

УДК 621.396.67.001.02+538.3+518.5

## ПЛОСКОСЛОИСТАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЯ ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ С ГОЛОВОЙ ЧЕЛОВЕКА

В. В. Бодров, В. А. Пермяков, С. И. Романов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Получена 23 января 2013 г.

**Аннотация.** Изучены энергетические характеристики полуволнового вибратора, находящегося вблизи плоскостлой среды с потерями, моделирующей голову человека. Метод расчета основан на строгом решении задачи об излучении вибратора вблизи плоскостлой среды. Показано, что на малых расстояниях от модели головы человека основной вклад в потери электромагнитного поля дает ближнее поле антенны.

**Ключевые слова:** полуволновый вибратор, плоскостлой среда с потерями, моделирование головы человека, энергетические характеристики антенны.

**Abstract:** The energy characteristics of a half-wave dipole placed near a plane-layered lossy medium simulating the human head are investigated. The calculation method is based on rigorous solution of the radiation problem for a dipole placed near a plane-layered structure. It has been found that, at small distances from the model of the human head, the antenna near field makes the dominant contribution to the loss of the electromagnetic field.

**Keywords:** half-wave dipole, a plane-layered lossy medium, simulating the human head, energy characteristics of antenna.

### Введение

Развитие систем сотовой связи инициировало большое количество теоретических исследований воздействия электромагнитного излучения антенны мобильного телефона на человека (см., например, [1-6]). Существующие математические модели воздействия антенн мобильных телефонов на человека можно разделить на два основных вида: реалистичные

модели, в которых стремятся максимально строго описать облучаемые части человеческого тела и структуру сотового телефона с его антенной, и упрощенные модели человека и антенны сотового телефона.

Реализуемые в настоящее время модели ориентированы на выявление эффектов теплового воздействия электромагнитных волн на человека. При этом анализ воздействия электромагнитных волн на человека сводится к электродинамической задаче, в рамках которой решаются уравнения Максвелла либо независимо, либо совместно с биотепловым уравнением. Основными характеристиками воздействия электромагнитных волн являются распределение удельной поглощаемой мощности и температуры биоткани в объеме модели человека. Расчет анатомически реалистичных математических моделей человека проводится с помощью универсальных численных методов (метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов и другие) и обеспечивает высокую степень адекватности моделей объекту исследования. Для этой цели могут быть использованы современные программные продукты, такие, как HFSS, CST MWS, Semcad [7-9].

Однако обратной стороной применения универсальных программных продуктов является ограниченная возможность детализации процессов воздействия электромагнитных волн на биологические объекты (БО). Так, на их основе затруднено изучение такого вопроса, как определение относительных вкладов ближнего поля и поля излучения антенны в величину поглощаемой мощности в БО. Голова пользователя во время телефонного разговора находится на расстояниях, малых по сравнению с длиной волны, то есть в ближней зоне антенны. Поэтому есть основания полагать, что роль потерь в ближнем поле антенны существенна. Изучение этого вопроса позволит обоснованно ставить задачу разработки антенн с минимальным воздействием их ближнего поля на БО.

С этой целью в данной работе рассматривается излучение вибраторной антенны вблизи простой плоскостной модели БО. Такая модель, конечно, не позволяет исследовать влияние БО на диаграмму направленности антенны.

Однако она приемлема для анализа потерь в БО при близком расположении антенны к голове человека и при длинах волн, меньших характерных геометрических размеров головы. Преимуществом данной модели по сравнению с универсальными является то, что использование для ее анализа метода собственных функций позволяет разделить вклады в поглощаемую мощность ближнего поля и поля излучения антенны. В результате расчета определялись интегральные потери мощности электромагнитного поля, создаваемого антенной, в модели БО, как суммарные, так и отдельно для ближнего поля и поля излучения антенны.

