

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 611.08:537.87:612.06

Шутович
Виктор Андреевич

Имитаторы биологических тканей для исследования воздействия СВЧ
излучения на организм человека

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра

по специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

Научный руководитель

Давыдов Максим Викторович
кандидат технических наук, доцент

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

В процессе жизнедеятельности человек испытывает на себе влияние как естественного, так и искусственно созданного электромагнитных полей. Клинико-эпидемиологическими и физиологическими исследованиями установлено, что при систематическом воздействии даже нетепловые электромагнитные поля вызывают негативные преобразования в состоянии здоровья человека.

Для ослабления нежелательных излучений на современном этапе совершенствуются нормативные документы, регламентирующие допустимые частоты и амплитуды, а также используются различные технологии, к которым относится экранирование диэлектрическими материалами.

Сложности изучения данного вопроса связаны с тем, что исследование влияния на человека в целом очень сложно провести, так как последствия воздействия могут не проявляться в течение долгого времени. Другим аспектом, который сложно выполнить – это собрать контрольную группу, которая не будет контактировать с излучением достаточно продолжительное время.

Однако в медицинской электронике разрабатывается большое количество различных приборов, устройств, компьютеризированных комплексов для систем диагностики заболеваний, их профилактики и лечения. Несмотря на преобладание медикаментозных средств, в последнее время для коррекции состояния человека совершенствуются физиотерапевтические методы, сущность которых заключается в изменении химических и ионных взаимодействий в его организме.

Первичным действием ЭМП на живой организм является трансформация электромагнитной энергии поля в механическую энергию заряженных частиц. Влияя на движущиеся в теле электрически заряженные частицы, ЭМП воздействует на физико-химические и биохимические процессы. Тепло, образующееся под влиянием высокочастотного ЭМП внутри тканей, может изменять течение окислительно-восстановительных и ферментативных процессов. Оценить как тепловое, так и информационное воздействие СВЧ излучения на ткани человека можно используя имитаторы. Имитатор должен отвечать специфическим требованиям. В первую очередь иметь электромагнитные характеристики практически идентичные тканям человека. В диссертации показаны: методика проведения эксперимента, несколько отобранных видов материалов, состав, а также особенности построения модели и проведения расчетов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Высокие требования к качеству функционирования, широте возможностей, а также наличие связи с сетью Интернет радиоэлектронных устройств в сочетании с относительно невысокой стоимостью обуславливают их широкое распространение в количественном отношении. В связи с этим, становится актуальной необходимостью развития методов контроля и оценки влияния от данных устройств на живые организмы в целом, и человека в частности.

Глубина проникновения СВЧ волн в ткани, обусловлена их частотой и ограничивается несколькими сантиметрами. Однако, в трудах различных авторов указывается влияние на здоровья человека от тепловых и нетепловых воздействий электромагнитных волн.

В медицинской электронике разрабатывается большое количество приборов и устройств предназначенных для диагностики, профилактики и лечения различных заболеваний, использующих в основе физиотерапевтические методы, а не медикаментозные. Сущность физиотерапевтических методов заключается в изменении химических и ионных взаимодействий в организме. Основой первичного действия ЭМП на живой организм является трансформация энергии электромагнитного поля в механическую энергию заряженных частиц, которая изменяет течение окислительно-восстановительных реакций.

В связи с этим становится актуальным поиск материалов, которые можно использовать как имитаторы различных тканей человеческого тела для исследований.

Степень разработанности проблемы

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, предлагаются разные материалы с параметрами близкими к биотканям человека.

Известны научные работы как отечественных (М. В. Давыдов, Я. Т. А. Аль-Адеми, М. А. Квартальный и др.), так и зарубежных ученых (В. Alberts, A.Johnson, J.Lewis, M.Raff, K.Roberts, P.Walter A. Christ, Klingenberg A., Kuster и др.).

Несмотря на это, в технических источниках отсутствуют конкретные рекомендации по выбору имитационных материалов для исследования воздействия СВЧ излучения на них в зависимости от частоты.

Предложенное исследование направлено на то, чтобы показать возможность использования дешевых, не требующих особых условий хранения,

легко поддающихся обработке материалов в качестве имитаторов тканей человека.

Цель исследования. Целью диссертационной работы обозначено исследование воздействия СВЧ волн разной длины на имитаторы тканей человека.

Объектом исследования в данной диссертационной работе являются материалы различной природы и состава, которые могут использоваться в качестве имитаторов тканей человека.

Предметом исследования являются реакции имитаторов тканей человека (коэффициенты отражения, пропускания, поглощения) на воздействие на них электромагнитным излучением.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи исследования:**

1. Провести теоретическую проработку вопросов касательно видов электромагнитных волн, особенностей их распространения в средах и устройствах, определения структурных частей модели, существующих и имитаторов тканей человека.

