

Л. И. НЕТИКОВА

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО АБОНЕНТСКИМИ СТАНЦИЯМИ, НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Эксплуатация мобильных средств связи приводит к облучению пользователей электромагнитным полем (ЭМП) СВЧ малой мощности, создаваемым абонентскими станциями (АС). Исследования в этой области ведутся с начала 90-х годов. Пока никто не может категорически утверждать о наличии либо отсутствии явного вреда от использования АС. При пользовании АС происходит облучение полями относительно низких уровней. Многочисленные исследования в области биологического действия ЭМП позволили определить наиболее чувствительные системы организма человека: нервную, иммунную, эндокринную и половую. Эти системы являются критическими, и их реакции должны обязательно учитываться при оценке риска воздействия ЭМП на население. Биологический эффект от ЭМП в условиях многолетнего воздействия накапливается, в результате чего возможно проявление отдаленных последствий.

ЭМП характеризуется векторами напряженностей \vec{E} и \vec{H} составляющих его электрического и магнитного полей. Среда, в которую проникает ЭМП, обладает свойствами, оказывающими определенное влияние на распространение в ней этого поля. Из-за малой выраженности в СВЧ-диапазоне магнитных свойств биологических тканей рассмотрим только электрофизические свойства тканей человека.

Под воздействием ЭМП в тканях возникает два типа чисто физических эффектов, определяющих диэлектрические свойства. Первый из них заключается в колебании свободных зарядов (ионов), а второй – во вращении дипольных молекул с частотой приложенного ЭМП. Первый эффект приводит к увеличению сил токов проводимости и связанных с электрическим сопротивлением среды потерь энергии, тогда как второй влияет на силы токов смещения и на соответствующие диэлектрические потери, обусловленные вязкостью среды. Оба эффекта определяются характеристиками диэлектрической проницаемости

$$\epsilon = (\epsilon' - j\epsilon''). \quad (1)$$

Здесь ϵ – комплексная диэлектрическая проницаемость биологического объекта (БО); ϵ' – действительная часть диэлектрической проницаемости, $\epsilon' = \epsilon\epsilon_0$, где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума); ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости (коэффициент потерь). Последнюю величину можно рассматривать как фактор, определяющий потери в среде, которые возникают в результате взаимодействия ЭМП со средой. Удельная проводимость среды σ , обусловленная токами проводимости и диэлектрическими потерями, связана с ϵ'' соотношением

$$\epsilon'' = \sigma / \omega, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота поля. Тангенс угла электрических потерь определяется формулой

$$\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon' = \sigma / (\omega\epsilon'). \quad (3)$$

Величина ϵ обладает дисперсией, которая связана с различными релаксационными процессами, сопровождающими эффект поляризации. Электрофизические свойства биологических тканей в СВЧ-диапазоне подробно описаны в работе [1]. В табл. 1 приведены значения основных показателей для тканей человека с разным содержанием воды в зависимости от частоты ЭМП.

Таблица 1

Частота электромагнитного поля, МГц	Электрофизические свойства тканей человека с содержанием воды									
	высоким					низким				
	Диэлектрическая проницаемость	Электропроводность, См/м	Тангенс угла потерь	Длина волны в ткани, см	Глубина проникновения энергии, см	Диэлектрическая проницаемость	Электропроводность, См/м 10^{-3}	Тангенс угла потерь	Длина волны в ткани, см	Глубина проникновения энергии, см
434	53	1,18	0,92	8,76	3,57	5,6	37,9...118	0,36	28,8	26,2
750	52	1,25	0,58	5,34	3,18	5,6	49,8...138	0,24	16,8	23,0
915	51	1,28	0,49	4,46	3,04	5,6	55,6...147	0,25	13,7	17,7
1500	49	1,56	0,38	2,81	2,42	5,6	70,8...171	0,19	8,41	13,9
2450	47	2,17	0,34	1,76	1,70	5,6	96,4...213	0,15	5,21	11,2

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показали, что относительная диэлектрическая проницаемость определяется в основном содержанием воды в канях. При этом биоткани можно разделить на два класса: ткани с высоким и низким содержанием воды.

