



## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ БИОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕТОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Соловской А.С., аспирант  
e-mail: solovskoyas@mail.ru

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Интенсивное использование технических инноваций определило рост эпидемиологических исследований, направленных на изучение влияния электромагнитного излучения на организм человека. Автором проанализированы исследования, доказывающие негативное влияние излучений на нервную систему человека. Представлена актуальность контроля интенсивности электромагнитных излучений на основе расчета удельной поглощенной мощности (SAR). Моделирование уровня поглощенной мощности проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Рассмотрена общая логика построения изучаемой модели. Представлены результаты неоднородного распределения диэлектрической проницаемости, распределения электрического поля и удельной поглощенной мощности.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, СВЧ-излучение, удельная поглощенная мощность, SAR, биологические объекты, метод конечных элементов, компьютерная визуализация

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день особое внимание уделяется вопросу определения степени воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) различных технологических инноваций на биологические объекты [1, 2]. Это связано главным образом с тем, что расширенная функциональность таких устройств привела к непрерывному росту спроса на них и их использования. Особенно возрастает интерес к воздействию электромагнитных полей (ЭМП) на конкретные участки (ткани), функции человеческого организма. В частности, в ряде работ [3-5] рассматривается влияние ЭМП на голову; результаты доказывают негативное влияние на нервную систему, приводящее к ухудшению определенных функций из-за появления аномальной усталости, беспокойного сна, продолжающейся нервозности без причины или снижения зрения, сопровождающегося раздражением глаз [5].

Система мобильной связи – одна из наиболее значимых телекоммуникационных систем, работающих в микроволновом диапазоне (300 МГц – 300 ГГц) [6]. Интенсивное использование мобильных телефонов определяет рост беспокойства по поводу последствий для здоровья. По сравнению с излучающими станциями, расположенными вдали от людей, мобильные телефоны являются источниками ЭМИ, расположенными вблизи головы или тела, что определяет актуальность разработки методов и подходов к обеспечению электромагнитной безопасности [6].

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного исследования является поглощение энергии электромагнитного поля биологическими объектами в условиях воздействия микроволнового электромагнитного излучения.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Негативное воздействие ЭМИ на пользователя определяется высоким уровнем поглощения и высокой проводимостью отдельных участков биологических тканей. Исследования, направленные на получение распределения поглощенной мощности, позволяют использовать данные не только для сертификации устройств мобильной связи, но и для контроля мощности, поглощаемой человеческим организмом [3-5, 7, 8]. При изучении влияния устройств мобильной связи на людей наибольший интерес представляет человеческая голова из-за ее расположения вблизи источника излучения. Поэтому для контроля интенсивности ЭМИ необходимо проводить расчет удельной поглощенной мощности биологическими тканями.

В соответствии с целью исследования были поставлены задачи:

- 1) определить программную среду для моделирования электромагнитных полей, позволяющую рассматривать задачи электромагнитного нагрева;
- 2) рассмотреть логику построения модели биологического объекта, а также осуществить построение модели с учетом определенных параметров;
- 3) представить визуализированное поглощение электромагнитной энергии.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были использованы следующие теоретические методы научного исследования: анализ литературы по теме исследования, изучение и обобщение сведений, касающихся поглощения энергии ЭМП биологическими объектами, а также компьютерное моделирование.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взаимодействие электромагнитного излучения с биологическими объектами описывается удельной поглощенной мощностью (SAR) [7, 8]. Этот параметр обозначает значение удельной мощности, которая была поглощена внутри объекта. Значение SAR может быть рассчитано с использованием таких параметров, как напряженность электрического поля  $E$ , электропроводность  $\sigma$  (С/м) и плотность материала  $\rho$  [9]:

$$SAR = \frac{\sigma |E^2|}{\rho} \quad (1)$$

Нагрев – прямой эффект поглощения электромагнитной энергии под воздействием радиочастотного электромагнитного излучения, исходящего от источника, является основным соответствующим эффектом локализованного воздействия на человека высокочастотного неионизирующего электромагнитного излучения в условиях, возникающих в результате использования мобильных устройств, работающих в непосредственной близости от головы. Международные независимые органы власти, предоставляющие научную информацию о риске для здоровья и рекомендации по ограничению биологических эффектов, связанных с воздействием радиочастотного излучения, продолжают рассматривать нагрев как критический эффект и использовать его в качестве основного плацдарма для разработки руководящих принципов и правил в области пределов защиты человека и практических мер [9].

