так как энергия, связанная с первыми 30 мкс импульсами, увеличивается непосредственно с пиковой мощностью. Таким образом, если достаточная энергия будет депонирована в пределах 30 мкс периодов, РЧ-индуцированные звуки прекратятся, без учёта ширины импульса. И, для импульсов больше 30 мкс громкость увеличивается с увеличением пиковой мощности. Таким образом, слуховое восприятие претерпевает постепенный переход от связанного энергией эффекта в ширине импульса меньше 30 мкс, к эффекту, зависящему от пиковой мощности на длительность импульса больше 90 мкс [2, 10]. Психофизический эксперимент с 18 подопытными, показал адекватность термоупругой гипотезы и качество восприятия РЧ-индуцированных звуков [2]. Звуковые частоты сигналов были представлены поочередно или одновременно с микроволновыми импульсами (см. Таблицу 1) в условиях, в которых субъект может отрегулировать амплитуду, частоту и фазу аудиосигнала. Длинные импульсы (приблизительно 100 мкс) привели к снижению силы РЧ-звука, и двое испытуемых, которые имели высокий порог слышимости, не могли различить звук в этих условиях.

кочастотный слуховой предел в 10 кГц, не смогли услышать короткие импульсы РЧ, но слышали длинные импульсы. Ученые [2] пришли к выводу, что гипотеза термоупругого расширения адекватно объясняет некоторые из этих выводов для РЧ импульсов высокой пиковой мощности и короткой ширины (меньше 50 мкс), но они поставили под сомнение применимость гипотезы к некоторым наблюдениям, вовлекающим почти пороговые импульсы малой мощности, длинную продолжительность и высокую частоту повторения импульсов (Chou и другие [11] для критики [2]). В других работах предполагается, что термоупругая теория составляет низкую частоту, но не высокую частоту РЧ-индуцированных звуков. Однако, никакие другие отчеты не поддерживают их модель для высокочастотных импульсов. Более свежий отчет [2] о реакциях слуховой системы шести человек, чьи головы подвергались радиочастотной энергии от катушек МРТ, сообщает, что зависимость порогов по ширине импульса подтверждает теоретические предсказания о термоупругой теории расширения.

Таблица 2 – Пороговые значения акустического восприятия РЧ импульсов у животных

Effect	Species (n)	Exposure conditions						Reference
		Frequency (MHz)	Repetition rate (s ⁻¹)	Pulse width (μs)	Peak power density (mW/cm ²)	Average power density (mW/cm ²)	Energy density per pulse (μJ/g)	
Response obtained with scalp electrodes	Cat (2) [also dog and chinchilla]	3000	0.5	5	2200, 2800 1300 580	1–10 10–500	11, 14 13 8.7	Rissmann and Cain [1975]; Cain and Rissmann [1978]
Response obtained with carbon-loaded Teflon® electrodes	Guinea pig (n not given)	918	30	10–500	62–156	0.02–1.4	1.56–46.8	Chou and Guy [1979]
Response obtained from round window with carbon lead	Guinea pig (5)	918	100	1–10	a	a	20	Chou et al. [1975]
Brainstem evoked response	Rat (10)	2450	10	1–10	150–3000	0.03	1.5–3	Chou et al. [1985]
Electrode implanted in brain stem	Cat (11)	1200–1525	12–130	10	60	800–5800	0.017–0.028	Frey [1967]
Response obtained from medial geniculae with glass electrode	Cat (2)	918	1	3–32	800–356000	0.015–0.047	17.4–28.3 15.2–47.0	Guy et al. [1975]
	2450	1	0.5–32	32	14800–38800	0.472–1.24	472–1240	8.7–26.7
Response obtained from individual auditory neurons with glass electrode	8670–9160	1	32	25–250	≤1.0	4–40	Lebovitz and Seaman [1977a,b]	
Neuronal action potentials in cochlea	Cat (7)	915	<10				0.6	Seaman and Lebowitz [1989]
	Cat (18)	915						

^aDirect comparison of power density in the circular waveguide exposure system to free field power density is improper because the efficiency of energy coupling is ten times higher than that for free field exposure [see Chou et al., 1975, p. 362].

Теоретический анализ Lin [2] предсказал, что звуковое давление, как функция длительности импульса, первоначально увеличивается, достигая пика, снижается, затем колеблется с максимальными значениями ниже пика. Данные человека в отчетах Тяжелова [2] и данные животных в Chou и Guy [10], в общем, соответствуют этой модели слуховой реакции, связанной с шириной импульса. Более детальное обсуждение зависимости ширины импульса и воспринимаемой громкости звука, на основе человеческих данных в работах Тяжелова дается в обзорах Lin [2]. Результаты исследований на животных, в дополнение к тем, которые уже обсуждались, подтверждают и расширяют наше понимание РЧ-восприятия и термоупругого механизма. Некоторые исследователи определили порог РЧ-индуцированных слуховых реакций системы на лабораторных животных, как показано в таблице 2. У кошек, подверженных радиочастотным импульсам (918 и 2450 МГц), порог был связан с плотностью энергии падающего импульса. Пороги плотности энергии в импульсе у кошки составляют около половины порога человека [7]. Пороги Cain и Rissmann (4) в целом согласны с результатами в [7], сообщает Seaman и Lebovitz [2] касательно низких порогов восприятия. На более высоких частотах, между 8670 и 9160 МГц, Guy и др. (7) обнаружили, что пороговые значения плотности мощности и плотности энергии в импульсе были на порядок выше, чем те, что в 918 и 2450 МГц (Таблица 2). Измеряя волны акустического давления с миниатюрным гидрофоном преобразователя имплантированного в мозг крыс, кошек, морских свинок и подверженных импульсов РЧ-энергии, Olsen и Lin [2] подтвердили более ранние теоретические предсказания волн давления в голове. В более поздней работе, Lin и др. (1988) наблюдали, что скорость волн давления РЧ-индуцированных звуков в мозгу кошки была аналогична обычному распространению акустической волны. Эти результаты подтверждают теорию термоупругого расширения.

Гипотеза Фостер и Финч [2] предсказывает, что эффект РЧ-звука связан с термоупругими индуцированными механическими колебаниями в голове. Колебания этого типа могут быть получены с помощью других средств, например, с помощью лазерного импульса, или импульсного пьезоэлектрического кристалла, входящим в контакт с черепом, который также вызывает кохлеарную