2. Построить модель воздействия СВЧ излучения на ткани человека.

3. Провести практические опыты по воздействию СВЧ излучения на имитаторы тканей человека.

4. Сравнить практически полученные результаты с моделированием, сформировать выводы и предложения.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 80 03 «Электронные системы и технологии».

Теоретическая и методологическая основа исследования. При написании диссертации использованы результаты исследований белорусских и зарубежных специалистов в области физики, электроники, СВЧ техники, военной медицины, диагностики и терапии при воздействии СВЧ излучения. Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Личный вклад магистранта. Автором осуществлялись: постановка задачи, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, построение модели и проведение расчетов, анализ результатов и формулировка выводов. Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение научных результатов

проводились совместно с научным руководителем диссертации к.т.н., доцентом М.В. Давыдовым.

Научная новизна:

1. Систематизация информации о материалах, которые потенциально можно использовать в качестве имитаторов тканей человека.

2. Экспериментально полученные данные о воздействии ЭМИ на имитаторы тканей человека, выраженные в коэффициентах S_{11} , S_{21} , поглощенной энергии на частотах 8-12 ГГц.

3. Разработана модель для оценки воздействия СВЧ излучения на различные ткани и материалы для диапазона частот от 8 до 12 ГГц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по ним, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора, приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 103 страницы. Она включает 81 иллюстрацию, 13 таблиц, список использованных источников из 83 наименования на 9 страницах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель для исследования воздействия электромагнитных волн частотой от 8 ГГц до 12 ГГц как на ткани человека, так и на другие материалы. Она позволяет получать коэффициенты отражения (S_{11}), пропускания (S_{21}) и поглощения исследуемым объектом.

2. Результаты моделирования воздействия электромагнитного излучения частотой от 8 ГГц до 12 ГГц на образцы влажной кожи, сухой кожи, ткани глаза, выраженные в коэффициентах S_{11} , S_{21} , поглощении энергии объектами. Результаты представлены для тканей толщиной 0,5 мм, 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм.

3. Результаты экспериментов по воздействию электромагнитных волн частотой от 8 ГГц до 12 ГГц на имитаторы тканей человека в виде глицеринового мыла, свиной кожи и желатинового геля. Данные о параметрах S_{11} и S_{21} получены для образцов толщинами 1 мм, 2 мм и 5 мм.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию докладывались и обсуждались на 58-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь 2022 г.), на XIII Международной научно-технической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (г. Минск Беларусь, 2022 г.), на 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Беларусь 2023 г.).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **введении** рассмотрено современное состояние проблемы загрязнения окружающей среды электромагнитными полями, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их публикация, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** представлен анализ научно-технической литературы по теме магистерской диссертации, на основании которого систематизированы сведения о воздействии ЭМ волн на живых организмы, рассмотрены возможные подходы к моделированию и проведению экспериментов.

Рассмотрены 2 типа электромагнитные волны в зависимости от интенсивности: тепловые (больше или равно 10 мВт/см^2) и нетепловые (меньше 10 мВт/см^2).

Поражение тепловым воздействием ЭМИ человека имеет четкое выражение в виде ожогов, нарушений работы органов, систем человека. Поэтому быстро выявляется, изучено достаточно хорошо и имеет проработанные способы и методики восстановления.

Многочисленные рассмотренные исследования показали как губительный, так и лечебный эффект от СВЧ волн. В то время как поражение нетепловым излучением может не проявляться продолжительное время, к тому же он носит индивидуальный характер у каждого человека.

Так как активно развиваются средства и способы связи, использующие радиоволны, был произведен обзор актуальных и перспективных технологий, нетепловое влияние от которых представляет интерес для исследования. В связи со внедрением технологии 5G, использующей более высокие частоты, был выбран диапазон 8-12 ГГц для исследований.

На основе проведенного обзора литературы по существующим и потенциально подходящим имитаторам тканей человека, сформирован достаточно широкий список материалов. Для исследования выбраны: свиная кожа, желатин различной концентрации, глицериновое мыло.

Также для формирования собственной концепции проведения моделирования рассмотрены несколько уже проведенных исследований с помощью различных САПР и специализированных пакетов программ, выделены сильные и слабые стороны этих работ.

Во **второй главе** рассмотрены основные законы распространения электромагнитных волн как в открытом пространстве, так и в волноводе. Выбрана волна H_{10} как основная.