В данном исследовании для контроля удельной поглощенной мощности и биологического нагрева человеческих тканей используется компьютерное моделирование в программном обеспечении COMSOL Multiphysics [10-12].

COMSOL Multiphysics – программная среда для моделирования и оптимизации любой физической или химико-физической системы. Основным используемым численным методом в среде является метод граничных элементов. COMSOL Multiphysics позволяет моделировать процессы механики, акустики, гидрогазодинамики, электромагнитные явления, теплообмен. Среда предоставляет возможность рассматривать и исследовать как отдельные индивидуальные задачи и процессы, так и сопряженные процессы в совокупности с учетом взаимосвязи между величинами, входящими в разные уравнения математических моделей. В возможности COMSOL входит решение как прямых задач по заданным входным

данным описывать поведение системы по заданным режимам работы устройств, так и обратных задач по определению неизвестных параметров по известным данным [11].

Моделирование уровня поглощенной мощности производится с помощью модуль-расширения «радиочастота», предоставляющего широкий спектр технических инструментов для моделирования (резонаторы, волноводы, фильтры, антенны, периодические решетки), а также моделирование любых СВЧ-процессов и явлений, связанных с исследованием и распространением электромагнитных волн в линейных, нелинейных и дисперсионных средах. Кроме того, возможности модуля соприкасаются с другими инструментами пакета, в том числе изучения СВЧ-нагрева, деформации компонентов, микроволновой плазмы [12].

COMSOL Multiphysics позволяет визуализировать распределение температуры нагрева головы (представлено на рисунке 1) [10]. При моделировании электромагнитного нагрева в COMSOL Multiphysics рассчитываются усредненные за период колебания (потери вследствие конечной проводимости или в среде с гистерезисными диэлектрическими потерями). Их можно использовать на входе тепловой задачи как источник тепла (в соответствии с законом Джоуля – Ленца). Для СВЧ-расчета биологических тканей используется специальный интерфейс Bioheat Transfer, который позволяет учитывать метаболизм и течение крови через уравнение теплопроводности Пеннса [10]. При вычислениях дополнительно имеется возможность учитывать критерий повреждения ткани, уровень энергии или температуру в определенный период времени [10].

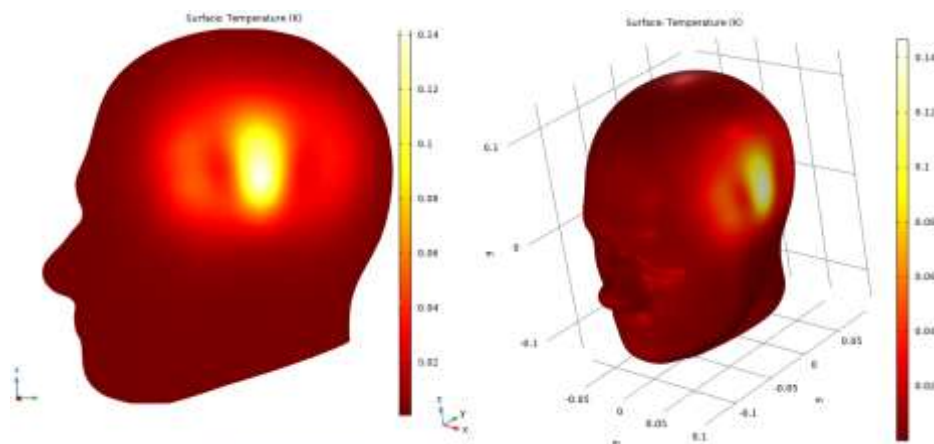


Рисунок 1 – Распределение температуры нагрева головы человека

Моделирования поглощения электромагнитной энергии проводятся в модели головы, расположенной в непосредственной близости с мобильным телефоном. Геометрией представленной модели головы, используемой для регламентных измерений уровня поглощения, является SAM-фантом по стандартам IEEE, IEC и CENELEC [9]. При этом частота излучающего источника составляет 835 МГц, что обусловлено необходимостью получения реалистичной модели головы на первых этапах моделирования в данном направлении с использованием минимальных ресурсов вычислительной техники.

В таблице 1 приведены характеристики и значения параметров, характеризующих внутреннюю составляющую модели.