микроакустiku у морских свинок [8]. Фрей и Корен [2] использовали голограммический метод, чтобы проверить, имеют ли череп и ткани головы животного предсказанные колебания при воздействии импульсного радиочастотного поля. Никакие смещения не были записаны, но последующий анализ Chou показал, что голограммический метод, используемый Фреем и Кореном [2] не имеет необходимой чувствительности для обнаружения малых смещений, связанных с колебаниями от микроволнового индуцированного термоупругого расширения в биологических тканях. Уилсон [2] описал Авторадиографическую (автопроплавляющую) методику, в которой [14C] 2-дезокси-D-глюкоза, используется для отображения слуховой активности в головном мозге крыс, которые подвергались воздействию акустических раздражителей импульсного и непрерывного волнового поля. С помощью этого метода, в естественных условиях определения метаболической активности, т.е. утилизации глюкозы и связанной функциональной активности в головном мозге, могут быть визуализированы. Перед воздействием акустических раздражителей или микроволн, одно среднее ухо было удалено, чтобы блокировать обнаружение звуковых волн в одной стороне головы. Была продемонстрирована ожидаемая двусторонняя асимметрия радиоактивного поглощения в слуховой системе крыс, подвергшихся воздействию акустических щелчков или слабого фонового шума. В противоположность этому, симметричное поглощение было обнаружено в мозге животных, подвергнутых радиочастотным импульсам. Эти результаты подтверждают авторадиографические выводы, что РЧ-слух не вовлекает среднее ухо человека (Frey, 1961) и морских свинок (Chou и Galambos 1979). Неожиданно, Уилсон и др. (1980) обнаружили увеличивающееся поглощение радиоактивного индикатора в слуховой системе крыс, подвергшихся воздействию непрерывных волновых полей, но в более позднем докладе этот РЧ-эффект приписывается внутристикохлеарному нагреванию (Уилсон и Джойн, 1985). Результаты с непрерывным полем волны не были независимо воспроизведены и нет никаких известных сообщений о непрерывных волнах сигналов, вызывающие РЧ-индукционный звук в человеке, или РЧ-индукционные слуховые реакции у экспериментальных животных.

В целом, данные исследования человеческих субъектов, лабораторных животных, и моделирование поддерживает термоупругую теорию расширения, в качестве механизма для явления РЧ-слуха. Доказательства включают измерения акустических переходных процессов в воде, KCl раствор, имеющий электрические свойства, аналогичные, что в клетках, тканях и, также, в имитирующих мышцы материалах [2]. Соотношения с пороговым значением для длительности импульса [2] характеристики РЧ, которые вызывали кохлеарную микроакустiku у лабораторных животных [7, 8] и рассчитанная фундаментальная частота в голове человека [2] хорошо коррелирует с восприятием высокой частоты звуков в диапазоне кГц выше 5 кГц.

1.6. Значение радиочастотного слухового восприятия

Потенциал для воздействия на человека импульсными полями, которые могли бы побудить РЧ-слуховые явления, поднимает два вопроса в отношении значимости эффекта. Один из них: является ли РЧ звук психологическим воздействием? Во-вторых, в стороне от восприятия звуков: является физиологическое значение воздействия импульсного радиочастотного излучения по интенсивности на уровень выше порога слуха?

Слуховые явления РЧ-звука при пороговых уровнях воздействия считаются биологическим эффектом без последствий для здоровья и, следовательно, не оказывают побочных эффектов. Этот вывод основан на следующих пунктах. Звуки, связанные с РЧ слуховым явлением, не являются необычными, но схожи с другими распространенными звуками, такие как щелчок, гудение, шипение, стук, или чириканье (см. таблицу 1). Кроме того, РЧ-индуцированные звуки могут быть охарактеризованы, как низкая интенсивность звуков, потому что, в общем, должно быть достаточно тихо, чтобы испытуемый мог услышать эти звуки. Стоит отметить, что большинство испытуемых, в исследованиях, указанных в таблице 1, используют беруши, чтобы создать условия, достаточно тихие для того чтобы слышать радиочастотные звуки. Очевидное расположение звуков, однако, может изменяться в следующих пределах: сзади, или над головой. В некоторых случаях, при длительном влиянии РЧ с целью индуцирования

звука, звуки могут стать раздражающими, однако, в настоящее время, знаний эффективных условий эксплуатации (см. таблицу 1) достаточно, чтобы разработать меры по устранению негативного эффекта РЧ-звука. Одно из решений состоит в перемещении дальше от радиочастотной антенны. Обзор клинических исследований в таблице 1 показывает, что большинство исследований были сделаны в лабораторных условиях, в которых испытуемые были близки к РЧ антенне. В трех из четырех полевых исследований, расстояние испытуемых от радаров было в диапазоне от шести футов до нескольких сотен футов. Такое расстояние было необходимо для достижения эффективной, умеренно высокой, пиковой интенсивности питания, начиная от 90 до 50 000 мВт/см² (см. таблицу 1). Если невозможно увеличить расстояние от источника, восстановительные меры могут включать металлический экран и изменения в рабочем процессе РЧ-устройства.

Помимо восприятия звука, важно рассмотреть физиологическое значение восприимчивости к радиочастотным импульсам выше порога слуха. Один подход заключается в сравнении величины давления РЧ-индуцированной акустической волны в голове к давлению из других источников. Уровни мощности, пик и длительность импульсов высоких частот, используемых для МРТ головы человека, могут соответствовать требованиям для РЧ-звуков [2]. Уровни мощности передатчика РЧ до 15 кВт, если бы относилось к голове с воздействием от катушки МРТ, вызвало бы РЧ-индуцированное звуковое давление примерно в 100 раз больше порога РЧ слуха. Согласно [2], уровень дискомфорта РЧ вызываемых переходных процессов в голове избегается, если пиковая мощность РЧ импульсов (больше 100 мкс) для головы катушки ограничена 30 КВт (6 КВт для поверхностных катушек); этот предел находится на основе порога дискомфорта – уровень звукового давления 110 дБ для внешних звуковых раздражителей. Опасные болевые пороги внешних звуковых раздражителей (140 дБ), и для повреждения слуховой системы (150-160 дБ SPL) будут на несколько порядков больше, чем 110 дБ. Roschmann в [2] заявил, что не было никаких доказательств известных вредных последствий для здоровья от РЧ-индуцированных шумов, создаваемых с помощью МРТ при пиковых уровнях мощности до 15 кВт, но

это был максимальный уровень мощности, который был доступен во время со-здания его статьи. На основании рассчитанных давлений, в результате погло-щенной энергии импульсов 915 МГц в моделях человеческой головы, Watanabe и другие [2] обнаружили, что РЧ-индуцированное давление у порога слышимо-сти было только 0,18 Па или более чем в 42 000 раз меньше, чем вызванное давление ультразвуком, 7700 Па в более низком значении (2 мВт/см^2) в диапа-зоне диагностического воздействия ультразвука. Предел для получения изоб-ражения плода 720 мВт/см^2 (FDA, 1997) позволяет медицине визуализировать плод человека, это давление более $15 \cdot 10^6$ раз больше, чем порог слышимости РЧ. Другое сравнение с совсем другой физической силой показывает, что дав-ление на пороге РЧ слуховых явлений в 1 000 000 раз меньше, чем давление на поверхность мозга, которые производят изменения в ЭлектроЭнцефалоГрамме и имеют меньшее давление на ткани головного мозга ($1,5 \times 105$ и 3×105 Па, соответственно), на основании исследований травматического повреждения го-ловного мозга [2]. По сравнению с давлением, оказываемым акустической энергией на опасном пороге медицинского облучения ультразвуком и травма-тического повреждения, маловероятно, что эффект РЧ-слуха на пороговом уровнے является опасным. Кроме того, это сравнение показывает, что РЧ-индуцированное давление должно было бы быть на много порядков больше, чем давление на пороге слышимости, чтобы вызвать побочные эффекты. Этот вывод подтверждается следующим фактами. РЧ импульсы очень высокой ин-тенсивности будут вызывать побочные эффекты, такие как судороги и бессо-знательное состояние (электрошокового эффекта), о чем свидетельствует Guy и Chou [11]. Они определили порог для этих эффектов у крыс, к одной высокой интенсивности, 915 МГц импульса, который вызвал повышение температуры мозга на 8° С , приводя к малым и большим эпилептическим припадкам, дли-щимся в течение 1 мин после воздействия, а затем по 4-5 мин в бессознатель-ном состоянии. Температура мозга вернулась к нормальной в течение 5 минут после воздействия и животные начали двигаться, когда температура мозга была возвращена в пределы 1°С от нормальной. В результате ограниченного гисто-логического исследования четырех крыс были выявлены значительные измене-