### Метод расчета

Метод расчета распределения тока проволочной антенны, имеющей изломы, ветвления, произвольное число источников питания и полностью находящейся над плоскостной средой (ПСС), подробно изложен в [10]. Здесь он рассмотрен кратко в целях понимания постановки и алгоритма решения электродинамической модели.

Бесконечная протяженность слоев ПСС по координатам  $x, y$ , параллельным границам раздела сред, приводит к необходимости спектрального представления полей и токов по этим координатам

$$\begin{cases} E_{x,y,z}(x, y, z) = \iint_{\vec{k}} e_{x,y,z}(\vec{k}, z) e^{-i\vec{k}\vec{r}} d\vec{k} \\ H_{x,y,z}(x, y, z) = \iint_{\vec{k}} h_{x,y,z}(\vec{k}, z) e^{-i\vec{k}\vec{r}} d\vec{k} \end{cases} \quad (1)$$

$$j_{x,y,z}^{e,m}(x, y, z) = \iint_{\vec{k}} \tilde{j}_{x,y,z}^{e,m}(\vec{k}, z) e^{-i\vec{k}\vec{r}} d\vec{k}$$

где  $\vec{k} = (\xi, \eta)$ ,  $\vec{r} = (x, y)$ ,  $\vec{k}\vec{r} = \xi x + \eta y$ ,  $d\vec{k} = d\xi d\eta$ .

Спектральные составляющие полей  $e_{x,y,z}$  и  $h_{x,y,z}$  в (1) выражаются через специальные скалярные функции:

$$\begin{cases} e_x = -i(\xi U^e + \eta U^m) \\ e_y = -i(\eta U^e - \xi U^m) \\ e_z = \frac{i}{\varepsilon}(\kappa^2 I^e + \tilde{j}_z^m) \end{cases} \begin{cases} h_x = -i(-\eta I^e + \xi I^m) \\ h_y = -i(\xi I^e + \eta I^m) \\ h_z = \frac{i}{\mu}(\kappa^2 U^e + \tilde{j}_z^m) \end{cases} \quad (2)$$

В (1,2)  $U^e$  и  $I^e$  – скалярные электрические потенциалы,  $U^m$  и  $I^m$  – скалярные магнитные потенциалы,  $\kappa^2 = \xi^2 + \eta^2$ ,  $\varepsilon$  и  $\mu$  – относительные комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды,  $\tilde{j}_z^{e,m}$  – спектральные составляющие электрического и магнитного токов. Дифференциальные уравнения Максвелла после подстановки (1) и (2) сводятся к двум независимым системам телеграфных уравнений для скалярных электрических и магнитных потенциалов. Так как телеграфные уравнения описывают распределение напряжения и тока в длинной линии, то данные потенциалы можно трактовать как напряжение и ток в некоторой системе отрезков длинной линии. В ней слоям сопоставлены четырехполюсники, описываемые матрицей сопротивлений или матрицей передачи, а полупространствам сопоставлены их волновые сопротивления. Таким образом, расчет полей в ПСС сводится к расчету напряжений и токов в эквивалентной электрической цепи с использованием математического аппарата теории цепей. Учет граничных условий для тангенциальных составляющих полей сводится к последовательному пересчету волнового сопротивления нижнего полупространства к верхней границе ПСС через все четырехполюсники, соответствующие имеющимся слоям, по стандартной формуле пересчета входного сопротивления с одного входа четырехполюсника на другой.

Для улучшения сходимости спектрального интеграла была выделена асимптотика, имеющая физический смысл спектра электростатических полей. Эта асимптотика представляет собой вклад поля зеркального источника относительно верхней границы ПСС с известным весовым множителем. Поле зеркального источника вычислялось при помощи векторного потенциала, как и

для первичного поля. Сходимость спектральных интегралов, после выделения асимптотики, улучшается на два порядка. Это особенно важно при расположении источника вблизи границы раздела сред.

