

Выбор оптимальных частот для неинвазивной локальной СВЧ-гипертермии

Показано, что эффективность СВЧ-нагрева биологических тканей можно существенно улучшить, если расширить список частот, разрешенных для применения в медицинских процедурах. Приведен пример проектирования СВЧ-излучателя для гипертермии коленного сустава на частоте 650 МГц.

Ключевые слова: СВЧ-гипертермия, резонансное поглощение энергии, СВЧ-излучатель

Введение. Процедура СВЧ-гипертермии основана на контролируемом нагреве опухоли до температур 42-44 °С, что позволяет в сочетании с лучевой терапией существенно повысить эффективность лечения [1]. Наиболее щадящим для пациента вариантом является локальная неинвазивная СВЧ-гипертермия, которая предполагает применение внешнего излучателя-аппликатора, фокусирующего излучение в область опухоли при минимальном облучении окружающих тканей. Однако этот вид гипертермии пока не находит широкого применения в онкологии. В значительной мере это вызвано трудностью фокусировки электромагнитных волн во внутренних участках тела. Действительно, из-за сильного затухания электромагнитных волн в биологических тканях поверхностные ткани нагреваются значительно сильнее, чем внутренние.

В данной статье в качестве объектов гипертермии рассмотрены суставы конечностей. При этом целесообразно использовать излучатель цилиндрической формы, охватывающий сустав, что позволяет получить фокальное пятно в его центральной части. Однако и в этом случае мощность, поглощаемая в суставе, а значит и скорость роста температуры в нем, оказывается значительно меньше, чем в коже. Это объясняется тем, что у костной ткани удельная электропроводность на порядок меньше, чем у кожи.

Цель настоящей статьи – показать, что за счет оптимального выбора рабочей частоты, можно существенно повысить долю поглощаемой в суставе мощности.

Такая возможность основана на известном в теории дифракции явлении резонансного поглощения энергии: при падении волны на объект поглощение энергии волны возрастает, когда частота волны приближается к собственной частоте объекта. Применительно к объектам сложной структуры, каким является тело человека, это явление до настоящего времени не исследовалось.

Приближенный выбор оптимальной частоты. Для оценки резонансных частот нами проводилось аналитическое решение двумерной электродинамической задачи для упрощенной модели облучаемого объекта (конечности в области сустава). Модель представляет собой цилиндр, образованный из трех частей: внутреннего цилиндра, состоящего из костной ткани, и двух слоев, один из которых моделирует кожный покров, другой - охлаждающую водную прокладку. Излучатель образован из двух цилиндрических сегментов, соосных с облучаемым объектом и расположенных напротив друг друга по обе стороны от объекта. Электрический ток на поверхности излучателя синфазный и направлен

вдоль оси цилиндров.