ния, в том числе демиелинизацию нейронов в один день после воздействия, и отек мозга на 1 месяц после. Порог для повреждающего эффекта был 680 Дж, независимо от пиковой мощности импульса и ширины, или около 28 кДж / кг, выраженные в терминах пикового удельного поглощения. Порог повреждающего воздействия для человека составляет величину в 100 000 раз выше, чем для крыс (5 ... 180 мДж / кг против 16 МДж / кг). Хотя поле не пульсировало и вызванные РЧ-звуки не произошли, недавний отчет [2] обращается к потенциально функциональным изменениям в слуховой системе облученных животных, то есть, изменения в отоакустической эмиссии улитки уха, могут служить индикатором внешней ячейки субклинических волосковых клеток или клинической патологии. В этом докладе не было найдено никакого эффекта отоакустической эмиссии подвергшихся РЧ-излучению крыс, при средней экспозиции на голову 0,2 (950 МГц) и 1 Вт/кг (936 и 950 МГц).

2. Воздействие модулированного РЧ сигнала на вещество

Мы близко подобрались к вопросу акустического восприятия радиочастотного звука. Но пока сам механизм его появления, с точки зрения физики, не до конца ясен [1]. А раз неясен механизм, то пока неизвестны возможности, которые может открыть изучение этого явления. Но, исходя из того факта, что генерация акустических волн происходит вследствие деформации тканей улитки, а также – через костную проводимость, возможна проверка РЧ-индуцированного звука с помощью пьезоэлектрического датчика. Его можно использовать как упрощенную модель восприятия акустического звука (ведь при наличии звукового давления, датчик будет производить электрических сигнал). А источником РЧ-индуцированного звука может выступать вещество (плацебо), в качестве упрощенной модели тканей в голове человека. Постановка вопроса в данной работе лежит в области электромагнитной совместимости в области экологии и физиологии. Человек, создав источники электромагнитного излучения, не в состоянии обойтись без них. Однако «электромагнитный смог» во всём частотном диапазоне значительно превышает естественный фон, что возможно провоцирует необратимые последствия.

2.1 Микроволновый эффект преобразования ВЧ сигнала НЧ звуковой

На сегодняшний день все еще нет однозначного физического обоснования микроволновому слуховому феномену. В магистрантской работе анализируется микроволновый звуковой эффект как наблюдаемое явление преобразования высокочастотного модулированного радиосигнала в низкочастотные акустические колебания.

В 1956 году было замечено, что люди, случайно оказавшиеся в зоне действия радиолокатора, ощущали звуковые галлюцинации, даже если уши защищены подавляющими шум фильтрами [15]. Испытуемые поочерёдно находились за экраном с отверстием диаметром в четверть длины волны на расстоянии 1,5…2,0 м от рупора антенны. Передатчик мощностью 500 КВт работал на частоте 1,3 ГГц, длительность импульса 2 мкс и частота следования 600 Гц (мощность приводится для радиоимпульса). Опрос показал, что звуки ощущаются на

гармониках, а основная частота отсутствует. Результаты систематических наблюдений и первых исследований были опубликованы в 1961 году Аланом Фреем [2], и микроволновый слуховой феномен назвали радиозвуковым эффектом Фрея.

Исследования, проводимые на добровольцах, привели к естественным трудностям при определении количественных и объективных оценок. Оказалось, что при воздействии на человека сверхвысокочастотным радиоизлучением с амплитудно-импульсной манипуляцией относительно большой интенсивности (на 6 метрах от антенн радиолокаторов с частотами 1,31 и 2,982 ГГц) возникали воспринимаемые звуки непосредственно внутри черепа, которые ощущались как бы от источника звука, расположенного за тыльной частью головы. Был определён порог чувствительности: 80 мВт/см^2 , что соответствует (при геометрическом сечении головы около 250 см^2) поглощаемой мощности до 20 Вт – это большая мощность поглощаемого излучения для головы даже за короткое время действия радиоимпульса.

2.2 Сверх высокочастотное воздействие мобильного телефона

Можно для сравнения оценить сверхвысокочастотное воздействие на голову прижатого к уху мобильного телефона МТ со сферической диаграммой направленности и с мощностью излучения 0,5 Вт (см. рис. 1). Итак, направление поглощения – полусфера, поглощаемая мощность до 50% от мощности излучения, эффективное поглощение происходит внутри головы. Следовательно, получаем оценочное значение плотности мощности: $0,5(0,5 \text{ Вт}/250 \text{ см}^2) = 1 \text{ мВт/см}^2$.

Эффект радиозвука естественно здесь отсутствует, т.к. порог чувствительности (см. выше) – 80 мВт/см^2 . Это на порядки превышает санитарно-гигиенические нормы для начала гигагерцового диапазона, представленные в Таблице 1 [3]. В целом биологическая система, выступающая в качестве акцептора, активнее откликается не на стационарные значения, а на их изменения и скорости изменения. Импульсная манипуляция действует эффективнее одночастотной амплитудной модуляции [16].

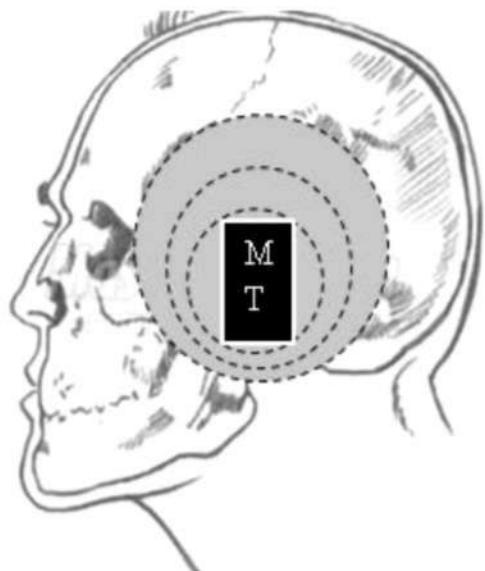


Рисунок 1. Голова с геометрическим сечением 250 см^2 . Здесь МТ – излучающий мобильный телефон

Таблица 3 – Предельно-допустимые значения энергетической экспозиции за рабочий день (8-ми часовую смену)

Диапазон частот, ГГц	Уровень интенсивности экспозиции ППЭ, мВт/см ²	Примечание
0,3-300 ГГц	25 мкВт/см ² х 8 час.	Интенсивность ЭМИ РЧ оценивается значениями плотности потока энергии – ППЭ: Вт/м ² , мкВт/см ² .