Осуществлен анализ вариантов согласования волн при переходе с волновода на коаксиальный кабель и обратно. Выделен четвертьволновой многосекционный согласующий трансформатор Чебышева как приоритетный вариант из-за его преимуществ по сравнению с другими вариантами. Как запасной вариант рассматривается биномиальный трансформатор.

Рассмотрена методика расчета волновых сопротивлений сегментов трансформатора, а также определен альтернативный способ через коэффициенты, представленные в таблице 2.1.

Как допустимый уровень рассогласования выбран $K_{СВ}=2$. В этом случае получается уровень потери сигнала 0,48дБ или 11%. Что является удовлетворительным результатом, незначительно снижающим презентабельность получаемых данных.

Определена конструкция установки, которая будет использоваться в эксперименте и при моделировании для достижения наибольшей достоверности результатов. Она состоит из: волновода, коаксиальных кабелей, коаксиально-волнового перехода в виде четвертьволнового трансформатора с высотами ступенек, определенными согласно полиномам Чебышева, имитаторов тканей человека, источника и анализатора СВЧ излучения (в экспериментальном случае).

В **третьей главе** перечислены основные программные комплексы для проведения моделирования электромагнитных явлений. Определены преимущества и недостатки каждого из них, а также изложено обоснование выбора пакета CST Studio Suite для проведения моделирования.

Также в главе описаны методика построения модели, нормативные документы, на основе которых определены численные значения размеров, волновых сопротивлений, допустимые частотные диапазоны и другие необходимые характеристики. Показано, что в качестве коаксиально-волноводного перехода лучше всего использовать четвертьволновой трансформатор с высотами, пропорциональными полиномам Чебышева. При расчетах можно пользоваться пересчетными коэффициентами, представленными в табл. 2.1. Если полученный коэффициент $K_{СВ}$ не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то можно воспользоваться PSO методом для оптимизации размеров сегментов трансформатора. В главе представлены размеры и перечень составных частей 2-х моделей для частот 8-10 ГГц и 10-12 ГГц.

Кроме того, проанализированы различные источники, предлагающие электрические параметры биологических тканей в зависимости от частоты излучения падающего, на них. Наиболее достоверными и опробованными являются данные, собранные Гэбриэль и др. В конце представлены результаты моделирования воздействия СВЧ излучения на имитаторы тканей человека.

В четвертой главе приведен список материалов, которые могут быть использованы в качестве имитаторов тканей человека для исследования воздействия ЭМИ. Выбраны для исследования гель из желатина, свиная кожа и глицериновое мыло. Также в главе представлена методика изготовления имитатора биоткани из желатина, а также описаны основные подготовительные мероприятия, проводимые с образцами.

Описан состав экспериментальной установки, состоящей из: векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZNB20, комплекта коаксиально-волноводных переходов, двух коаксиальных кабелей, которые подключаются к портам анализатора, волновода, и волноводной ячейки с исследуемой тканью.

Также описана методика настройки и калибровки собранного макета, которую нужно обязательно проводить перед началом экспериментов для получения достоверных результатов.

Описаны, выявленные по результатам опытов общие зависимости для всех имитаторов. Представлены полученные графики отражения (S11) и прохождения (S21) ЭМ волн через ткани, а также их анализ.

В заключении приведены закономерности и основные научные результаты, которые удалось получить по результатам выполненной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя сравнительный анализ результатов, полученных при моделировании и при выполнении эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1. Предположение об увеличении поглощения энергии тканями при повышении частоты волн подтверждаются как расчетами, так и опытным путем. Но изменение не так значительно: варьируется от 0,2 дБ до 1,1 дБ у различных образцов.

2. Наблюдаемая в модели ситуация, когда рост толщины приводил к снижению отражения, в эксперименте имеет обратный характер. В опытных данных различия показателя S_{11} между образцами варьируется от 0 дБ до 0,7 дБ, при численных расчетах – достигали 1 дБ.

3. В целом, значения параметра S_{11} у образцов модели (-1 дБ ... -2,8 дБ) и эксперимента (-1,4 дБ ... -2,5 дБ) довольно близки, особенно при сравнении ткани глаза с глицериновым мылом.

4. Результаты расчетов и опытов имеют общий тренд снижения отражения при повышении частоты.

5. Увеличение толщины имитаторов как в модели, так и в эксперименте снижает прохождение излучения. Наиболее близкие показатели опять у глазной ткани (моделирование) и глицеринового мыла (эксперимент): при 8 ГГц у обоих материалов при толщине 1 мм S_{21} составляет -15 дБ, при 12 ГГц у 5 мм образца глаза -25,9 дБ, у 5 мм образца мыла -30 дБ.