Таблица 1 – Параметры модели головы человека

Параметр	Значение
Диэлектрическая проницаемость излучающего источника	5,2
Диэлектрическая проницаемость для мозговой ткани	58
Электрическая проводимость мозговой ткани [См/м]	1,1
Плотность мозговой ткани [кг/м <sup>3</sup> ]	1,0e3
Теплоемкость крови [Дж/(кг·К)]	3630

Плотность крови [кг/м <sup>3</sup> ]	1000
Частота [МГц]	835

Общая логика построения модели является классической и включает следующие этапы [11, 12]:

- 1) обрисовывается геометрия благодаря встроенному геометрическому ядру, а также задаются свойства материалов;
- 2) производится описание задачи благодаря интерфейсу для расчета электромагнитных процессов в частотной и временной области, включающему широкий спектр инструментов;
- 3) настроенная модель разбивается конечно-элементной сеткой, и выбирается вид анализа. Для расчета частотной области среда предлагает стартовую конфигурацию сетки, подстроенную под длину волны и частоту;
- 4) проводятся различные вариации типов исследований: модальный анализ, анализ на собственные частоты, расчет частотной области, расчет временной области, а также различные техники под сопряженные задачи;
- 5) постобработка и визуализация проводятся в среде с помощью специализированных вычислений (выводы сосредоточенных параметров, представление диаграммы излучения и рассеяния).

Физические свойства (распределение проводимости, диэлектрическая проницаемость, скорость перфузии крови) обозначены переформировкой интерполяционной функции оцифрованных данных магнитно-резонансной томографии головы человека [9]. Расчет поглощенной мощности проводится на частоте 835 МГц. Неоднородное распределение диэлектрической проницаемости и удельной поглощенной мощности в голове представлены на рисунке 2.

Антенна, расположенная вблизи биологического объекта, состоит из тонкого слоя металла, нанесенного на прямоугольную диэлектрическую подложку из FR4. В интерфейсе COMSOL Multiphysics можно упрощенно представить металлические части антенны (микрополосковая линия питания, излучатель и заземление) как поверхности. В данном случае питание антенны осуществляется при помощи сосредоточенного порта с сопротивлением 50 Ом. При этом напряжение на входе модулятора составляет 45 В, а мощность излучающего источника приблизительно равна 0,5 Вт, определяемая как средняя мощность за период высокой частоты при амплитудной модуляции [13].

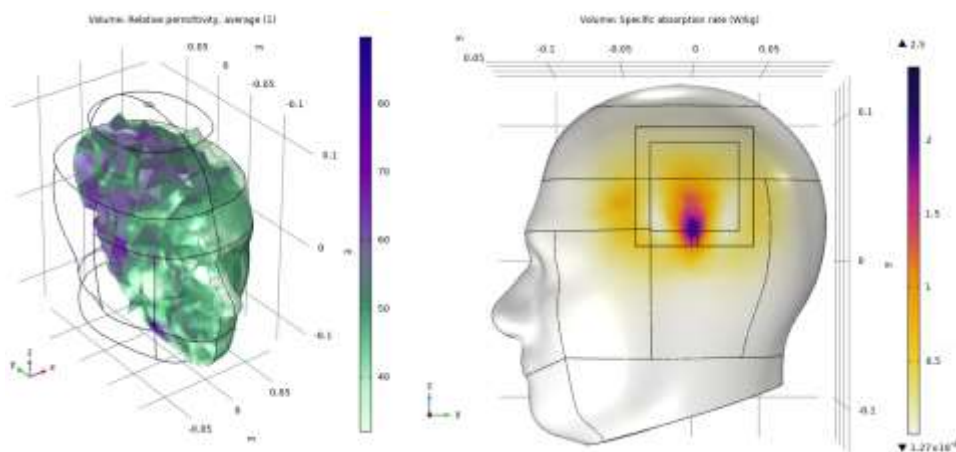


Рисунок 2 – Неоднородное распределение диэлектрической проницаемости и удельной поглощенной мощности в голове

Представленные данные неоднородного распределения свидетельствуют о высоком значении диэлектрической проницаемости в области мозга и скул (87,5), однако в мягких тканях значение проницаемости уменьшается (32,0).

