

УДК 615.84.03

А.Р. КОРСУНОВ

Украинская инженерно-педагогическая академия, Украина

СПЕЦИФИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА БИООБЪЕКТЫ, РАСПОЛОЖЕННЫЕ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрена некоторая специфика излучения серийных аппаратов сверхвысокочастотной электротермии и информационной диагностики с учётом структуры электромагнитного поля, формируемого при сеансах облучения.

излучение, электромагнитная энергия, ближняя зона, электротермия, облучатель, рецептор, биообъект

Введение

Антенны, выполняя функции излучения и приема электромагнитной энергии, обеспечивают требуемое распределение плотности энергии излучения в пространстве. При этом решается ряд важных технических задач, в том числе степень локализации электромагнитного воздействия на биообъекты.

В процессе облучения биообъектов ставится задача не только учесть интенсивность воздействия, но и структуру электромагнитного излучения (ЭМИ). Это позволит методически точнее оценить место локализации ЭМИ на биоструктуре и механизм самого воздействия на состояние тканей и органов.

Анализ публикаций. В современной литературе воздействие ЭМИ на биообъекты рассматривается и как процесс гипертермии [1], и как процесс информационного воздействия [2]. При этом используются средства теоретического моделирования распределения температуры в заданной области гипертермии [3] и экспериментальные модели, на которых имитируются отдельные свойства биоструктур [4]. Так в [5] предусматривается, что распределение поля в биообъекте формируется излучением плоского круглого электрода. Поглощение электромагнитного поля тканями тела пациента ведёт к тепловыделению в объёме тела, описываемого биотепловым уравнением. Решение

обратной задачи, которая заключается в выборе системы электромагнитного нагрева получается путем накопления данных, полученных при многократной прогонке программы решения прямой задачи. В работе [6] предлагается базовый образец фантома, солевой состав которого должен обеспечивать в целом тот же эффект распространения в нём электромагнитных и тепловых полей, что и в теле пациента. При этом используются дисковые электроды диаметром 130 мм. Таким образом анализ показывает, что хорошо разработан модельный ряд ВЧ гипертермии, но в меньшей степени исследованы вопросы формирования непосредственной структуры и характера поля в месте его локализации при воздействии на биообъект.

Цель статьи. За последнее десятилетие получили большое распространение естественные и искусственные физические средства активизации механизмов повышения устойчивости организмов. К ним, в частности, относится и сочетанные электро- и магнитометоды.

В связи с этим особенно важно с необходимой точностью формировать характеристики сигналов, воздействующих на биообъекты, что позволит корректно определять соответствующие методики активизации биологических ресурсов.

Формирование структуры ЭМИ у биообъекта

Электрические и магнитные сигналы переносятся к рецептору (биообъекту) электромагнитным и кондуктивным (гальваническим) путём. При этом электрическими излучателями являются цепи с большим сопротивлением, высоким напряжением и малым током, а магнитными излучателями – цепи с низким сопротивлением, большим током и малым перепадом напряжения.

Физические свойства электромагнитного поля различны в дальней и ближней зонах. В [7] показано, что в дальней волновой зоне при расстоянии $r \gg \lambda_0/2\pi$ структура поля элементарного электрического излучателя совпадает со структурой поля однородной плоской электромагнитной волны, в которой в любой точке пространства векторы напряжённости \vec{E} и \vec{H} синфазны, перпендикулярны друг к другу и к направлению излучения. При прочих равных условиях интенсивность электромагнитного поля в дальней зоне увеличивается пропорционально с частотой и уменьшается обратно пропорционально с расстоянием.

Для элементарного электрического излучателя электромагнитное поле определяется выражениями из решений уравнений Максвелла в полярных координатах:

$$H_\varphi = i \frac{Ik^2}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - i \left(\frac{1}{kr} \right)^2 \right] \sin \theta e^{-ikr};$$

$$E_r = \frac{Ik^3}{2\pi\omega\epsilon_a} \left[\left(\frac{1}{kr} \right)^2 - i \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right] \cos \theta e^{-ikr};$$

$$E_\theta = i \frac{Ik^3}{4\pi\omega\epsilon_a} \left[\frac{1}{kr} - i \left(\frac{1}{kr} \right)^2 - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right] \sin \theta e^{-ikr},$$

где I – амплитуда возбуждающего тока электрического излучателя; l – длина излучателя; $k = i\omega\sqrt{\epsilon_a\mu_a}$ – волновое число или коэффициент распространения плоской волны; r – расстояние от излучателя до точки наблюдения.