К тканям с высоким содержанием воды относятся мышцы, кожа, печень, почки, сердце и др.; низким является содержание воды в жире, костном мозге, костной ткани. Содержание воды в крови существенно выше, чем в других тканях, и равно в среднем 83 %. Для сравнения отметим: в тканях мышц млекопитающих около 75 % воды, в почке – 77 %, в белом веществе мозга – 72 %. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости биотканей с высоким содержанием воды определяется параметрами воды. С ростом частоты относительная диэлектрическая проницаемость (рис. 1) и удельное электрическое сопротивление крови (рис. 2) значительно снижаются, о чем свидетельствуют экспериментальные данные [2].

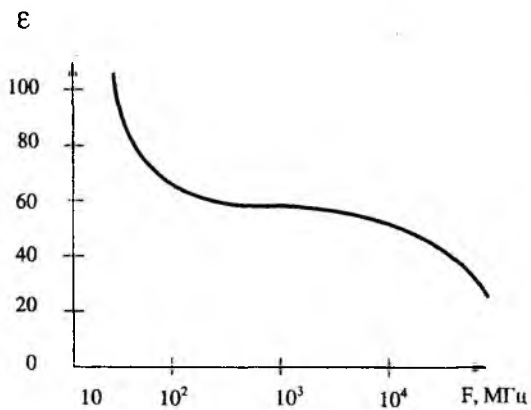


Рис. 1

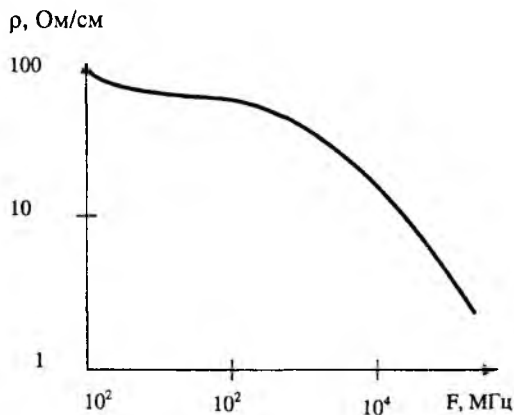


Рис. 2

В тканях с низким содержанием воды относительная диэлектрическая проницаемость зависит от процентного содержания свободной и связанной воды. К последней относится та часть воды, которая соединена с поверхностью макромолекулярных компонент. Ткани с малым содержанием воды обладают на порядок более низкими значениями относительной диэлектрической проницаемости, а частотная зависимость электропроводимости аналогична соответствующей зависимости для тканей с высоким содержанием воды – с ростом частоты электропроводимость повышается. Таким образом, частотные зависимости электрофизических свойств биотканей в СВЧ-диапазоне обусловлены в основном содержанием в них воды, которая находится в тканях в свободном и связанном состояниях. Рассмотренные данные, касающиеся обобщенных электрофизических свойств тканей с высоким и низким содержанием воды, а также рассчитанные исходя из них значения глубины проникновения и длины волны в ткани необходимы для качественных оценок пространственного распределения электромагнитного поля в объеме биотканей.

Диэлектрические свойства тканей играют важную роль при определении доли энергии, прошедшей через границу раздела между двумя тканями и отраженной от этой границы. Эти свойства определяют также количество полной энергии, которая поглотится БО в ЭМП.

При наличии границы, на которой относительная диэлектрическая проницаемость меняется скачком, радиоволны частично отражаются. Характерной структурой поверхностного слоя биоткани является чередование слоев: кожа, жир, мышцы, кости. Кожа и мышцы относятся к тканям с высоким содержанием воды, т. е. с высокой относительной диэлектрической проницаемостью. Для жира и кости характерно примерно на порядок меньшее значение данного показателя. Это приводит к отражениям радиоволн на границах разделов двух тканей. Различие слоев по толщине приводит к вариациям результирующего коэффициента отражения от всего тела.

Если на участке тела толщина поверхностного слоя или нескольких слоев меньше глубины проникновения ЭМП, часть энергии отражается от границ раздела между слоями и появляется максимум отражения из-за стоячих волн. На рис. 3 показано распределение поглощенной мощности для двухслойной модели, согласно которой волна проходит через слой жира в мышечную ткань [3].

Поглощаемая мощность нормирована относительно мощности, поглощаемой на границе жир-мышца. На рис. 3 эта точка соответствует плотности поглощенной мощности $\rho/N = 1$.