Интегральное уравнение для тока на антенне решалось методом моментов с использованием кусочно-синусоидальных базисных функций тока [9]. Далее рассчитывались мощность излучения и мощность потерь в среде. Мощность излучения определялась интегрированием по свободному пространству с учетом отражения излучаемых антенной волн от границы раздела сред. Мощность потерь в среде определялась, как сумма потерь в поле излучения (через интеграл по спектру прошедших в среду однородных плоских волн ( $|\kappa| < \kappa_0$ )) и потерь в ближнем поле антенны (через интеграл по спектру прошедших в среду неоднородных плоских волн ( $|\kappa| > \kappa_0$ )). Входная мощность равна сумме мощности излучения и мощности потерь в среде.

### Численное исследование

Рассмотрены три стандарта сотовой связи: NMT 450 ( $\lambda = 66$  см), GSM 900 ( $\lambda = 33$  см) и GSM 1800 ( $\lambda = 16,5$  см). Хотя в настоящее время стандарт NMT 450 не применяется, расчеты проводились для этой частоты в целях сравнения с ролью более высоких частот.

В качестве излучателя выбран полуволновый вибратор, ориентированный параллельно границе раздела сред. Радиус вибратора 0,25 мм, распределение тока на вибраторе аппроксимировалось пятнадцатью кусочно-синусоидальными базисными функциями тока. Напряжение в точках питания антенны считалось постоянным.

Если принять характерный размер головы человека равным 15-20 см, то рассматриваемую модель следует считать приемлемой для количественного анализа для GSM 1800 и пригодной, по крайней мере, для качественных оценок для GSM 900 и NMT 450, с учетом того, что антенна расположена на расстоянии от ПСС, значительно меньшем как длины волны, так и размеров головы. Использовалась трехслойная плоскостойкая модель головы человека:

1 - слой кожи, 2 - слой костной ткани и 3 - полупространство нервной ткани. Численные значения диэлектрических проницаемостей тканей на рабочих частотах систем сотовой связи получены следующим образом. Были проанализированы экспериментальные данные для соответствующих тканей, приведенные в [11]. Эти данные пересчитывались на конкретные частоты систем сотовой связи. При пересчете параметров кожи использовалась формула Дебая с учетом двух времен релаксации (табл. 2.9 в [11]). Для костной ткани использовались исходные данные табл. 2.10 [11] на частоте 100 МГц; на рабочие частоты была пересчитана только частотная зависимость мнимой части  $\varepsilon$  согласно формуле  $\varepsilon = \varepsilon' - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$ . Для мозговой ткани были взяты параметры из табл. 2.8 в [11], которые пересчитывались на рабочие частоты по формуле Дебая с одной частотой релаксации. Принятые значения комплексных диэлектрических проницаемостей биотканей для рассматриваемых частот приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения относительных комплексных диэлектрических проницаемостей тканей головы человека для трех стандартов сотовой связи.

	NMT450 ( $f= 450$ МГц)	GSM 900 ( $f= 900$ МГц)	GSM 1800 ( $f= 1800$ МГц)
кожа головы	$\varepsilon = 20.4-i5.2$	$\varepsilon = 19.3-i3.2$	$\varepsilon = 19.0-i2.5$
кость	$\varepsilon = 8 - i 2$	$\varepsilon = 8 - i 1$	$\varepsilon = 8-i0.5$
мозг	$\varepsilon = 41.6-i41.8$	$\varepsilon = 41.5-i22.5$	$\varepsilon = 41.1-i14.4$

Толщина кожи головы в модели взята равной 4 мм, толщина кости черепа 8 мм, остальное полупространство занято мозговой тканью. Отметим, что при этих данных сред глубина проникновения поля составляет 1-2 см. Таким образом, задание в ММ полупространства мозговой ткани приемлемо, так как при типичных размерах головы поле, достаточно быстро затухая, не доходит до противоположной границы.