Аланом Фреем была предложена гипотеза, что на участках внутреннего уха происходит взаимодействие излучения с термоупругими тканями, сопровождающееся, возможно, их периодической деформацией. В ходе этого процесса при амплитудно-импульсной манипуляции возникают как бы механические ударные волны, воспринимаемые человеком в виде внутреннего звука, который никак не связан с колебанием барабанной перепонки. Этот сенсорно-акустический эффект представляет собой физическое явление, свя-

занное с преобразованием электромагнитной энергии в низкочастотные механические колебания на пути к рецепторному аппарату путем костной звукопроводимости. Также было обнаружено, что при соответствующем выборе амплитудно-модулированного сигнала существует возможность передавать человеку информацию в виде отдельных слов, фраз и других звуков. Громкость воспринимаемого звука можно увеличить, но акустическую травму нанести невозможно, поскольку барабанная перепонка в процессе не участвует [2]. Формирование же спектра, воспринимаемого человеком в виде слухового ощущения, определяется взаимодействием анатомических структур, представляющих как бы систему акустических резонаторов с динамической связью, выше критической [17].

2.3 О физическом механизме преобразования

В ранних работах и более поздних публикациях, посвящённых исследованию эффекта радиозвука [17], присутствует, как правило, направленность на физиологическую трактовку этого явления, связанного с особенностями либо слуховой системы, либо с непосредственным влиянием модулированного СВЧ электромагнитного поля на структуры мозга. Прямые физические измерений с размещением сенсорных элементов радиоэлектроники провести было невозможно. Опыты же на животных с вживлением электродов не дали сопоставимых результатов ввиду отсутствия адекватной реакции испытуемых животных на радиозвук. Кроме того, зондирующие электроды сами находились под воздействием электромагнитного излучения, что сопровождалось, скорей всего, детектированием и гальваническим эффектом.

Автора настоящей работы интересует непосредственный механизм преобразования модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотный звук, без привязки к физиологическим особенностям человека. Авторов интересует объективное исследование электроакустического преобразования, в противоположность субъективно наблюдаемому на добровольцах радиозвуковому эффекту. Более того, в радиозвуковом эффекте, скорей всего, возбуждение акустических колебаний происходит в направлении, перпендикулярном распростране-

нию электромагнитной волны, а в электроакустическом эффекте - звук должен распространяться по направлению действия электрического поля. Поэтому можно считать, что предлагаемые исследования оригинальны в постановочной части. Исследования также должны гарантировать объективность и надёжность получаемых результатов. Рассмотрение именно амплитудно-модулированного сигнала объясняется тем, что обнаружение звука возможно провести достаточно простыми средствами, например, с помощью пьеза датчика или же динамического микрофона. При амплитудной модуляции получается простой сигнал, удобный для частотного анализа и дальнейшего полномасштабного спектрального исследования. Конечно, также не исключаются исследования и при амплитудно-импульсной модуляции, и при амплитудной манипуляции.

Представим исследования возможных эффектов прямого воздействия высокочастотного поля в лечебной практике или физиотерапии [17, 18]. Рассматриваются и анализируются механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим веществом с целью обнаружения электроакустического эффекта. Слабая проводимость необходима, чтобы электродинамическое взаимодействие происходило не на границе раздела, а в значительном объёме, что определяется величиной скин-слоя. Возможно, что периодическая деформация сопровождающееся либо расширением, если происходит, разогрев вещества, или сжатием, если происходит диэлектрическая поляризация. Для понимания механизма трансформации модулированного высокочастотного сигнала в звук необходимо представить его спектральные изменения, сопровождающиеся акустическими эффектами. В дальнейшей исследовательской работе разрабатывается лабораторный макет, который позволит выполнить критериальные эксперименты, и, конечно, обсудить их результаты.

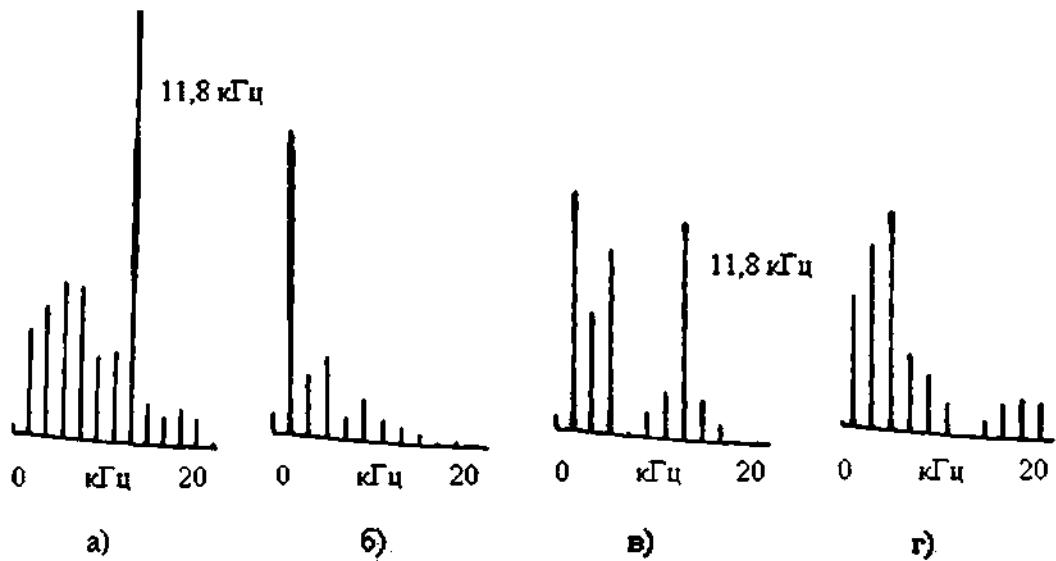


Рисунок 2. Спектр звука для сферы заполненной этанолом

На рисунке 2 представлены спектры для радиоимпульсов с частотой следования 1,7 кГц и длительностью: а – 40 мкс, б – 80 мкс, в – 120 мкс, г – 160 мкс. Выделена седьмая гармоника. (Заимствовано из [4]).

2.4 Комбинационное преобразование спектра

К слабо поглощающим средам могут быть отнесены многие вещества, находящиеся в состояниях, когда проводящие свойства среды соотносятся с диэлектрическими. Аналитически это определяется соотношением между величинами действительной и мнимой компонентами комплексной диэлектрической проницаемости. Это же можно сказать и о комплексной проводимости. Для большинства веществ данное состояние достигается лишь в некоторой частотной области, в силу зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты электромагнитной волны. Отметим, что слабо проводящие среды, включая почву, воду, в том числе, и физиологический раствор [8], – обладают нелинейными вольтамперными характеристиками, что позволяет нам предположить наличие части спектра выходного сигнала в области низких частот. Это обеспечивает так называемую кросс-демодуляцию сигнала [9]. Существенной нелинейностью также обладает граница раздела сред, что здесь не обсуждаем. В предлагаемом ниже критериальном эксперименте применяется амплитудно-модулированный сигнал – АМ и амплитудно-импульсная манипуля-

ция. Использование АМ-сигнала предполагает простоту анализа и однозначность получаемого результата.

АМ-сигнал может быть представлен в виде:

$$E_c(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} Am \cos(\omega_c - \omega_s)t + \frac{1}{2} Am \cos(\omega_c + \omega_s)t, \quad (1)$$

где m – глубина модуляции,

ω_c – частота ВЧ-сигнала,

ω_s – частота ВЧ-сигнала.