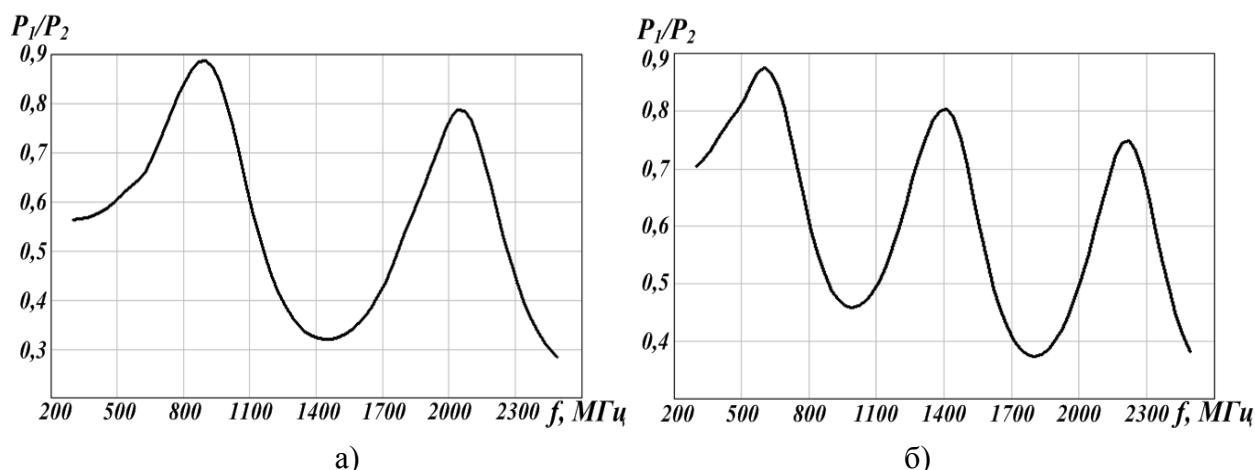


Рисунок 1. Частотная зависимость поглощенной в костной ткани мощности, отнесенной к общей поглощенной мощности: а – для локтевого сустава; б - для коленного сустава

Для расчетов была составлена программа в среде Mathcad, причем использовалась версия 15, позволяющая вычислять цилиндрические функции комплексного аргумента. В результате расчетов было получено, что частотная зависимость мощности, поглощаемой в костной ткани, имеет резонансный характер (рис. 1). Значения резонансных частот соответствуют корням функции Бесселя нулевого порядка: $J_0(kR) = 0$, где $k = 2\pi\sqrt{\varepsilon} / \lambda$; λ – длина волны в вакууме; R – радиус внутреннего цилиндра; ε – диэлектрическая проницаемость костной ткани. Первый корень функции J_0 равен 2,4 [2], тогда из равенства $kR=2,4$ получим оценку для наименьшей резонансной частоты:

$$f_r = \frac{1,15 \cdot 10^5}{R\sqrt{\varepsilon}}, \text{ МГц}, \quad (1)$$

где R выражается в миллиметрах. На указанной частоте объемная плотность поглощенной мощности максимальна в центре объекта и монотонно убывает до нуля к его краям. Учтем, что $\varepsilon \approx 8,5$, а среднее значение радиуса локтевого сустава $R=43$ мм, тогда из (1) получим приближенное значение оптимальной частоты: $f_r = 917$ МГц.

Следует иметь в виду, что в настоящее время для медицинских аппаратов выделены три частоты: 433; 915 и 2450 МГц. Таким образом, для локтевого сустава разрешенная частота 915 МГц близка к оптимальной. Данный резонанс является низкодобротными и поэтому не критичен к изменению размеров объекта: для возможных размеров локтевого сустава взрослых пациентов ($R=38\dots48$ мм) в костной ткани поглощается более 70% мощности (остальная часть мощности поглощается в коже и водной прокладке).

Описание СВЧ-излучателя, предназначенного для нагрева локтевого сустава, приведено в [3]. Ниже мы приведем аналогичные результаты для коленного сустава.

Проектирование СВЧ-излучателя для коленного сустава проводилось с помощью стандартного программного обеспечения, предназначенного для численного решения граничных задач электродинамики методом конечных интегралов. На рисунке 2 представлена компьютерная модель облучаемой части конечности в продольном разрезе.

Модель выполнена с учетом анатомических особенностей сустава и состоит из четырех слоев: 1 – кожа, 2 - жир, 3 – мышечная ткань, 4 - костная ткань. Толщина кожи составляет 3 мм, жира – 5 мм.

