

УДК 53.047

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТКАНИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ЧАСТОТОЙ 2.4 ГГц

*Бекабаев Д.Д., магистрант гр.167001, Савицкий В.А. – магистр. тех. наук, аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*Шевчук О.Г. – канд. тех. наук*

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние электромагнитного излучения на ткани человеческого тела частотой 2,4 ГГц. Приведены диэлектрические параметры человеческих тканей для данной частоты, а также физико-термические свойства слоев кожи.

**Ключевые слова.** электрическое поле, магнитное поле, электромагнитное поле, электромагнитное излучение

Характер взаимодействия ЭМП (электромагнитного поля) с различными тканями определяется их электрическими и магнитными свойствами. Параметрами этих свойств являются: удельная электропроводность  $\sigma$ , характеризующая концентрацию и подвижность свободных заряженных частиц биологических тканей, а также их диэлектрическая ( $\epsilon$ ) и магнитная ( $\mu$ ) проницаемость. Они отражают степень уменьшения силовых характеристик электрического и магнитного полей в различных тканях по сравнению с вакуумом. На основе этих параметров можно рассчитать силовые характеристики электромагнитного поля в тканях и количественно оценить процессы, происходящие при воздействии ЭМП на ткани. В состав различных тканей и сред организма входят ионы, пространственно ориентированные полярные и неполярные макромолекулы различных линейных размеров и диполи воды. Разные ткани содержат их в неодинаковой пропорции, поэтому каждая из них обладает различными диэлектрическими свойствами и электропроводностью.

Электропроводность живых тканей определяется концентрацией ионов и их подвижностью. В межклеточной жидкости с максимальным содержанием носителей тока – ионов – удельная электропроводность достаточно высока и составляет 1 См/м. В цитозоле, содержащем органеллы и крупные белковые макромолекулы, напротив, она понижается до 0.003 См/м. Удельная электропроводность плазмолеммы и внутриклеточных мембран, составляющих до 50 % массы клетки, еще ниже:  $(1 - 3) \cdot 10^{-11}$  См/м. Электропроводность кожи зависит от ее толщины, состояния дериватов и содержания воды. Толщина эпидермиса большинства участков тела составляет 0,07 – 0,12 мм.

Из-за малого количества межклеточной жидкости и выраженной компартментализации (наличия мембранных ячеек) цитозоля, существенно ограничивающей подвижность содержащихся в нем ионов, удельная электропроводность целых органов и тканей значительно меньше, чем составляющих их сред.

Диэлектрическая проницаемость характеризует способность к пространственному смещению структур тканей и образованию объемного дипольного момента (поляризации). Она обусловлена преимущественно связанными зарядами, полярными и неполярными макромолекулами различных линейных размеров и диполями воды. Относительная диэлектрическая проницаемость различных тканей для постоянного электрического поля составляет  $10^3 - 10^6$ . Кардинальной особенностью организма человека является наличие частотной зависимости (дисперсии) пассивных электрических свойств тканей, связанных с неодинаковым состоянием заряженных частиц, при воздействии ЭМП различной частоты.

В отличие от электрического поля биологические ткани ослабляют внешнее магнитное поле в очень малой степени (порядка 0,001%). Большинство из них относятся к диамагнетикам (сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов составляющих их биологических молекул равна нулю), которые слабо преобразуют энергию магнитного поля. Энергия магнитного поля, поглощаемая, например, плазмолеммой, не превышает  $10^{-26}$  Дж. Магнитная проницаемость клеток и практически всех жидкостей организма составляет 0,99995. Лишь некоторые молекулы, входящие в состав различных структур организма (молекулярный кислород, соли железа, некоторые гидроперекиси и радикалы), имеют суммарный магнитный момент, не зависящий от внешнего магнитного поля. Такие низкомолекулярные соединения относят к парамагнетикам, магнитная проницаемость которых составляет 1,00005. Различие магнитных проницаемостей диа- и

парамагнетиков существенно не изменяет характера взаимодействия последних с внешним магнитным полем, так как их величины имеют одинаковый порядок.