Приведенные кривые мало изменяются при незначительном уменьшении толщины z жирового слоя. Налицо явный разрыв значений мощности, поглощенной в мышцах и жировом слое. Нетрудно видеть также, что по мере повышения частоты возрастает уровень максимума стоячей волны в жировой ткани и уменьшается глубина проникновения волны в мышечную ткань.

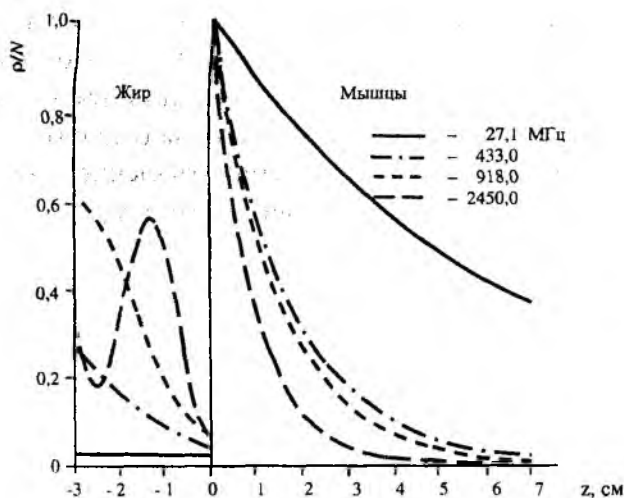


Рис. 3

Для анализа влияния СВЧ-излучения АС на голову человека представляет интерес распределение плотности поглощаемой мощности в слоях подкожного жира, мышечной ткани и кости. На рис. 4 отражены картины распределения плотности поглощаемой мощности при наличии костного слоя для различных частот. Обозначения те же, что и на рис. 3. Представленные данные ясно указывают на то, что поглощение в костной ткани очень незначительно – вследствие сильного отражения и низкой проводимости ткани. На частоте 918 МГц пучность стоячей волны приходится на прилегающий к кости слой мышечной ткани и поэтому можно ожидать значительного нагрева костной ткани за счет притока теплоты из мышечного слоя.

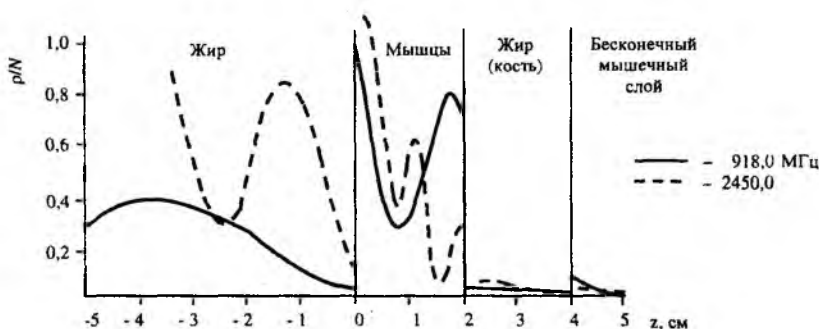


Рис. 4

Уровень поглощаемой мощности ЭМП и ее распределение внутри БО зависят как от плотности потока падающей мощности, так и от электрических свойств образующих БО тканей, формы и размеров объекта. Большое значение имеют при этом ориентация БО в ЭМП, структура и частота ЭМП, наличие отражающих границ (внутри тканей БО), на которых относительная диэлектрическая проницаемость меняется скачком.

Таким образом, рассмотрение основных физических закономерностей взаимодействия ЭМП СВЧ с БО позволяет сделать вывод о сложном характере этого взаимодействия, определяемого, с одной стороны, особенностями строения и неоднородностью свойств БО, а с другой – их зависимостью от параметров ЭМП, главным образом от частоты. Экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследователей [4 – 6] свидетельствуют о высокой биологической активности ЭМП во всех частотных диапазонах. При относительно высоких уровнях облучающего ЭМП очевиден тепловой механизм воздействия. При относительно низком уровне ЭМП (например, для радиочастот выше 300 МГц это менее 1 мВт/см²), который соответствует работе МС, принято предполагать нетепловой или информационный характер воздействия на организм. Механизмы действия ЭМП во втором случае еще мало изучены.

Обычно нормы безопасности для пользователей АС устанавливают предел для плотности потока мощности (в Вт/см² или мВт/см²) либо для так называемого коэффициента удельного поглощения (Specific Absorption Rate – SAR, Вт/кг или мВт/г). При поглощении единицы SAR в течение 20 мин 1 г ткани нагревается на 1 °С. Нагрев тканей не всегда адекватно компенсируется обменными процессами организма.