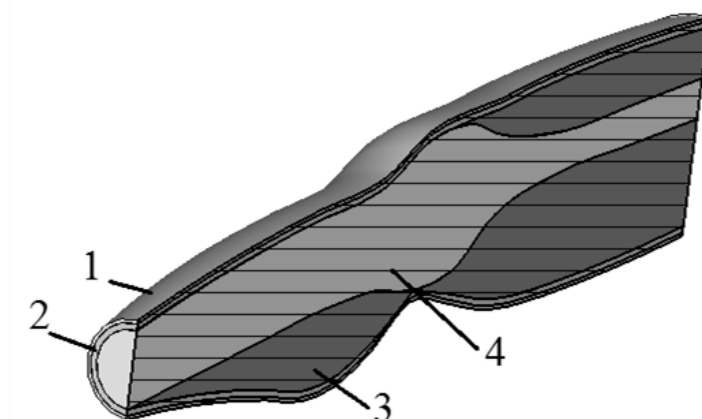


Рисунок 2. Компьютерная модель ноги в области коленного сустава

На первом этапе проектирования моделировался процесс двухстороннего облучения объекта плоской волной при различных частотах. Выбиралась частота, при которой объемная плотность поглощаемой мощности в центральной части объекта максимальна при фиксированной мощности падающей волны. В данном случае получено значение оптимальной рабочей частоты 650 МГц, что подтверждает приближенную формулу (1). Электрофизические параметры тканей на полученной частоте приведены в таблице 1 в соответствии с [4].

Таблица 1

Электрофизические параметры тканей на частоте 650 МГц

Ткань	Диэлектрическая проницаемость	Электропроводность, См/м
Кожа	45	0,95
Жир	6	0,067
Мышцы	52,5	1,31
Костная ткань	13	0,11
Дистиллированная вода	74,45	0,053

На рисунке 3 представлено распределение удельной поглощаемой мощности в плоскости, проходящей вдоль конечности по середине сустава при частоте падающей волны 433 МГц и при частоте 650 МГц. Как видно, поглощаемая мощность в центре сустава на частоте 650 МГц в 2,4 раза больше. Интенсивность выражена согласно приведенной цветовой шкале.

На втором этапе для выбранной частоты, равной 650 МГц, выбиралась геометрия излучателя, его размеры и расположение относительно облучаемого объекта, исходя из следующих требований: поглощаемая мощность в центре сустава максимальна; в слое кожи отсутствуют «горячие пятна»; на входе излучателя $KCB < 1,6$.

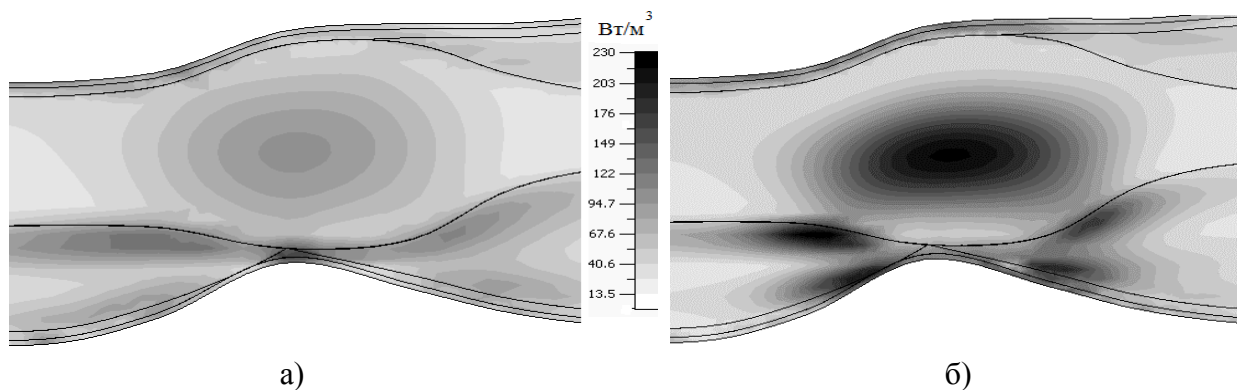


Рисунок 3. Распределение удельной поглощаемой мощности в продольном сечении сустава при облучении плоской волной: а – 433 МГц; б – 650 МГц

Излучатель состоит из двух антенн (рис. 4). Каждая антенна состоит из излучающего 1 и экранного 2 проводников, выполненных из медного листа в виде части цилиндрической поверхности. Длина экранного проводника 188 мм, излучающего проводника 176 мм. Угловой раскрыв экрана $77,8^\circ$, излучающего проводника $35,2^\circ$. Расстояние между экраном и излучателем равно 8 мм.