Известны исследования по электрическим характеристикам различных типов тканей организма [1]. В большинстве случаев результаты исследований были опубликованы с указанием конкретных частот или диапазонов частот. Было показано, что электрические характеристики тканей организма зависят от частоты, и при моделировании значения этих характеристик должны быть интерполированы с учетом частоты и типа тканей организма.

Для моделирования индуцированной плотности тока или других параметров, таких как плотность потока энергии, SAR и воздействие полей, можно также использовать упрощенную форму однородного тела с равномерной удельной электропроводностью. Подходящими для моделирования тела человека являются вытянутые сфероиды и однородные модели тела. Простые диски и кубоиды также часто используются в качестве методов для подтверждения вычислений, так как геометрию и ситуацию воздействий легче смоделировать, а затем сравнить с известными результатами и теоретическими данными.

Диэлектрические свойства такой модели часто являются усредненными для всего тела на рассматриваемых частотах, но могут, напротив, быть типичными для отдельных частей тела или типов тканей организма, в таблице 1 представлены значения параметров диэлектрических свойств слоев человеческих тканей.

Таблица 1 – Диэлектрические свойства слоев кожи

Ткань	2,4 ГГц	
	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Проводимость $\sigma$ , См/м
Эпидермис	3,39	0,3
Дерма	4,28	18,2
Подкожный жир	3,76	7,1
Мышцы	24,4	33,6

Реакции тканей организма на термические факторы определяются их теплофизическими свойствами. Параметры теплофизических свойств тканей организма приведены в таблице 2

Таблица 2 – Физико-термические свойства слоев кожи

Ткань	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/кг * К	Удельная теплопроводность $K$ , Вт/м*К	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Толщина $x$ , м
Эпидермис	3600	0,235	1190	0,00008
Дерма	3300	0,445	1116	0,002
Подкожный жир	2700	0,185	971	0,01
Мышцы	4000	0,5	1000	0,03

Модель кожи, состоящая из четырех разных слоев, а именно: эпидермис, дерма, подкожный жир и мышцы подвергаются воздействию частоты мобильной связи 2.4 ГГц (рисунок 1). Микрополосковая антенна располагается на расстоянии 2 см от слоя эпидермиса. Электромагнитная энергия передается во входной порт антенны, далее в окружающее пространство и поглощается многослойной кожной тканью.

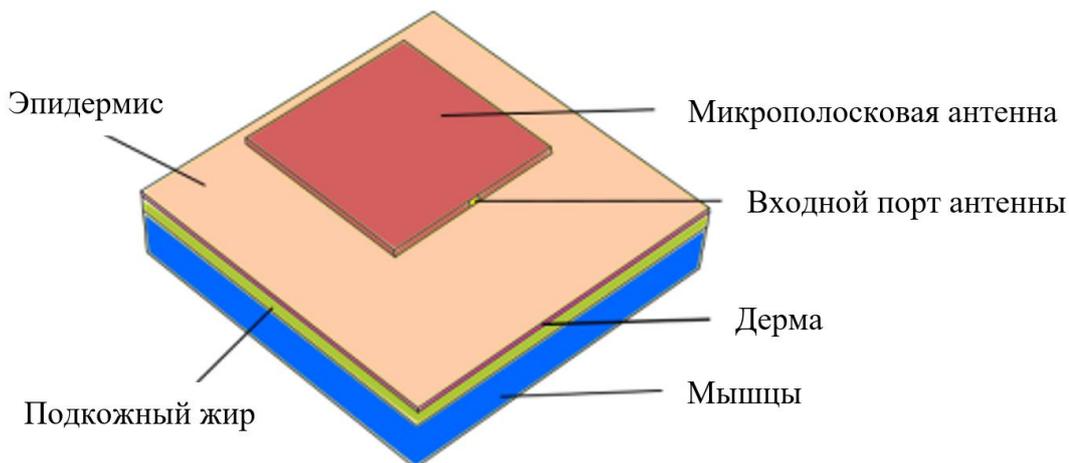


Рисунок 1 – Схематическая геометрия многослойной кожной ткани с патч антенной

Структура патч антенны представлена на рисунке 2, а ее параметры для выбранной ранее частоте представлены в таблице 3.