В работе [6] приведены выборочные данные по четырем стандартам, непосредственно относящиеся к сотовой связи. На их основе нами составлена табл. 2. Первое, что можно констатировать, – это достаточная близость требований разных стандартов. Такое утверждение справедливо не только для SAR, но и для плотности потока мощности, хотя последнее не столь очевидно. Однако если украинскую норму 0,01 мВт/см² пересчитать в соответствии с правилами, принятыми в стандарте США, на интервал усреднения 30 мин, что более соответствует условиям применения сотовой связи, то получим 0,4 мВт/см², а это практически совпадает с 0,5...0,6 мВт/см² стандарта США для диапазона 800...900 МГц.

Второй вывод из данных табл. 2: если в украинском стандарте задан только предел для плотности потока мощности, то в остальных стандартах основной является норма для SAR. И это весьма существенно, поскольку относительно простое измерение плотности потока мощности возможно лишь в дальней зоне антенны, на расстоянии не менее длины волны от нее, а некорректно выполненные измерения в ближней зоне приводят к неверным результатам. Поэтому, хотя измерения SAR тоже очень непросты, проверка биологической безопасности сотовых телефонов основывается именно на них.

Таблица 2

Страна или регион	Стандарт или другой нормативный документ	Нормы безопасности на электромагнитное излучение		
		Плотность потока мощности, мВт/см ²		Стандартный SAR, мВт/г
		стандартная	пересчитанная	
США	ANSI/IEEE C95.1-1992	$\frac{f, \text{ МГц}}{1500}$	0,5...0,6	1,6
Западная Европа	ENVSO 166-2 (проект, 1995)	–	–	2,0
Япония	–	–	–	8,0
Россия, Украина	ЭМИ РЧ. Санитарные правила и нормы. 1996	0,01	0,4	–

Таким образом, нормы безопасности, которые устанавливаются действующими стандартами, в частности стандартом США, и учитывают практически все виды влияния электромагнитного излучения на человека (термическое, канцерогенное, нейрофизиологическое, влияние на слух, кровь и др.), для современных АС выполняются.

Поскольку единого мнения относительно вредности АС не выработано и достоверно не известно, эффективны ли предлагаемые средства защиты от электромагнитных излучений, владельцы АС пока могут воспользоваться такими рекомендациями:

- аналоговым стандартам и АС предпочитайте цифровые, так как излучения цифровых АС в 4...8 раз слабее;
- чем меньше мощность АС, тем она безопаснее;
- помните, что более глубоко проникает в человеческие ткани низкочастотное излучение;
- перед покупкой сотового телефона изучите его гигиенический сертификат;
- не покупайте сотовый телефон детям, у них еще не окрепли иммунная и нервная системы;
- старайтесь сокращать время пользования сотовым телефоном.

Список литературы: 1. *Хитров Ю.А.* СВЧ в медицине / Ю.А. Хитров, В.А. Шестиперов // *Обзоры по электрон. технике.* Сер. 1, Электроника СВЧ. М., 1983. Вып. 16. С. 5. 2. *Поляков В.Н.* СВЧ-термография и перспективы ее развития. Применение в медицине и народном хозяйстве / В.Н. Поляков, А.С. Шмаленок // Там же. 1991. Вып. 8. С. 14. 3. *Джонсон К.К.* Воздействие неионизирующего электромагнитного излучения на биологические среды и системы / К.К. Джонсон, А.В. Гай // *ТИИЭР.* 1972. Т. 60, № 6. С. 54 – 55. 4. *Vadjed Samiei M.H.* Analytical and Experimental Study of the EM/Biological Tissues Interaction at 1900 MHz / М.Н. Vadjed Samiei, G.Y. Delisle // *Proc. IEEE. Trans. MTT.* 2000. Vol. 79. P. 705 – 710. 5. *Jensen M. A.* EM interaction of handset antennas and a human in personal communications / М. А. Jensen, Y. Rahmat-Samii // *Proc. IEEE.* 1995. Vol. 83, N 1. P. 7 – 17. 6. *Ратынский М. В.* Основы сотовой связи. М.: Радио и связь, 2000. 248 с.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 14.05.2002