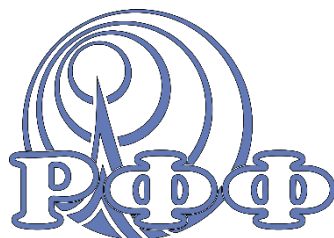




Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



9-я Международная научно-практическая конференция
Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2021

Сборник трудов конференции

при поддержке:



20-22 октября 2021 года
г. Томск

Качественная оценка температурного распределения в трехслойной среде, имитирующей биоткани человека, при тепловом воздействии СВЧ поля

Смыгалина Полина Павловна

Дунаевский Григорий Ефимович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: psmlygalina@gmail.com

Согласно статистике, отморожения конечностей составляют до 10% травматических случаев. Особую актуальность проблема лечения холодовой травмы имеет в России, поскольку низкие температуры в зимнее время характерны для большинства российских регионов, а на территории Крайнего Севера низкие температуры сохраняются большую часть календарного года. Одним из методов лечения данного заболевания является нагрев конечностей с помощью электромагнитных волн сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. За счет проникающего действия СВЧ поля и эндогенно образующегося при этом тепла становится возможным разогрев не только поверхности отогреваемой конечности, но и глубинных областей [1]. Однако известные аппараты для СВЧ нагрева имеют следующий недостаток: из-за сильного затухания электромагнитной волны в биологических тканях поверхностные ткани нагреваются сильнее, чем внутренние [2]. Поэтому представляет интерес математически описать процесс нагрева для того, чтобы более эффективного проведения процедуру СВЧ терапии при холодовой травме.

В данной работе рассматривается одномерная задача прохождения СВЧ поля в среду, имитирующую своими характеристиками биоткани человека, и задача теплопроводности в данной среде вследствие теплового воздействия СВЧ поля. Решение задачи теплопроводности позволяет не только рассчитать стационарное температурное поле, тепловые потоки и средние значения температур отдельных элементов системы, но и определить характер изменения, профили температур в отдельных точках системы, найти оптимальные параметры и составить схему регулирования температуры. Проведено рассмотрение температурного поля при различных частотах СВЧ нагрева, при различных условиях на границе слоя и для различного состава слоя. В частности, проведено сравнение однослойной модели, обладающей свойствами мышечной ткани, и модели, включающей в себя три слоя: мышечная-костная-мышечная ткани.

Для проведения моделирования была использована САПР MATHCAD 15. Решенное в ходе моделирования уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{C_p} q_{CBЧ}(z) \quad (1)$$

Как было указано ранее, рассмотрено два типа граничных условий: условие первого типа (2), относящиеся к задаче, когда температура на границе раздела сред поддерживается постоянной, и условие третьего типа (3), относящиеся к задаче, когда на границе раздела сред существует свободная конвекция воздуха:

$$\begin{aligned} t = 0 : T(z, 0) &= T_0; \\ z = 0 : T_z(0, t) &= T_{вн}, \\ z = Z : T_z(Z, t) &= T_{вн} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t = 0 : T(z, 0) &= T_0; \\ z = 0 : T_z(0, t) &= \frac{h}{k} (T(0, t) - T_{вн}), \\ z = Z : T_z(Z, t) &= -\frac{h}{k} (T(0, t) - T_{вн}) \end{aligned} \quad (3)$$

В приведенном выше уравнении $D = \frac{k}{C_p}$ – коэффициент температуропроводности, h – коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплоотдачи при известном значении разности температур. В качестве внешней среды в рассматриваемых задачах выбран воздух, коэффициент теплоотдачи h выбран равным $25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$.

Объемная мощность излучаемого СВЧ поля описывается в данной работе следующим образом:

$$q_{CBЧ}(z) = \frac{1}{2} \sigma E(z)^2 = \frac{1}{2} \sigma E_0^2 \left(e^{-\frac{z}{\delta}} + e^{\frac{z-Z}{\delta}} \right)^2 \quad (4)$$

где σ – удельная электропроводность, δ – глубина проникновения волны, E_0 – амплитуда напряженности электрического поля. В данном моделировании напряженность поля равна $E_0 = 600 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

При построении математических моделей биотканей человека используются обобщенные значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ , удельной электропроводности σ и глубины проникновения волны δ . Также для описания непосредственно процесса теплопередачи необходимо знание таких параметров как плотность ρ , теплоемкость C и теплопроводность k материала. Значения вышеперечисленных параметров приведены в таблице 1 [2-4].