Из выражения (1) очевидно наличие в сигнале трёх частотных составляющих. В общем случае предположим, что ВАХ среды представима нелинейной функцией $I=f(U)$, которая аппроксимируется в некоторой окрестности точки U_0 полиномом Тейлора:

$$I = f(U_0) + a_1(U - U_0) + a_2(U - U_0)^2 + \dots + a_n(U - U_0)^n \quad (2)$$

В конечном счёте, можно говорить о наличии в спектре сигнала набора гармоник, определяемых соотношением комбинаторики:

$$\begin{cases} n\omega_1 + k\omega_2 \\ |k\omega_2 - n\omega_1|, \text{ где } (k, n) \in Z \end{cases}. \quad (3)$$

Исходя из спектра амплитудно-модулированного сигнала (1), получаем, что самая низкочастотная составляющая сигнала определяется, как $|k(\omega_c - \omega_s) - n\omega_c|$ при $k=n=1$ – это одна из боковых полос непосредственно связана с модулирующим сигналом.

Можно отметить, что в комбинационном спектре (3) выделяются именно низкочастотные сигналы, связанные с частотой модулирующего сигнала ω_s . В среде могут также возникнуть и токи или проводимости, или смещения на этой частоте и её первых гармониках. Совершенно очевидно, что спектры акустических колебаний на рис. 1, и наблюдаемые на других акустических моделях [3, 7], также подчиняются закону комбинаторики (3).

Соотношения комбинаторики, рассмотренное здесь, не учитывает инерционных эффектов, которые в большей степени зависят от частоты несущего сигнала, и проявляются, например, в сегнетоэлектриках при приближении к ВЧ радиодиапазоне.

3 Исследование электроакустического эффекта

В эксперименте использовался лабораторный генератор GRG-450В с амплитудной модуляцией и амплитудно-импульсной манипуляцией на звуковых частотах. Модулирующий сигнал создавался на генераторе ГЗ-112. Возникало звучание на сегнетоэлектрическом преобразователе ТГМ-25Е (габариты: $d=17$ мм, $h=2$ мм). Также в последующих опытах электрический сигнал с преобразователя поступал на электронный осциллограф GOS-620. Фото установки представлено на рисунке 3.

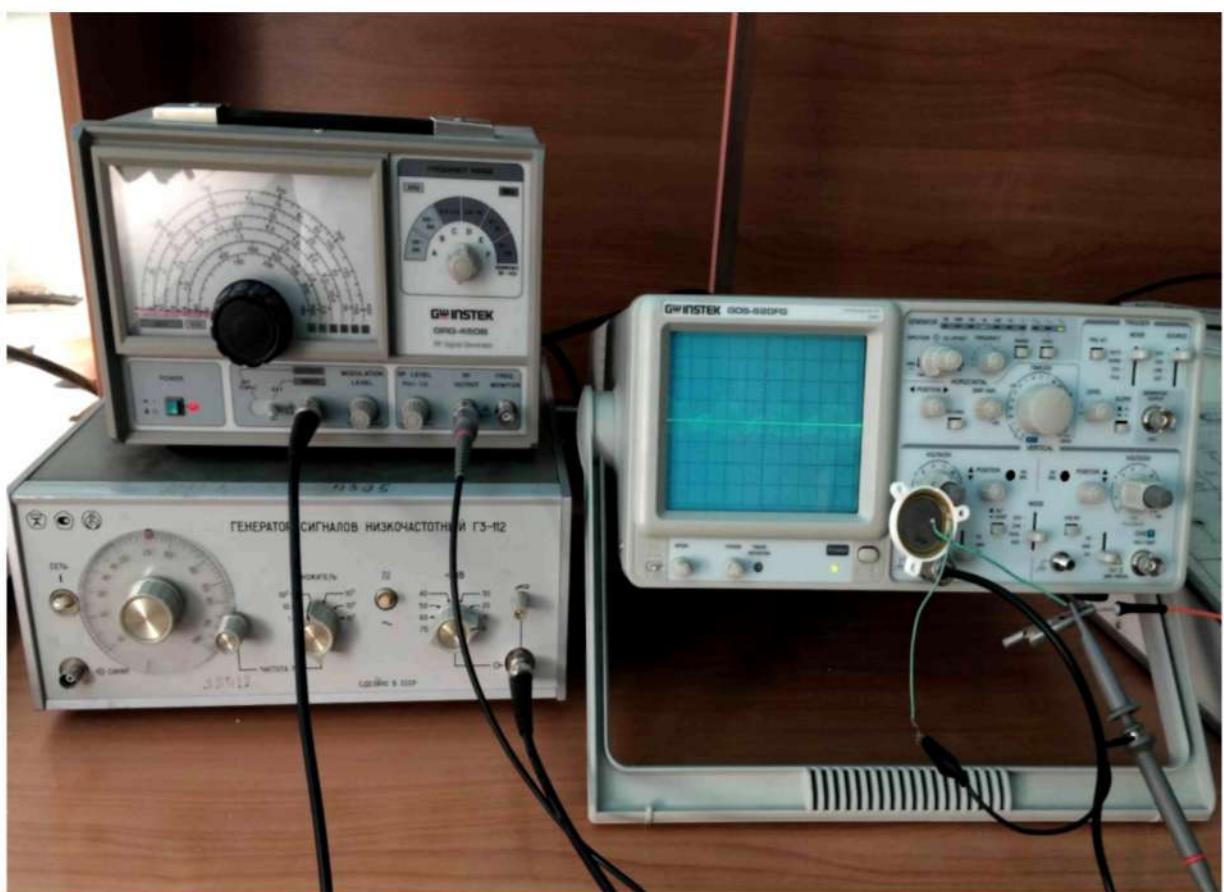


Рисунок 2. Лабораторный стенд для исследования электроакустического эффекта на сегнетоэлектрическом преобразователе ТГМ-25Е.

3.1. Амплитудная модуляция ВЧ сигнала

Приводятся осцилограммы, снятые с экрана осциллографа при амплитудной модуляции в условиях эксперимента, осуществляемого на лабораторных приборах. Чувствительность: 50 мВ/см (высота квадрата).