Во всех расчетах фиксировалось значение ЭДС генератора на входных клеммах антенны. Когда распределение тока по длине вибратора полагается заданным и рассчитывается только его амплитуда, важно, чтобы вид этого распределения не менялся при приближении вибратора к среде. Численные результаты показывают, что при сближении вибратора со средой происходит изменение распределения тока на вибраторе. Однако относительные энергетические характеристики вибратора в силу их вариационной устойчивости слабо зависят от этого изменения тока. Поэтому при расчете энергетических характеристик можно считать распределение тока заданным *a priori*.

Наиболее существенными с практической точки зрения являются результаты расчетов, относящиеся к величине потерь мощности в среде и их отношения ко входной мощности .

В рамках принятых допущений активная мощность на входе антенны  $P_{in}$  равна сумме мощности излучения  $P_r$  и мощности потерь в среде  $P_l$

$$P_{in} = P_r + P_l, \quad (3)$$

где мощность потерь в среде  $P_l$  равна сумме потерь в поле излучения  $P_l^r$  и потерь в ближнем поле антенны  $P_l^{nf}$

$$P_l = P_l^r + P_l^{nf}. \quad (4)$$

Рассмотрим относительные энергетические характеристики вибратора над ПСС. На рис. 1 приведена зависимость отношения мощности потерь в среде ко входной мощности вибратора от расстояния  $h$  до ПСС, на рис. 2 - зависимость отношения мощности потерь в среде к мощности излучения от расстояния  $h$  до ПСС. В мощности потерь можно выделить часть, приходящуюся на спектр ближних полей (рис.3) и на спектр поля излучения (рис.4).

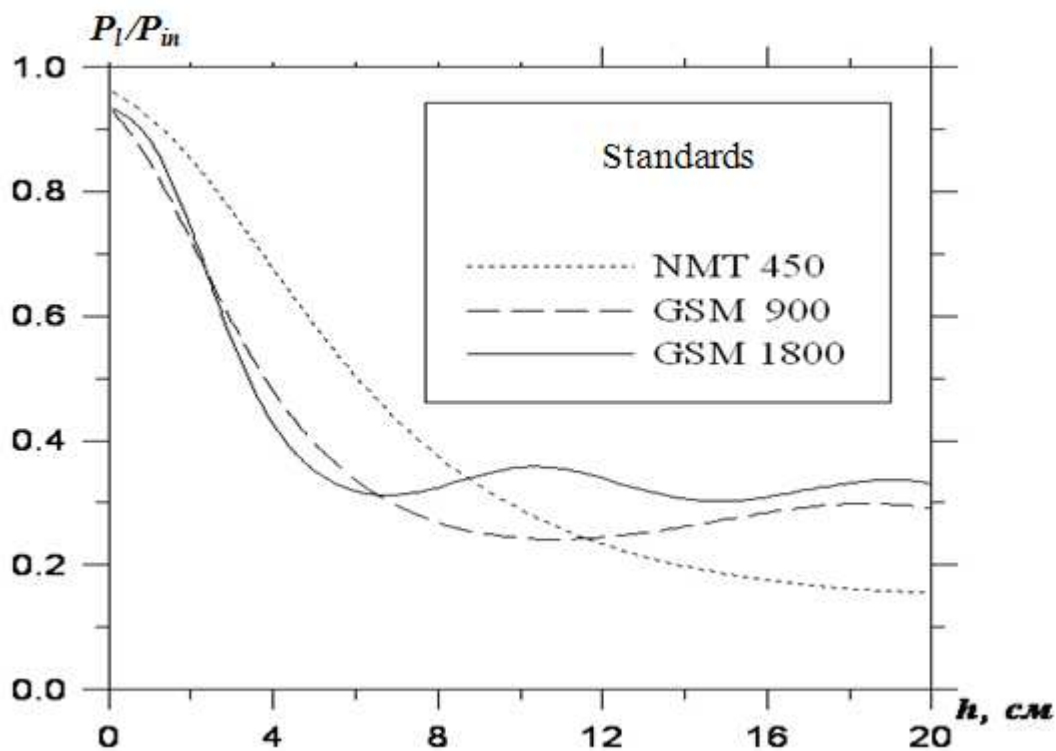


Рис. 1. Зависимость отношения мощности потерь в среде ко входной мощности вибратора (коэффициент поглощения мощности средой) от расстояния до плоскостлой среды.