Для дальней зоны можно пренебречь $(1/kr)^2$ и

$(1/kr)^3$, тогда получим:

$$E_\theta = -\frac{iIl}{2\lambda_0 r} Z_c \sin \theta e^{-ikr}; \quad H_\varphi = \frac{iIl}{2\lambda_0 r} \sin \theta e^{-ikr}.$$

В ближней зоне на расстоянии $r \ll \lambda_0/2\pi$ отсутствует излучение, так как электромагнитное поле носит квазистационарный характер. Для элементарного электрического излучателя выражение для электромагнитного поля примет следующий вид:

$$E_r = -iIl \cos \theta / 2\pi\omega\epsilon_a r^3; \quad E_\theta = -iIl \sin \theta / 4\pi\omega\epsilon_a r^3;$$

$$H_\varphi = Il \sin \theta / 4\pi r^2.$$

Отсюда следует:

1. Поля ближней зоны электрического излучателя существенно неравномерны, а их интенсивность быстро убывает с расстоянием.

2. Составляющие напряженности электрического и магнитного полей в ближней зоне сдвинуты по фазе на 90° . Поэтому вектор Пойтинга оказывается чисто мнимой величиной со средним значением, равным нулю. Следовательно рассматриваемые поля являются реактивными. В результате перенос сигнала в ближней зоне происходит за счёт явления электрической и магнитной индукции.

Структурирование параметров ЭМИ при облучении

Итак, характеристики поля в ближней и дальней зоне существенно разнятся, а значит, их воздействие на биоструктуры носит различный характер.

Например, возьмем стандартную процедуру сверхвысокочастотного электровоздействия в лечебных целях. Здесь применяются электромагнитные волны дециметрового (ДМВ) от 100 до 10 см и сантиметрового (СМВ) от 10 до 1 см диапазонов. Особенностью анализа в ближней зоне является учёт практически существующих отдельно электрических и магнитных полей и возможности применения более простых методов теории. Современные серийные аппараты для ДМВ и СМВ воздействия на биообъекты («Ранет», «Луч») в

большинстве случаев работают либо в ближней зоне электромагнитного поля ($r < \lambda_0/2\pi$), либо используется контактный способ. В результате общая эффективность поглощения энергии биотканями определяется суммой поглощения (затухания) энергии в толще ткани A_n , отражения энергии от границ раздела внешняя среда – биоткань A_0 и многократных внутренних отражений A_m :

$$A = A_n + A_m + A_0$$

или [8]

$$A = 8,68\alpha d + 20 \lg \left| \frac{(Z_{c1} + Z_{c2})^2}{4Z_{c1}Z_{c2}} \right| + 20 \lg \left| 1 - \frac{(Z_{c1} - Z_{c2})^2}{Z_{c1} + Z_{c2}} \right| e^{-2\alpha d},$$

где Z_{c1} , Z_{c2} – характеристическое сопротивление внешней среды и внутренней среды; d – глубина слоя поглощения энергии; α – коэффициент затухания.

В области высоких частот, за счёт большого отражения электромагнитной энергии плоская форма биоструктуры обладает большой отражающей способностью по сравнению с цилиндрической (на 6 дБ) и сферической (на 9,5 дБ) поверхностью биоструктуры.

Электропроводность отдельных участков биоструктур, находящихся между электродами, наложенными непосредственно на поверхность тела, существенно зависит от сопротивления кожи и подкожных слоев. Внутри организма ток распространяется в основном по кровеносным и лимфатическим сосудам, мышцам, оболочкам нервных стволов.

Биологические жидкости являются электролитами, электропроводимость которых имеет сходство с электропроводимостью металлов: в обоих средах в отличие от газов носители тока существуют независимо от электрического поля.

Известно соотношение для удельной проводимости электролитов

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = nq\alpha(b_+ + b_-),$$

где ρ – удельное сопротивление; n – концентрация зарядов; q – величина заряда; α – коэффициент диссоциации; b_+ , b_- – подвижность положительных и отрицательных зарядов соответственно.

Электропроводимость тканей и органов под действием электрического поля в ближней зоне зависит от их функционального состояния и может быть использована как диагностический показатель. В частности, воздействие на биологически активные точки (БАТ) [9]. Так, например, при воспалении, когда клетки набухают, уменьшается сечение межклеточных соединений и, соответственно, увеличивается электрическое сопротивление. В табл. 1 приведено удельное сопротивление различных тканей и жидкостей организма.