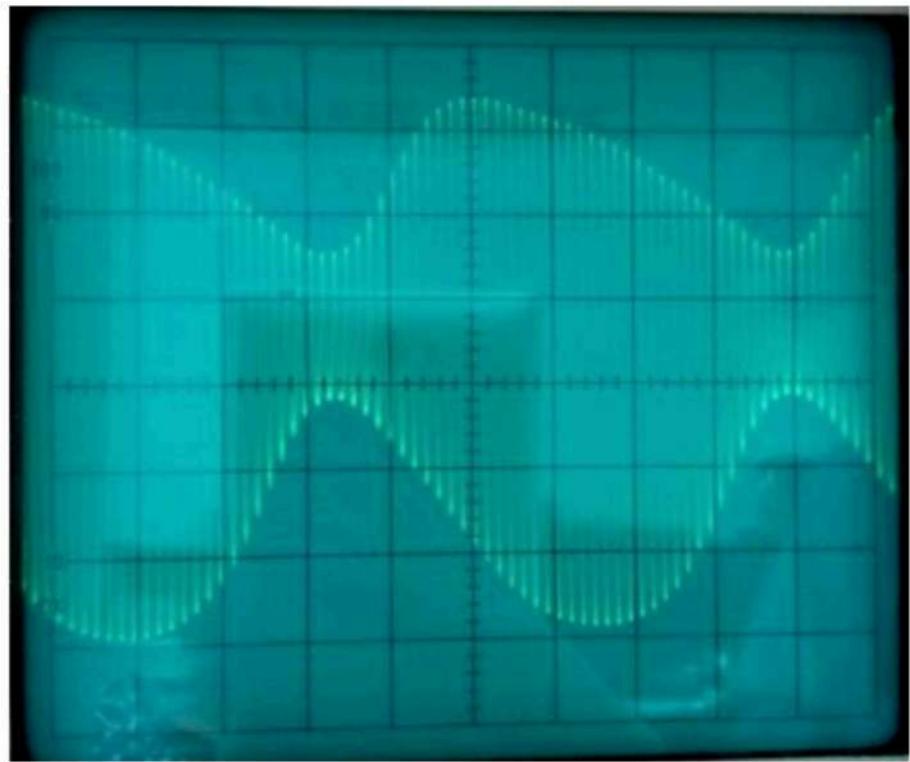


Рисунок 4. Модулированный сигнал на несущей частоте 100 кГц

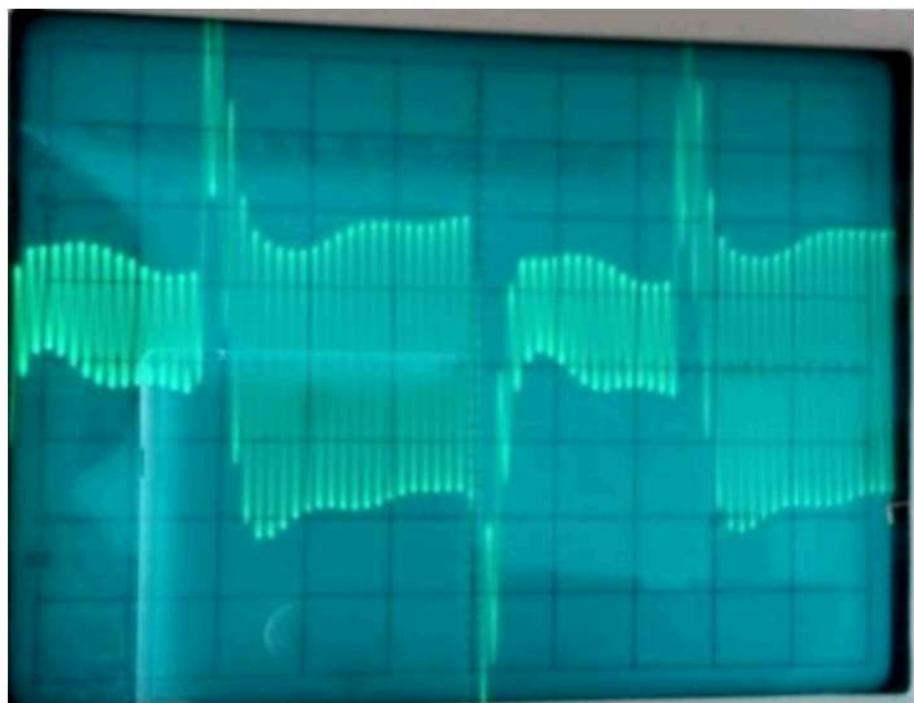


Рисунок 5. АМ. Частота несущего ВЧ сигнала 100 КГц

Высокочастотная компонента наблюдается на рис. 4, т.к. частота 100 КГц ещё разворачивается осциллографом, в котором частотное ограничение на 6 МГц. На рис. 5 и рис. 6 представлены осциллограммы сигнала на резонансной частоте преобразователя, равной 2,5 кГц. Частоты несущей в опытах раз-

личны. Можно отметить, что на рисунке 4 и рисунке 5 звуковой сигнал существенно отличается от синусоиды, но частота следования импульсов 2,5 КГц.