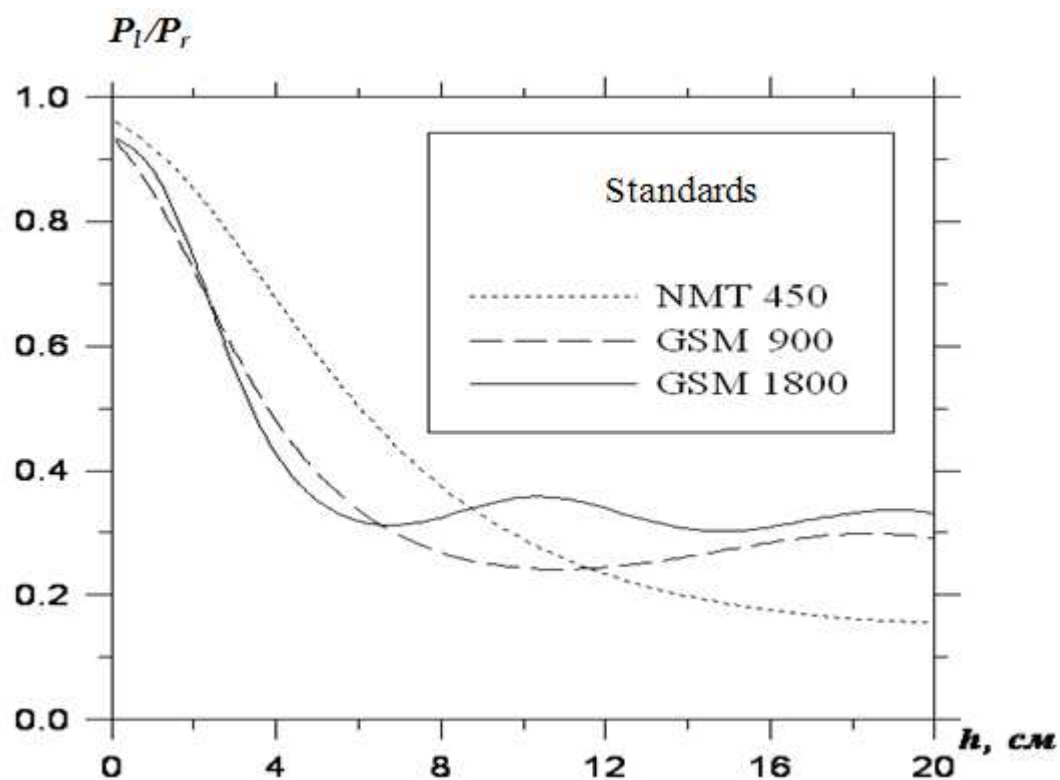


Рис. 2. Зависимость отношения мощности потерь в среде к мощности излучения вибратора от расстояния до плоскостлой среды.