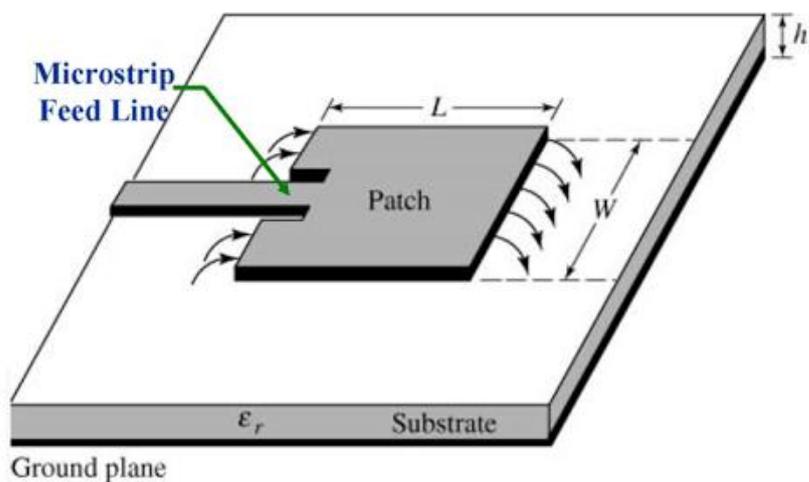


Рисунок 2 – Структура патч антенны

Таблица 3 – Параметры патч антенны

Частота, ГГц	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$	Толщина диэлектрика $h$ , мм	Ширина антенны $W$ , мм	Длина антенны $L$ , мм
2,4	4,7	0,2	37,0	28,8

На основании приведенных ранее данных проведено моделирование в программном продукте CST Studio Suite, полученные результаты представлены на рисунках 3 и 4.

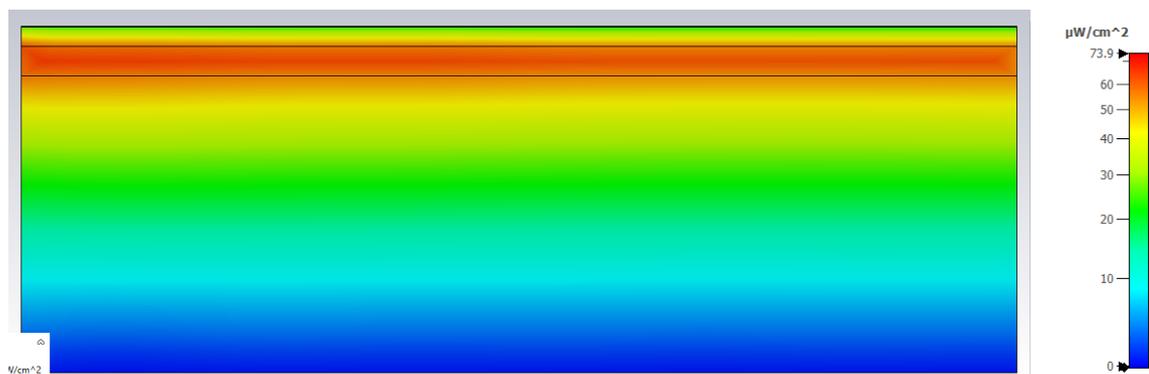


Рисунок 3 – Плотность потока энергии электромагнитного излучения в тканях тела человека при воздействии частотой 2.4 ГГц



Рисунок 4 – Нагрев тканей в результате воздействия электромагнитного излучения в тканях тела человека при воздействии частотой 2.4 ГГц

Нагрев эпидермиса и дермы, при воздействии электромагнитным излучением частотой 2.4 ГГц составил 0,2 градуса, при этом плотность потока энергии электромагнитного излучения (ППЭ) составила 73,9 мкВт/см<sup>2</sup>. В соответствии с [3] при продолжительности воздействия менее 3,0 часов данное воздействие электромагнитным излучением на ткани тела человека допускается.

**Список использованных источников:**

1. Гигиеническая оценка электромагнитных излучений : учебно-методическое пособие / И.В. Скоробогатая, Э.И. Леонович. – Минск : БГМУ, 2018. – 39 с..
2. IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure.
3. Санитарные нормы и правила «Требования к электромагнитным излучениям радиочастотного диапазона при их воздействии на человека от 05.03.2015.