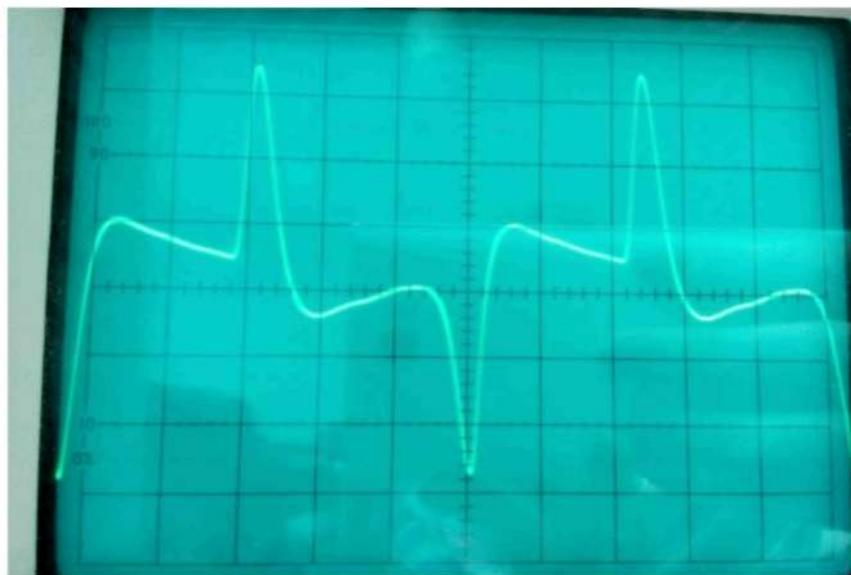


Рисунок 6. АМ. Частота несущего ВЧ сигнала 450 МГц

3.2. Амплитудно-импульсная модуляция ВЧ сигнала

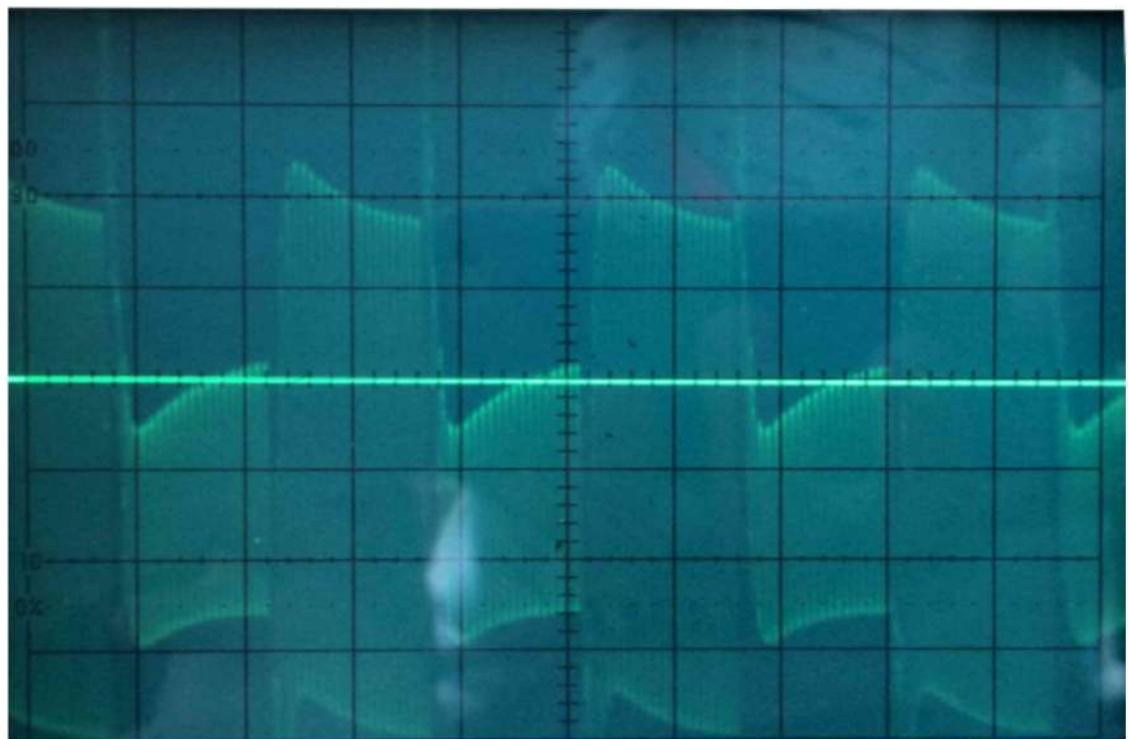


Рисунок 7. АИМ сигнал на несущей частоте 100 кГц

Импульсная модуляция обладает широким частотным спектром, что не может оказаться, как полагаем, на форме НЧ сигнала. На рис. 7 представлена форма модулированных колебаний на частоте 100 КГц.

Чувствительность: 50 мВ/см – высота квадрата на экране. На рис. 8, рис. 9 приводятся осциллограммы, полученные на сегнетоэлектрическом преобразователе.

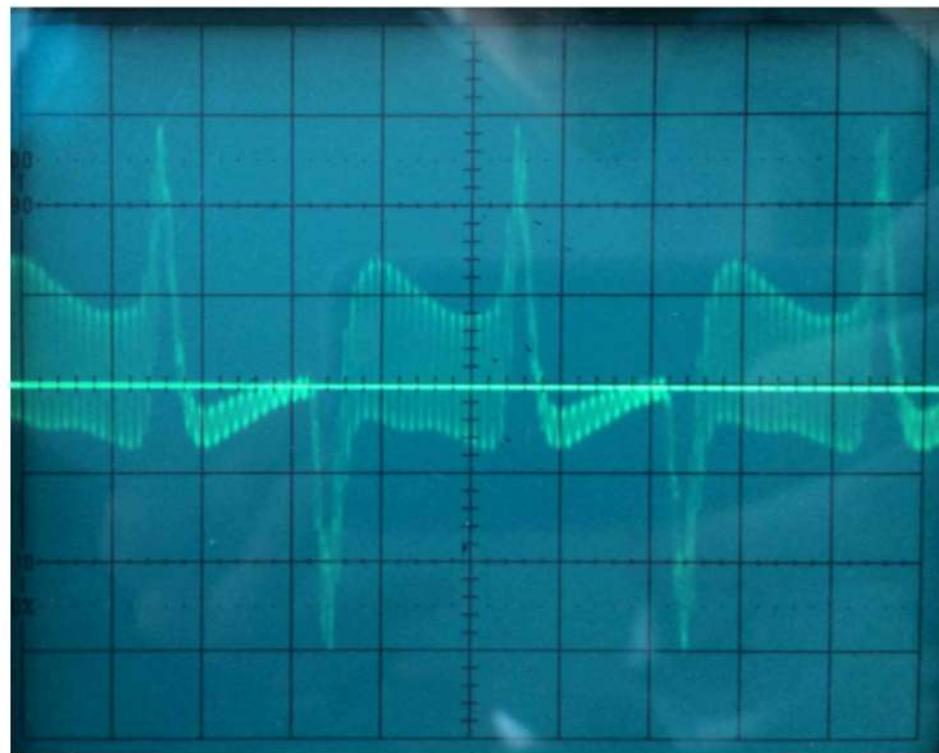


Рисунок 8. АИМ. Частота несущего ВЧ сигнала 100 КГц



Рисунок 9. АИМ. Частота несущего ВЧ сигнала 450 МГц

Длительности импульсов на рисунке 9 заметно меньше, чем на рисунке 6.

3.3. Установка для лабораторных исследований в жидкой среде

В дальнейшем предполагается провести опыты на других средах, где, скорей всего, эффект преобразования не столь эффективен и потребуется усиление акустического сигнала.

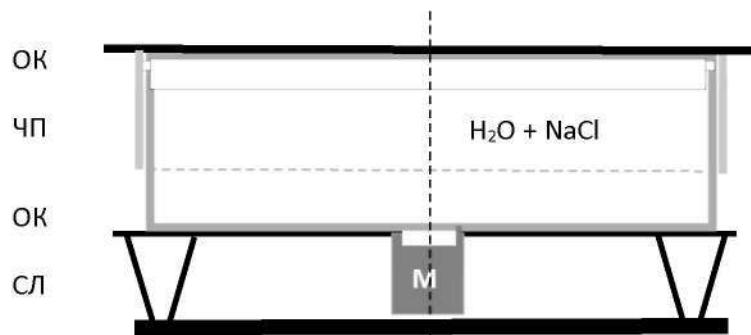
К слабо поглощающим средам могут быть отнесены многие вещества, находящиеся в состояниях, когда проводящие свойства среды соотносятся с диэлектрическими. Аналитически это определяется соотношением между величинами действительной и мнимой компонентами комплексной диэлектрической проницаемости. Это же можно сказать и о комплексной проводимости. Для большинства веществ данное состояние достигается лишь в некоторой частотной области, в силу зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты электромагнитной волны [9]. Отметим, что слабо проводящие среды, включая почву, воду, в том числе, и физиологический раствор [10], – обладают нелинейными вольтамперными характеристиками, что позволяет нам предположить наличие части спектра выходного сигнала в области низких частот. Это обеспечивает так называемую трасс-демодуляцию сигнала [10]. Существенной нелинейностью также обладает граница раздела сред, что здесь не обсуждаем. В работе в качестве испытуемой среды предполагается использовать воду, раствор в воде поваренной соли и, в частности, модель физиологического раствора: H_2O – 1000 гр., $NaCl$ – 9 гр. По «солёности» модель физического раствора соответствует морской воде и, в какой-то степени, плазме крови (обсуждается в [11]). В таблице 3 приведены электрические параметры сред [12].

Таблица 4.

Вид среды	Длина волны λ , м.	Проницаемость, ϵ .	Проводимость γ , См/м.	Вид среды	Длина волны λ , м.	Проницаемость, ϵ .	Проводимость γ , См/м.
Пресная вода	≥ 1 ; 0,1; 0,03; 0,003.	80; 75; 65; 10.	10^{-2} - $3 \cdot 10^{-2}$; 1-2; 10- 20.	Морская вода	≥ 1 ; 0,1; 0,03; 0,003.	75; 70; 65; 10.	1-6; 1- 6; 10-20; 10-20.

Схема лабораторного стенда представлена на рисунке 10. Чашка Петри – ЧП размещается между обкладками – ОК плоского конденсатора – С. Ко дну ЧП через отверстие в нижней ОК подводится микрофон – М. Всё размещается на лабораторном столике – ЛС. В чашке Петри находится раствор поваренной соли в воде от малой концентрации до концентрации для физиологического раствора: H_2O (99,1%) + $NaCl$ (0,9%).