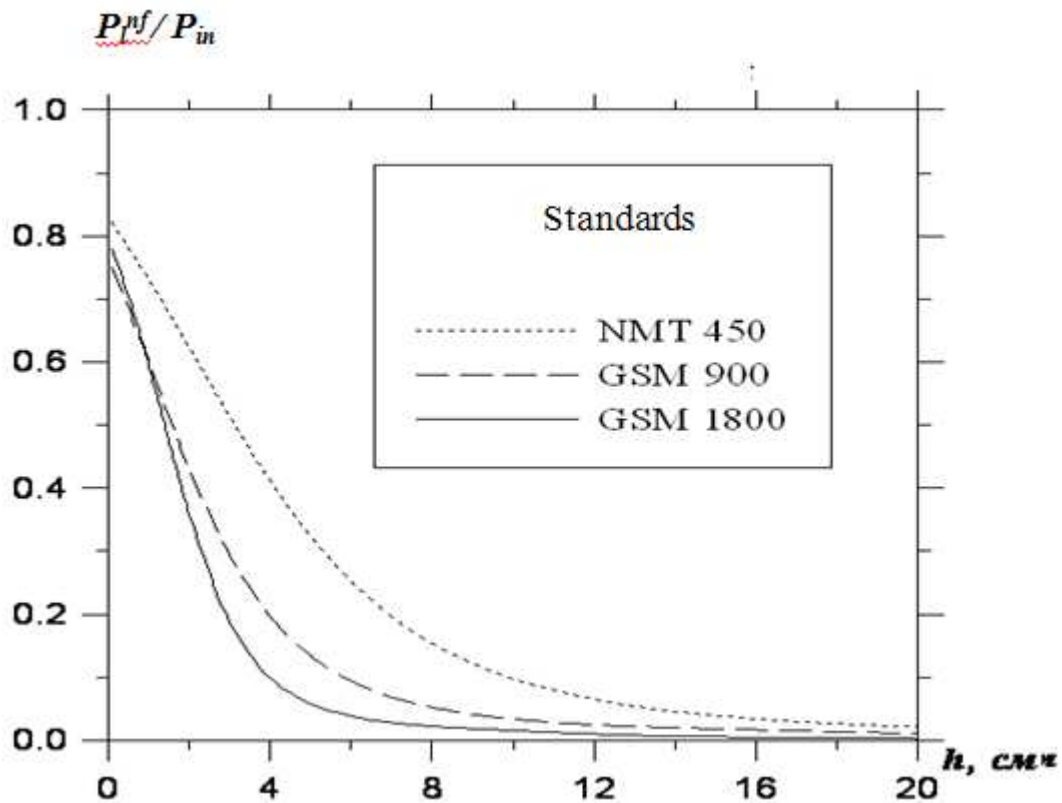


Рис. 3. Зависимость отношения мощности потерь в среде, приходящейся на спектр ближних полей, к мощности вибратора от расстояния до плоскостой среды.