Таблица 1 – Физические характеристики костной и мышечной тканей человека

Наименование ткани	f , МГц	ϵ	σ , См/м	δ , см	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг · °C)	k , Вт/(м · °C)
Мышечная	433	45,8	0,71	2,80	1040..1091	3300..3600	0,44..0,58
	915	41,4	0,87	1,80			
	2450	38,0	1,46	0,84			
Костная	433	13,0	0,09	7,9	1990	2238	0,36
	915	12,5	0,14	4,4			
	2450	11,4	0,40	1,6			

Значения использованных в ходе моделирования электрофизических параметров соответствуют приведенным в таблице 1. Теплофизические характеристики мышечной и костной тканей соответственно выбраны следующими:

$$C_m = 3500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; \rho_m = 1041 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; k_m = 0,49 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}; C_k = 2238 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}; \rho_k = 1990 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; k_k = 0,36 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Начальное значение температуры внешней среды $T_{\text{вн}} = 25^\circ\text{C}$. Начальная температура всего слоя $T_0 = 10^\circ\text{C}$ – температура холодовой травмы. Рассматриваемый пространственный интервал $Z = 8$ см. В трёхслойной модели толщина мышечного слоя 1,6 см, толщина костного слоя – 4,8 см. Рассматриваемый временной интервал $\tau = 30$ мин. Шаг разбиения по пространственной координате $\Delta z = 0,2$ мм, шаг разбиения по времени $\Delta t = 1$ с.

На рисунке 1 представлена картина температурного распределения для трех различных частот при условии постоянства температуры внешней среды. Аналогично для задачи при свободной конвекции воздуха на границе температурное распределение представлено на рисунке 2. Горизонтальной пунктирной линией обозначен уровень 15°C – температура, при которой происходит открытие кровеносных сосудов. Вертикальным пунктиром обозначена граница между мышечной и костной тканями в трехслойной модели. На рисунках линией с кружками обозначено температурное распределение, полученное при рассмотрении однослойной задачи, линией с крестами – трехслойной.

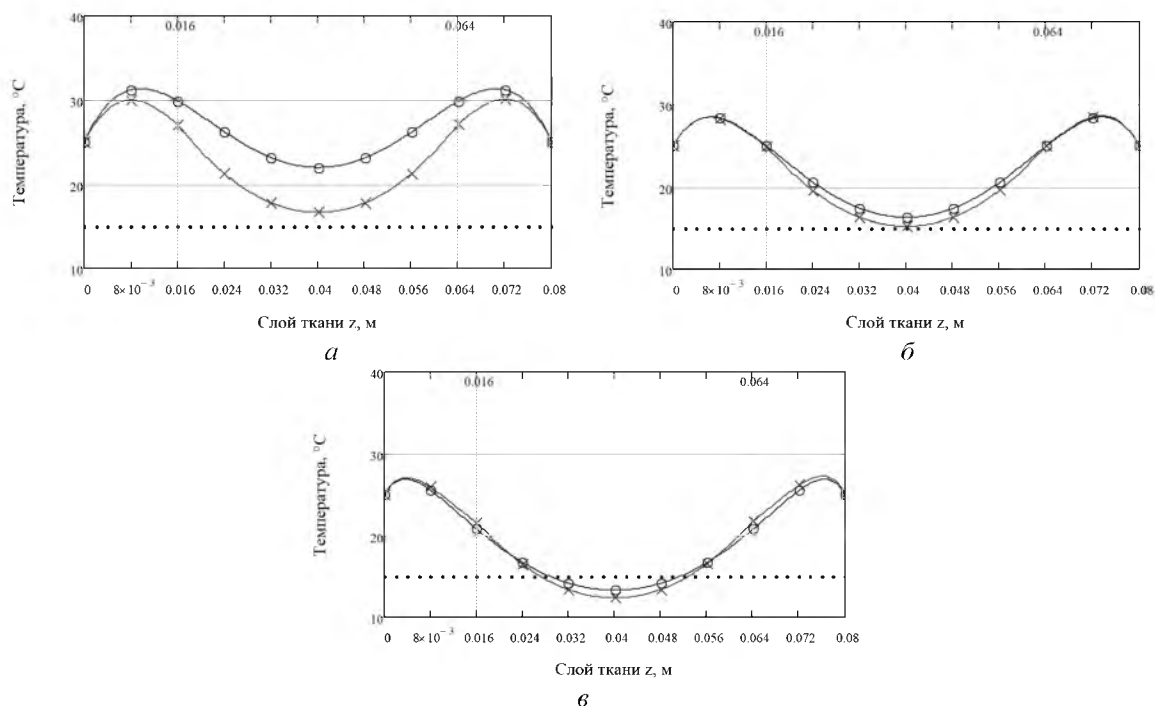


Рис.1 Температурное распределение при фиксированной температуре внешней среды при воздействии поля частотой а) 433 МГц; б) 915 МГц; в) 2450 МГц