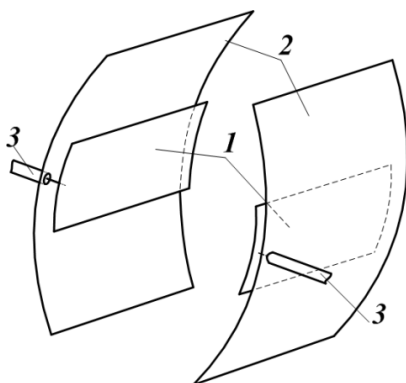


Рисунок 4. Схематическое изображение излучателя

В рабочем режиме антенны расположены напротив друг друга по обе стороны от облучаемого объекта (конечности в области сустава). Между каждой антенной и объектом находятся водные прокладки толщиной 5 мм. Длина каждой прокладки 300 мм, угловой раскрыв 108° . Антенны возбуждаются коаксиальными кабелями 3, центральные проводники которых соединены с излучающими электродами, а оплетки – с экранными проводниками. Каждый кабель на другом конце подключен к общему генератору через делитель. Входное сопротивление каждой антенны 50 Ом. Рассчитанное значение КСВ в полосе частот 640-660 МГц не превышает 1,6.

На рисунке 5 приведены рассчитанные распределения удельной поглощаемой мощности в двух продольных взаимно ортогональных сечениях сустава. Мощность, подаваемая от генератора, равна 1 Вт.

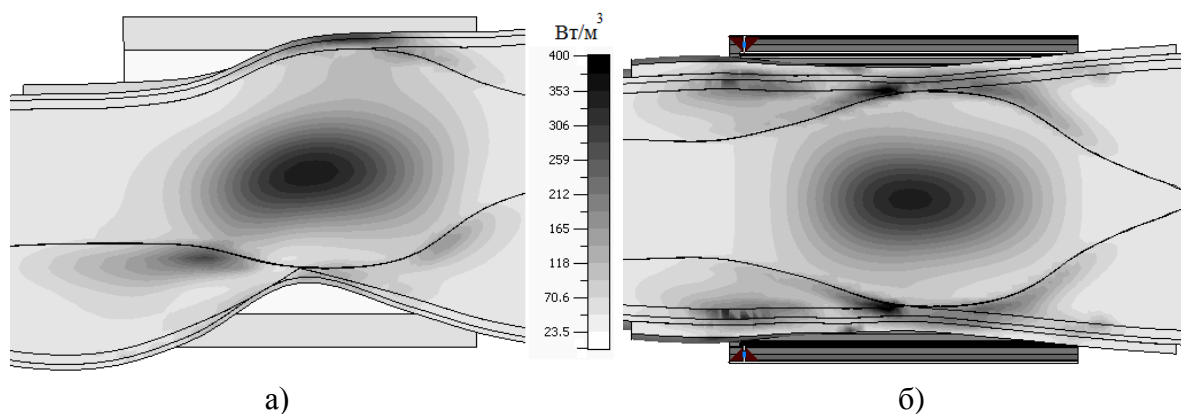


Рисунок 5. Распределение удельной поглощаемой мощности в продольных сечениях, проходящих через середину сустава, при облучении излучателем, показанным на рис. 4, на частоте 650 МГц.

Выводы. Результаты расчетов показывают, что оптимальный выбор рабочих частот при СВЧ-гипертермии сустава позволяет повысить долю мощности, поглощаемой в костной ткани сустава, и уменьшить нежелательный нагрев кожных покровов.

Библиографический список

1. Гельвич Э.А. Аппаратура для одновременного воздействия ионизирующего излучения и гипертермии на опухоль/ Э.А. Гельвич, Е.А. Крамер-Агеев, В.Н. Мазохин, Н.Н. Могиленец // – Медицинская физика. – 2009. – № 3. – С.30-35.
2. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский // – Москва: Наука. 1989.
3. Турыгин С.В. Микроволновый аппликатор для нагрева суставов конечностей / С.В. Турыгин, В.А. Яцкевич // Вузовская наука – региону: материалы XII Всероссийской научно-техн. конф., 25 февр. 2014 г. / ВоГУ. – Вологда, 2014. – С. 31 – 34.
4. Березовский В.А. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. / В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов // – Киев: Наукова думка. – 1990. – 224 с.