Максимальное значение удельной поглощенной мощности составляет 2,31 Вт/кг, что является недопустимым по абсолютно любым международным стандартам [9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эпидемиологические исследования [3-5, 7, 8], направленные на изучение влияния уровня SAR на организм человека, подтверждают актуальность контроля уровня удельной поглощенной мощности. Однако в Российской Федерации уровень SAR не регламентируется. Результаты исследования определяют необходимость развития подхода для оценки опасности электромагнитной обстановки с учетом дополнительного контроля энергетических параметров электромагнитного поля (SAR) для разных частей тела биологических объектов. Перспективными направлениями развития разработанной модели являются возможность учета положения источника излучения относительно биологических объектов, использование в модели излучающих источников различной частоты, а также учет технических характеристик источников (мощности источника и его направленности).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловской, А. С. Контроль электромагнитной обстановки с учетом количественной оценки поглощенной электромагнитной энергии / А. С. Соловской, Е. В. Титов // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России : Материалы III Международной научной конференции, Красноярск, 24 ноября 2022 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – С. 121-124.
2. Титов, Е. В. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов, А. А. Сошников, В. Ю. Васильев, А. С. Соловской // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3 (209). – С. 102-108. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108.
3. Meenu, L. A survey on heating effects of electromagnetic radiation on human body / L. Meenu, S. Aiswarya, S. K. Menon // Proceedings of the 2020 International Conference on Computing, Communication and Security, ICCCS 2020, Bihar, 14–16 октября 2020 года. – Bihar, 2020. – P. 9277399. – DOI 10.1109/ICCCS49678.2020.9277399.
4. Яргин, С. В. О биологическом действии электромагнитного излучения радиочастотного диапазона // Сибирский научный медицинский журнал. – 2019. – 39 (5). – С. 52-61.
5. Lai, H. Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields / H. Lai // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2021. – DOI 10.1080/15368378.2021.1881866.
6. Куликова, Л. В. Основы электромагнитной совместимости / Л. В. Куликова, О. К. Никольский, А. А. Сошников. – Москва-Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 405 с. – ISBN 978-5-4499-1175-9.
7. Gultekin, D. H. Absorption of 5G Radiation in Brain Tissue as a Function of Frequency, Power and Time / D. H. Gultekin, P. H. Siegel // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 115593-115612. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.3002183.
8. Markovic, V. 5G EMF Exposure: Overview of Recent Research and Safety Standard Updates / V. Markovic // 2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2021 – Proceedings : 15, Virtual, Nis, 20–22 октября 2021 года. – Virtual, Nis, 2021. – P. 359-365. – DOI 10.1109/TELSIKS52058.2021.9606262.
9. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) / G. Ziegelberger, R. Croft, M. Feychting [et al.] // Health Physics. – 2020. – Vol. 118. – № 5. – P. 483-524. – DOI 10.1097/HP.0000000000001210.
10. Соловской, А. С. Визуализация степени нагрева биологических тканей в условиях воздействия микроволнового электромагнитного излучения / А. С. Соловской // Экологические проблемы региона и пути их разрешения : Материалы XVI Международной научно-практической конференции, Омск, 12–13 мая 2022 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 120-124.

11. Калганова, С. Г. Численное моделирование электротехнологических процессов с применением программного пакета COMSOL Multiphysics / С. Г. Калганова, Ю. С. Архангельский, С. В. Тригорлый, В. В. Захаров // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 2 (15). – С. 34-42.

12. Будько, А. А. Моделирование статических электромагнитных полей и расчет параметров в COMSOL MULTIPHYSICS / А. А. Будько, О. В. Васильева // Научное обозрение. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 91.

13. Шерстюков, С. А. Моделирование квадратурного фазового модулятора на базе балансных модуляторов в квадратурных каналах с цифровыми функциональными преобразователями в режиме гармонического модулирующего воздействия / С. А. Шерстюков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 8. – С. 113-118.

## VISUALIZATION OF THE ABSORBED DOSE POWER DISTRIBUTION BY THE BIOLOGICAL OBJECTS AS A RESULT OF EXPOSURE TO MICROWAVE ELECTROMAGNETIC RADIATION

A. S. Solovskoy, postgraduate student  
e-mail: solovskoyas@mail.ru  
Polzunov Altai State Technical University

Intensive use of technical innovations has determined the growth of epidemiological studies aimed at studying the effect of electromagnetic radiation on the human body. The author analyzes studies proving the negative effect of radiation on the human nervous system. The relevance of monitoring the intensity of electromagnetic radiation based on the calculation of the specific absorbed power (SAR) is presented. Simulation of the absorbed power level has been carried out in the COMSOL Multiphysics software environment. The general logic of constructing the studied model has been considered. The results of the inhomogeneous distribution of the dielectric constant, the distribution of the electric field and the specific absorbed power are presented.

Keywords: electromagnetic field, microwave radiation, specific absorbed power, SAR, biological objects, finite element method, computer visualization.