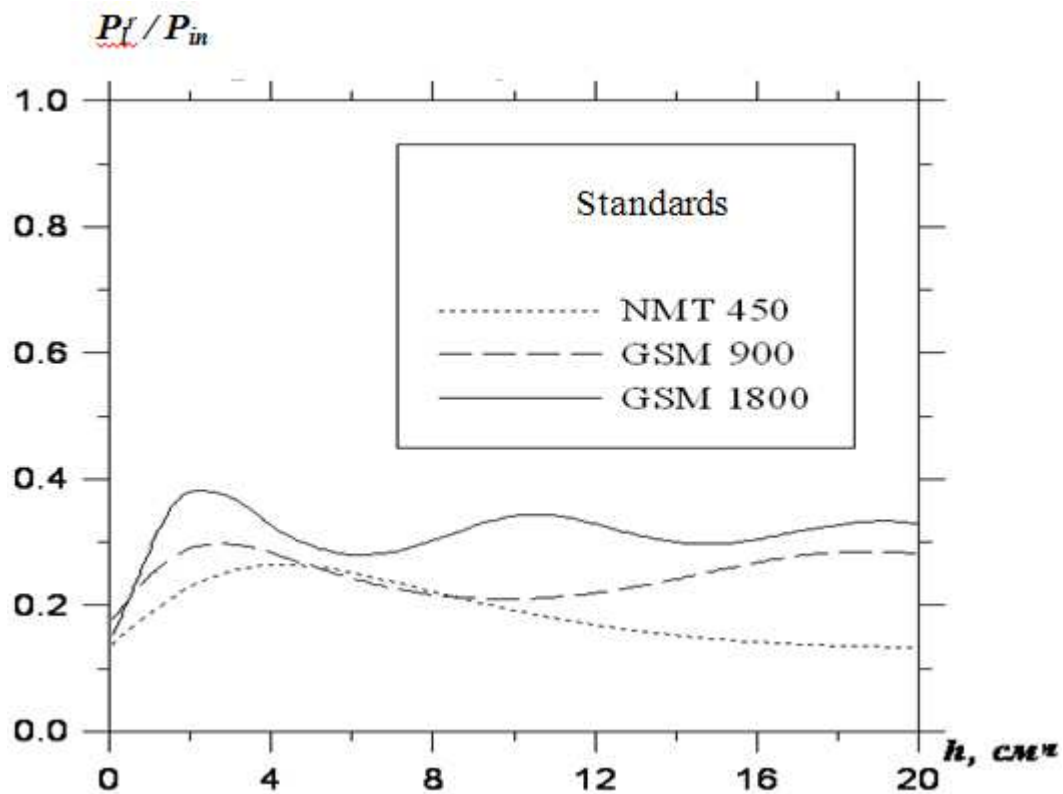


Рис. 4. Зависимость отношения мощности потерь в среде, приходящейся на спектр поля излучения, к мощности вибратора от расстояния до плоскостой среды

Как и следовало ожидать, мощность потерь, приходящаяся на спектр ближних полей, носит монотонный характер и достаточно быстро убывает при удалении источника от границы раздела сред (см. зависимости на рис. 1 и 2 на расстояниях меньше 4 см и рис. 3). Напротив, мощность, приходящаяся на спектр излучения, носит колебательный характер вследствие интерференции падающей и отраженной от ПСС волн (период колебаний соответствует  $\lambda/2$ ) и слабо убывает с увеличением расстояния (см. рис. 1 и 4). Использование в качестве модели головы человека ПСС, как раз и оправдано тем фактом, что при близком расположении вибратора к границе раздела сред, взаимодействие по ближним полям интенсивнее, чем по полю излучения.

При расстояниях до ПСС, меньших 4 см, начинается резкое поглощение энергии биологическими тканями (рис. 2, 4). На частотах 1800 и 900 МГц при расположении вибратора на расстоянии 2 см от ПСС на потери в тканях уходит около 70% мощности, на расстоянии 1 см – 80%, при расположении вибратора непосредственно на поверхности – свыше 90% мощности. Потери мощности на частоте 450 МГц еще выше. На расстояниях менее 8 см при заданной входной мощности величина потерь в тканях для стандарта NMT 450 больше, чем у GSM 900 и GSM 1800. Для последних стандартов на этих же расстояниях энергетические характеристики взаимодействия со средой сравнимы между собой.

Из рис. 2, задавшись отношением мощности потерь к мощности излучения, можно определить минимально допустимое расстояние от телефона до головы, на котором мощность потерь в биоткани не превышает мощности излучения. Так, мощность потерь в среде сравнивается с мощностью излучения при расстоянии до ПСС, равном 6 см для стандартов GSM 900 и GSM1800 и 8 см - для NMT 450.

При увеличении толщины вибратора изменится только реактивная часть входного сопротивления, что повлияет на согласование вибратора с генератором. Все приведенные результаты останутся в силе, если полагать, что генератор согласован с нагрузкой.

Полученные численные результаты, показывающие значительное поглощение электромагнитного поля в голове человека (десятки процентов по отношению ко входной мощности) согласуются по порядку величины с расчетами, приведенными в [3] для анатомически реалистичных моделей головы человека. В большинстве моделей [3] излучающей системой являлась антенна - монополь длиной в четверть длины волны. Вместе с корпусом мобильного телефона система аналогична рассматриваемому нами полуволновому вибратору. На частоте 1900 МГц относительная величина поглощаемой в модельных биотканях мощности согласно табл. II в [3] составила в среднем 60%. Для других модельных расчетов [3] относительная величина поглощенной мощности составляла 30%...40%. Однако расстояние между моделями телефона и головы в [3] не указано. В этой и других известных нам работах не исследовалась зависимость величины поглощаемой мощности от расстояния между антенной и моделью головы, а также относительные вклады потерь в ближнем поле и поле излучения антенны.