Таблица 1

Удельное сопротивление некоторых тканей и жидкостей человеческого организма

№ п/п	Наименование	ρ , Ом·см
1	Спинномозговая жидкость	0,55
2	Кровь	1,66
3	Мышцы	2
4	Ткань мозговая и нервная	14,3
5	Ткань жировая	33,3
6	Кожа сухая	10^5
7	Кость без надкостницы	10^7

Наличие биологических мембран в организме ведёт к тому что он обладает ёмкостными свойствами. В результате в ближней зоне электрического поля импеданс тканей определяется в частности омическим и ёмкостным сопротивлениями. Это подтверждается тем, что сила тока опережает по фазе приложенное к биоструктуре напряжение. В табл. 2 приведены некоторые значения угла сдвига фаз, полученные для разных биологических объектов.

Таблица 2

Значение угла сдвига фаз между током и напряжением для разных биообъектов

№ п/п	Наименование биообъекта	Значение сдвига фаз, град
1	Кожа человека, лягушки	55
2	Нерв лягушки	64
3	Мышца кролика	65

К рассмотренному необходимо добавить ещё одну специфическую особенность ЭМП в «ближней зоне», где, как указывалось, векторы \vec{E} и \vec{H} сдвинуты по фазе на $\Delta\varphi \approx 90^\circ$. При этом возникают узлы и пучности в распределении поля \vec{E} . Само распределение может быть выражено соотношением [10]:

$$E = \frac{k^2}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{X}{k^2 r^3} - j \frac{X}{kr^2} - \xi \frac{1}{r} \right] e^{-jkr}.$$

Перепад абсолютных значений может составлять до 10 дБ по мощности.

Заключение

В ближней зоне поле электрического излучателя воздействует на ионы биологических систем и вызывает ток проводимости. Это приводит к нагреванию вещества. На границе тканей с высоким и низким содержанием воды могут возникнуть стоячие волны, обуславливая местный перегрев тканей. Наиболее подвержены перегреву ткани с недостаточным кровоснабжением и, следовательно, плохой терморегуляцией, например хрусталик глаза, стекловидное тело и т.п.

Облучение электрическим полем в ближней зоне ведёт к отражению до 75% энергии поля. В результате по мощности излучения генератора невозможно судить об энергии, поглощаемой пациентом в единицу времени. Хотя в аппаратах «Луч», «Ранет» предусмотрена ручная регулировка излучаемой мощности в ваттах, но это не значит, что установленная мощность достигает объекта воздействия.

При контактном облучении электрическое поле носит статический характер (излучатель

соприкасается с излучаемой поверхностью) вся энергия поля переходит в нагрев тканей, но очень неравномерно из-за внутренних переотражений.

Глубина проникновения электрического поля определяется строением тканей, в основном наличием ионов обоих знаков.

Литература

1. Кудрявцев Ю.С., Колмыков А.В. Теоретическое моделирование температуры при электромагнитной гипертермии опухолей // Мед. радиология. – 1990. – № 2. – С. 3 – 8.
2. Темуриянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. – К.: Наук. думка, 1992. – 187 с.
3. Вопросы теории гипертермии глубоколокализованных опухолей / Л.А. Поспелов, С.И. Мельник. – Х., 1994. – 19 с. – Деп. В ГНТБ Украины 17.10.94. 32014 – Ук 94.
4. Исмаилов Э.М. Биофизическое воздействие СВЧ излучений. – М.: Медицина, 1987. – 195 с.
5. Поспелов Л.А., Мельник С.И. и др. Моделирование ВЧ гипертермии и алгоритм управления лечебной процедурой // Технология приборостроения. – 2002. – № 2. – С. 30 – 33.
6. Поспелов Л.А., Мельник С.И., Олейник И.В. Фантомные исследования и разработки для ВЧ-гипертермии // Радиотехника. – Х.: ХНУРЭ. – 2003. – Вып. 131. – С. 202 – 204.
7. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
8. Корсунов А.Р., Сахацкий В.Д. Дистанционное облучение электромагнитным полем биообъекта – альтернатива методу контактного воздействия // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 6. – С. 111 – 117.
9. Корсунов А.Р. Методика формирования сигналов нейростимуляции в общем пространстве

средств сочетанного електромагнитного воздействия на биообъекты // Вестник НТУ ХПИ. Информатика и моделирование. – Х.: НТУ ХПИ. – 2004. – № 46. – С. 106 – 110.

10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 1991. – 471 с.

Поступила в редакцию 25.04.05

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Сахацкий, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.