К конденсатору С подводится электрический сигнал ВЧ от генератора ГСС. С акустического микрофона М сигнал усиливается и подаётся на осциллограф ЭО. Лабораторный стенд помещается в звука защищённый кожух.



ЧП - чашка Петри, $d = 8$ см;
ОК - обкладка конденсатора;
М – микрофон;
СЛ – столик лабораторный.

Рисунок 10. Лабораторный стенд



Рисунок 11. Подготовка к эксперименту.

На фото (рисунок 11 и рисунок 12) представлен лабораторная установка. В центре чашки Петри снизу размещается микрофон через отверстие в нижней обкладке конденсатора. Верхняя обкладка приклеена к крышке чашки.



Рисунок 12. Чашка Петри помещается в кожух, защищающий от шума

ВЫВОДЫ

Человеческая слуховая реакция на импульсы радиочастотной энергии, обычно называемые радиозвуком, является необыкновенным явлением. РЧ индуцированные звуки похожи на другие распространенные звуки, такие как щелчок, гудение, шипение, стук, или чирканье. РЧ-индуцированные звуки могут быть охарактеризованы низкой интенсивностью, слышны только в тихой обстановке. Место преобразования радиочастотного излучения в акустическую энергию находится внутри, на периферии улитки, и обнаружение РЧ-индуцированного звука в организме человека и РЧ-индуцированные слуховые реакции у животных подобны обнаружению акустического шума. Чтобы слышать звуки, люди должны быть способны слышать высокочастотные акустические волны в диапазоне 5 кГц и выше. Воздействия импульсных высокочастотных полей должно быть в диапазоне МГц и ГГц.

Слуховое явление зависит от энергии в одном импульсе, а не от средней плотности мощности. Guy обнаружил [7], что порог для слуха в 2450 МГц был связан с плотностью энергии 40 мкДж/см^2 на импульс, или поглощением энергии в импульсе 16 мкДж/г .

Механизм преобразования модулированного ВЧ сигнала в акустический НЧ ещё не изучен и представлен в виде гипотез. Требуется разработка лабораторных средств для физического исследования явления, чему и посвящена работа. На лабораторных стендах проведены пробные или критериальные измерения, подтверждающие о существовании исследуемого эффекта.

Следует заметить, что интерес представляет и механизм возникновения НЧ электрического сигнала, что предложено в квалификационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в работе в виду крайне малой мощности поглощения на преобразователе (меньше 0,1 Вт) получили эффекта нелинейно-поляризационного преобразования модулированного ВЧ сигнала в НЧ сигнал на сегнетоэлектрическом преобразователе. Это открывает возможности к исследованию всех РЧ и акустически-зависимых эффектов во многих областях наук (прежде всего в телекоммуникациях, экологии и физиологии) с абсолютно нового угла. Это новый диапазон исследования, который лежит за гранью физического восприятия звука и касается очень актуальной темы влияния ВЧ-излучения на организм человека и определения опасного порога излучения, с которыми могут быть связаны сети нового поколения (5G и т.д.).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамбовцев Д.К., Баранов В.К., Кыдырбаева Д.А. Механизм воздействия модулированного высокочастотного сигнала на неидеальный диэлектрик. Радиоизвук/ Вестник ЮУрГУ: Компьютерные технологии, Управление, Радиоэлектроника. 2016, Том 16, №2. С. 68-72.
2. Дж. А. Элдера и К.К. Чжоу. Научно-исследовательские лаборатории Motorola, Лодердейл, штат Флорида, США, 2003.
3. Airborne Instruments Laboratory. An observation on the detection by the ear of microwave signals. Proc IRE 44:2A.1956.
4. Cain CA, Rissmann WJ. 1978. Mammalian auditory responses to 3.0 GHz microwave pulses. IEEE Trans Biomed Eng BME 25:288–293.
5. Chou CK, GalambosR.1979.Middle-earstructurescontribute little to auditory perception of microwaves. J Microwave Power 14:321–326.
6. Chou CK, Guy AW. 1979. Microwave-induced auditory responses in guinea pigs: Relationship of threshold and microwave pulse duration. Radio Sci 14(6S):193–197.
7. Chou CK, Galambos R, Guy AW, Lovely RH. 1975. Cochlear microphonics generated by microwave pulses. J Microwave Power 10:361–367.
8. Chou CK, Guy AW, Galambos R. 1976. Microwave-induced auditory response: Cochlear microphonics. In: Johnson CC, Shore ML, editors. Biological effects of electromagnetic waves. Vol. 1. Rockville, MD: HEW Publication (FDA) 778010. pp 89–103.
9. Chou CK, Guy AW, Galambos R. 1977. Characteristics of microwave-induced cochlear microphonics. Radio Sci 12(6S): 221–227.
10. Chou CK, Guy AW, Foster KR, Galambos R, Justesen DR. 1980. Holographic assessment of microwave hearing. Letter to editor commenting on Frey and Coren (1979). Science 209: 1143–1144.
11. Chou CK, Guy AW, Galambos R. 1982. Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields. J Acoust Soc Am 71(6):1321–1334.

12. Chou CK, Yee KC, Guy AW. 1985. Auditory response in rats exposed to 2,450 MHz electromagnetic fields in a circularly polarized waveguide. *Bioelectromagnetics* 6:323–326.
13. Constant PC, Jr. 1967. Hearing EM waves. In: Jacobson B, editor. *Digest of the Seventh International Conference on Medical and Biological Engineering*. Stockholm, Sweden: Department of Medical Engineering, Karolinska Institute. p 349.
14. Airborne Instruments Laboratory. An Observation on the Detection by the Ear of Microwave Signals// *Pros. IRE*. 1956. V. 44. № 10. P. 2A.
15. Frey Allan. Auditory system response to radio frequency energy. *Aerospace Med.* 1961; 32. PP. 1140–1142.
16. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы. СанПин 2.2.4/2.1.8.055-96 (утв. постановлением ГосКомСанЭпидНадзораРФ 08.05.96 № 9).
17. Тигранян Р.Э., Шорохов В.В. Физические основы слухового эффекта СВЧ. Пущино: ОНТИ Пущинского научного центра АН СССР, 1990, 131 с.
18. Elder, J.A. and Chou, C.K., Auditory response to pulsed radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics*. 2003; 24. S162–S173. doi: 10.1002/bem.10163
19. Баринов А.Е., Тамбовцев В.И., Кыдырбаева Д.А. Коагуляция частиц крови под воздействием СВЧ излучения// Материалы XIII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Казань – Самара. – 2015. С. 353-355.
20. Даровских С.Н., Тамбовцев В.И., Шишкова Ю.С. Уменьшение порога когезии в СВЧ-поле для взвеси бактерий в физиологическом растворе на примере стафилококков // Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Самара –Нижний Новгород. – 2014. С. 221-222.
21. Баринов А.Е., Прокопов И.И., Железняк И.Л. Трасс-демодуляция амплитудно-модулированного сигнала в слабо поглощающей среде. - Материалы XIII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Казань – Самара. – 2015. С. 103-105.

22. Баринов А.Е., Вдовина Н.В., Прокопов И.И. О воздействии СВЧ излучения малой мощности на физиологический раствор // Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Нижний Новгород – Самара. – 2014. С. 217-219.

23. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: ВШ. 1967 г. 244 с.