6. Повышение частоты на параметр S_{21} у разных тканей при моделировании имело разнонаправленное действие: у образцов глазной ткани и влажной кожи с малыми толщинами этот показатель повышался, в иных случаях он не изменялся либо снижался. В экспериментах у глицеринового мыла явной зависимости не выявлено, хотя 20% гель и свиная кожа имеют четковыраженный тренд на снижение показателя при повышении частоты. При анализе всех полученных значений параметра прохождения обнаруживается, что разница между результатами на диапазонах 8-10 ГГц и 10-12 ГГц составляет около 7-10%.

Основные научные результаты диссертации

1. Сформированы состав и методика построения модели для исследования воздействия ЭМИ на ткани человека для различных частотных диапазонов.

2. Проведены расчеты параметров S_{11} , S_{21} и коэффициента поглощения влажной кожи, сухой кожи, глазной ткани в диапазоне частот 8-12 ГГц.

3. Предложено использование глицеринового мыла, свиной кожи и желатинового геля для создания имитаторов биологических тканей с различными значениями их комплексного сопротивления.

4. Получены экспериментальные данные параметров S_{11} , S_{21} и коэффициента поглощения имитаторов биотканей в виде глицеринового мыла,

свиной кожи и желатинового геля в диапазоне частот 8-12 ГГц.

5. Установлено, что существуют некоторые различия в показателях S_{11} , S_{21} и коэффициента поглощения, полученных при моделировании и реальных опытах. Однако показатель S_{11} отличаются незначительно (от 0 дБ до 1,5 дБ), показатель S_{21} имеет более ощутимую разницу от 0 дБ до 10 дБ. Данная разница зафиксирована при толщине ткани равной 5 мм, при меньшей толщине различия достигают 4 дБ. Модель всегда показывала большее прохождение через ткань, чем реальный эксперимент.

6. Выявлено, что параметр отражения прямо пропорционален величине концентрации веществ (белка, глицерина), но все же изменяется незначительно. Параметр прохождения же наоборот с увеличением концентрации уменьшается.

7. Из использованных в исследовании имитаторов наиболее близкие значения параметров оказались у глазной ткани (модель) и глицеринового мыла (эксперимент). Из текущего перечня имитаторов лучшим по эксплуатационным и электрическим параметрам будет глицериновое мыло.

8. Что касается дальнейшего совершенствования имитаторов, а конкретнее геля из желатина и глицеринового мыла, анализ полученных данных показал, что значения параметра S_{11} незначительно отличается от результатов, полученных при моделировании и эксперименте на свиной коже. А параметр прохождения, в свою очередь, показал более ощутимую разницу. Для имитатора биологической ткани больше подошел бы желатиновый гель и глицериновое мыло с меньшей концентрацией веществ, так как при увеличении концентрации уменьшается параметр S_{21} , что и поможет получить нужные данные.

9. Использование свиной кожи в обозначенных целях выглядит малоперспективным из-за невысокой репрезентативности. Индивидуальные особенности особи, часть тела с которой берется кожа, а также время с момента умерщвления животного до использования в экспериментах значительно влияют на электрические и физические свойства материала. Это затрудняет получение имитаторов со стабильными параметрами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[1-А] Кудренко, И. И. Имитаторы тканей человека для исследования воздействия СВЧ излучения / И. И. Кудренко, В. А. Шутович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 430–432. – Режим доступа : <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926>.

[2-А] Шутович, В. А. Методика проведения моделирования воздействия СВЧ излучения на ткани человека / В. А. Шутович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 513–515. – Режим доступа : <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926>.

[3-А] Моделирование воздействия свч излучения перспективного диапазона 5g (3,4-3,8 ггц) на ткани человека = Simulation of the impact of 5g (3.4-3.8 ghz) microwave radiation on human tissue / М.В. Брилевская [и др.] // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIII Международной научно-технической конференции, Минск, 8-9 декабря 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; отв. за вып.: М. В. Давыдов. – Минск : БГУИР, 2022. – С. 225–229.

[4-А] Ражабов Ш. Ф. Исследование воздействия СВЧ излучения на имитаторы тканей человека / И. И. Кудренко, В. А. Шутович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 430–432. – Режим доступа : <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/46926>.

[5-А] Кудренко, И. И. Исследование патологий аортального клапана с помощью программного комплекса SolidWorks / И. И. Кудренко, В. А. Шутович // Электронные системы и технологии [Электронный ресурс] : сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18-22 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 433–437.

[6-А] Кудренко, И. И. Имитационное моделирование кровотока аортального клапана человека=Simulation modeling of human aortic valve blood flow / И. И. Кудренко, В. А. Шутович, М. В. Давыдов // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIII Международной научно-технической конференции, Минск, 8-9 декабря 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; отв. за вып: М. В. Давыдов. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 112–115.