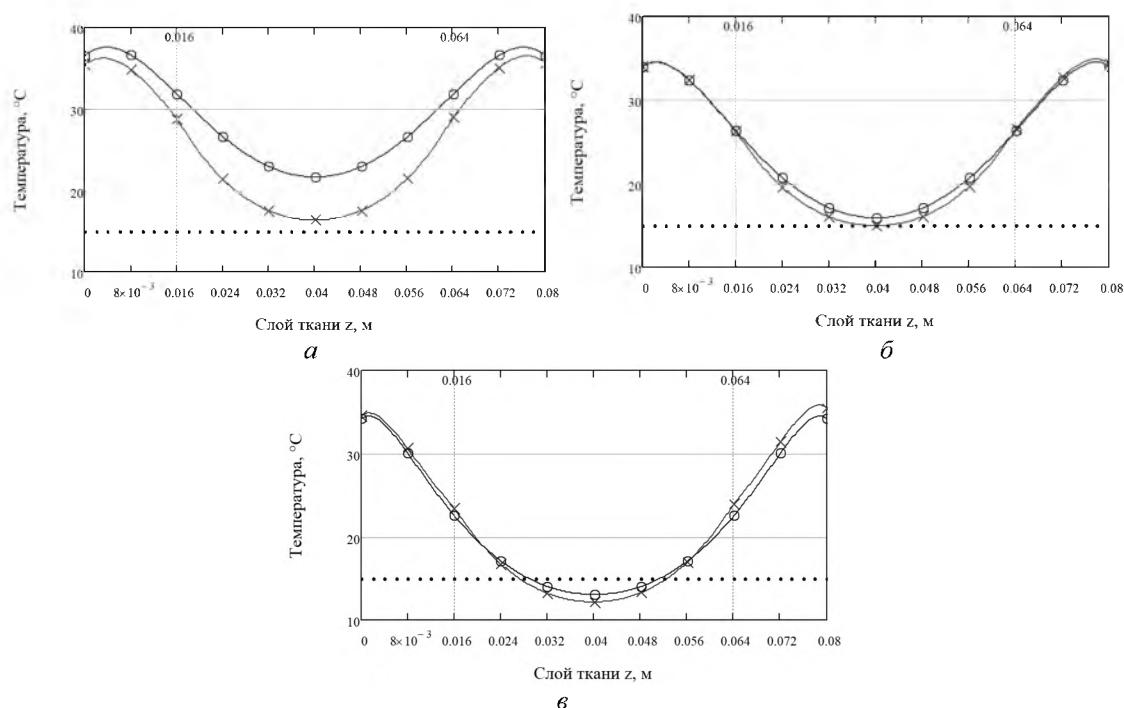


Рис.2 Температурное распределение при свободной конвекции воздуха на границе при воздействии поля частотой а) 433 МГц; б) 915 МГц; в) 2450 МГц

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что учет костного слоя приводит к значительному изменению температурного поля по сравнению с однослойной моделью для частоты 433 МГц. В этом случае максимальная разность температур наблюдается в центре слоя и достигает 5,4°C. Причем в трехслойной модели температура в глубине слоя ниже. Этот результат можно объяснить тем, что коэффициент температуропроводности D костной ткани меньше, чем для мышечной – поэтому процесс теплопередачи происходит медленнее. Кроме того, за счет малой глубины проникновения СВЧ поля в мышечной ткани наблюдается сильное затухание волны. Для больших частот температурное различие вовсе незначительно – максимальная разность температур достигает лишь 1°C. Несмотря на это можно сделать вывод, что учёт костного слоя необходим для повышения достоверности модели.

Помимо этого, учёт различных граничных условий прекрасно демонстрирует следующее: обдув теплым воздухом поверхности нагреваемого объекта при проведении сеанса СВЧ-отогрева позволяет избежать перегрева приповерхностных областей. Однако при таком подходе утрачивается возможность динамического мониторинга температуры поверхности, по которой можно приближенно предсказать тепловое распределение внутри конечности по её температуре на поверхности [5].

Список публикаций:

- [1] Горелик. И.Э. // Профилактика некроза при отморожениях конечностей в дореактивном и раннем реактивном периодах. Горелик Игорь Эрнстович: автореферат дис. ... канд. мед. наук : 14.00.27, 14.00.16. ГОУ ВПО Томский военномед. ин-т. Кемерово, 2010. С. 23
- [2] Турыгин С.В. Излучатель для СВЧ-нагрева тканей тела человека / С.В. Турыгин, В.А. Яцкевич // Антенны. 2014. №3. С. 49-54.
- [3] Березовский В.А. Биофизические характеристики тканей человека: справочник / В.А. Березовский, Н.Н. Колотков, П.Г. Костюк. – Киев: Наукова думка, 1990. – 224с.
- [4] Christ A. // The Dependence of Electromagnetic Far-Field Absorption on Body Tissue Composition in the Frequency Range from 300 MHz to 6 GHz / A. Christ, A. Klingeböck, T. Samaras, C. Goiceanu, N. Kuster // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54(5). – P. 2188–2195.
- [5] Nechaev A.V. // Monitoring of the process of microwave heating of frostbite by the IR sensor in the beyond-limit waveguide / A.N. Nechaev, I.A. Perveev, P.P. Smygalina, G.E. Dunaevskiy // Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, Proc. of SPIE 2020, V. 11582, 115820R.