### **Заключение**

1. Расчеты показали, что на расстоянии менее 6 см между плоскостой моделью головы и антенной для стандартов GSM 900 и GSM 1800 и менее 8 см - для NMT 450 мощность потерь в среде становится больше мощности излучения, т.е. режим работы вибраторной антенны энергетически невыгоден. На меньших расстояниях мощность потерь резко возрастает, достигая свыше 90% при расположении вибратора непосредственно на поверхности модели. Поэтому при расположении антенны мобильного телефона на малых расстояниях от головы возрастает опасность вредного воздействия электромагнитного поля мобильного телефона на человека.

2. Приведенные выше результаты относятся к вибраторной антенне и модели головы человека в виде плоскостой среды. В настоящее время в сотовых телефонах используются другие типы антенн, как правило, невыступающие микрополосковые антенны. Тем не менее полученные численные результаты представляют практический интерес по двум причинам.

Во-первых, вибраторные антенны продолжают широко применяться в мини радиостанциях бытовых и специализированных систем связи. Во-вторых, выявленные расчетами принципиальные закономерности увеличения мощности потерь в среде по отношению к мощности излучения и мощности потерь в ближнем поле по отношению к мощности потерь в поле излучения в зависимости от расстояния до биообъекта должны наблюдаться и для других видов излучателей на малых по сравнению с размерами объекта расстояниях. На этих же расстояниях следует считать приемлемой для оценки потерь принятую в наших расчетах модель головы человека в виде плоскостной среды.

### Литература

1. Gandhi O.P., Lazzi G., Furse C.M. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz.// IEEE Trans. Microwave Theory. 1996. MTT-44. P.1884-1897.
2. Lazzi G., Gandhi O.P. Realistically titled and truncated anatomically based model of the human head for dozimetry of mobile telephones.// IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 1997. V.EMC-39. P.55-61.
3. Tinniswood A.D., Furse C.M., Gandhi O.P.. Computations of SAR Distributions for Two Anatomically Based Models of the Human Head using CAD Files of Commercial Telephones and the Parallelized FDTD Code. // IEEE Trans. Antennas Prop. 1998. V.46. N.6. P.829-833.
4. Wei Yu, Shiwen Yang, Chialun Tang, Danni Tu. Accurate Simulation of the Radiation Performance of a Mobile Slide Phone in a Hand-Held Position. //Antennas and Propagation Magazine. 2010. Vol. 52. No.2. P. 168-177.
5. Pelosi M., Franek D., Knudsen M.B., Pedersen G.F., Andersen J.B.. Antenna Proximity Effects for Talk and Data Modes in Mobile Phones. // Antennas and Propagation Magazine. 2010. Vol. 52. No.3. P. 16-27.
6. Курушин А.А. Вычисление температуры нагрева головы человека при пользовании сотовым телефоном. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2011. N4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr11/2/text.pdf>

7. [Электронный ресурс].URL: <http://www.ansoft.com>
8. [Электронный ресурс].URL: <http://www.microwavestudio.com>
9. [Электронный ресурс].URL: <http://www.semcad.com>
10. Бодров В.В., Романов С.И. Учет влияния плоскостой среды на характеристики вибраторных антенн. //Радиотехника и электроника. 1998. Т.43. №10. С. 1179-1185.
11. Кузнецов А.Н. Биофизика электромагнитных воздействий: (Основы дозиметрии). М.: Энергоатомиздат, 1994.— 256с.