

ВЫЧИСЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОЛЬЗОВАНИИ СОТОВЫМ ТЕЛЕФОНОМ

А. А. Курушин

Московский энергетический институт

Получена 7 октября 2010 г., после доработки 4 апреля 2011 г.

Аннотация. Статья посвящена моделированию эффекта поглощения мощности в голове человека при пользовании сотовым телефоном. На основе численного анализа электромагнитного поля и поглощаемой мощности внутри головы пользователя рассчитано соответствующее этому поглощению повышение температуры.

Ключевые слова: сотовый телефон, удельная мощность поглощения, биологическая ткань, температура нагрева.

Abstract. Article is devoted to modeling of the effect of power absorption in a human head when using a cellular phone. Based on numerical simulations of electromagnetic field and absorption power inside the user's head the corresponding temperature increase is computed.

Keywords: mobile telephone, power density of absorption, biological tissue, reheat temperature.

Введение

Широкое распространение сотовой телефонной связи усилило беспокойство, связанное с облучением головы человека радиоволнами, излучаемыми антенной телефона при его использовании. Комплексные исследования физиологических изменений, происходящих в биологической ткани во время разговора по сотовому телефону, установили, что через десять минут разговора температура кожи человека в непосредственной близости от телефона возрастает на $0.5...2^{\circ}$ [2]. В соответствии с требованиями американского стандарта, мощность, излучаемая антенной сотового телефона, не должна превосходить некоторого предельного уровня, при котором поглощаемая мощность внутри головы человека не превышает 1.6 мВт на 1г веса биологической ткани.

Удельная поглощаемая мощность 1.6 мВт/г – это характерная величина, которая имеет место при мощностях, излучаемых антеннами современных сотовых телефонов. Стремление увеличить чувствительность, дальность и устойчивость связи входят в противоречие с необходимостью уменьшать поглощаемую в голове мощность. Чтобы этого достичь, можно идти двумя путями: уменьшить мощность передатчика телефона, что может привести к увеличению вероятности сбоя связи (“звонок не доходит”), или разработать антенную структуру телефона так, чтобы уменьшить облучение головы, не уменьшая эффективности излучения антенны в дальней зоне.

За последние 10 лет антенны сотовых телефонов [6-8, 12] значительно усовершенствовались по характеристикам и усложнились по конструкции (рис. 1). При этом в некоторых моделях в качестве излучающей системы задействован и корпус телефона [11].



Рис.1. Возможные модели сотового телефона и его антенны.

В данной работе рассматривается сотовый телефон с наружной спиральной антенной (рис. 1а), находящийся вблизи головы пользователя (talk position). Хотя эта модель телефона является несколько устаревшей, тем не менее, она позволяет определить основные качественные и количественные характеристики взаимодействия поля излучения телефона и головы пользователя. В модели используется фантом головы человека, который хорошо описывает биологическую структуру и электродинамические свойства реального тела. На основе численного анализа электромагнитного поля и поглощаемой мощности внутри фантома головы рассчитано соответствующее этому поглощению повышение температуры.

Характеристики воздействия радиоизлучения на биологическое тело

Для оценки воздействия радиоизлучения на организм человека можно применить, по крайней мере, два критерия: 1) критерий увеличения температуры тела при длительном воздействии облучения и 2) величину поглощенной мощности на единицу веса. Повышение температуры тела зависит от мощности, поглощаемой и рассеиваемой в виде тепла в теле, поэтому второй параметр - т. н. величина SAR (Specific Absorption Rate) - получил более широкое распространение [3-5]. Величина SAR в ячейке анализируемого пространства определяется как отношение мощности, поглощаемой в данной ячейке, к весу биологической ткани в ней [2]:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (1)$$

где σ - проводимость биологической ткани, заполняющей ячейку, См/м,

E – напряженность электрического поля внутри ячейки, В/м

ρ - плотность ткани внутри ячейки, кг/м^3 .

В 1948 г. *H.H.Pennes* [1] предложил математическую модель для передачи тепла в биологическом теле, обусловленной диффузией крови. Хотя были разработаны и более сложные модели процесса теплопередачи, этот подход был уточнен и всё еще используется в настоящее время. Модель описывает влияние тока крови на температуру ткани в стационарном состоянии. Поэтому источник и канал передачи тепла введены в уравнение теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + MR + \rho \cdot SAR + \xi \rho_b C_b (T_a - T), \quad (2)$$

где ρ - плотность массы биологического материала, C_p - теплоемкость биологического материала, λ - теплопроводность материала, MR - скорость генерации тепла в соответствии с метаболическими процессами, ξ - скорость диффузии тепла, ρ_b - плотность массы крови, C_b - теплоемкость биологического материала, T_a - артериальная температура, SAR - удельная мощность поглощения. Каждое слагаемое в (2) имеет смысл и размерность мощности.

Если все механизмы теплопроводности в рамках простейшей диэлектрической модели головы свести к потерям, то из (2) можно получить упрощенное уравнение, в котором увеличение температуры связано с величиной SAR [2]:

$$SAR = C \frac{dT}{dt} = \frac{C \cdot \Delta T}{\Delta t}, \quad (3)$$

где

C – коэффициент теплопроводности [Дж/кг/град],

ΔT - увеличение температуры в заданной точке тела, град,

Δt – время действия облучения, *мин.*

Таким образом, есть два способа определения SAR, основанные 1) на измерении или расчете увеличения температуры тела на заданном отрезке времени, и 2) на измерении или расчете напряженности электрического поля в заданной точке внутри фантома головы.

Для того, чтобы определить поле E в системе, состоящей из излучающего телефона и расположенного рядом биологического объекта, нужно решить систему уравнений для электромагнитного поля вместе с граничными условиями на границах раздела. Так как законы распространения тепла и электромагнитного поля описываются похожими уравнениями, то методы решения уравнения теплопроводности и уравнений Максвелла на этапе их дискретизации могут использовать одну и ту же сетку разбиения.

Погрешность в расчете SAR зависит от погрешности в расчете поля и от точности задания параметров модели головы. Важным фактором является также степень упрощения корпуса и конструкции телефона, от чего зависит точность расчета его ближнего поля. Очевидно, что подробное моделирование корпуса телефона является довольно сложной задачей, требующей больших вычислительных ресурсов. Однако, основные детали корпуса, особенно близкие к антенне и к голове человека, желательно описать как можно точнее.

Необходимо также учитывать, что напряжение источника, действующего на входе антенны, изменяется во времени. Поэтому для каждого временного шага необходимо рассчитывать значения электрического и магнитного полей во всех точках анализируемого пространства, в соответствии с методом расчета во временной области (метод FDTD) [1].

Голова человека как биологическое тело имеет достаточно сложную структуру и состоит из несколько видов биологической ткани с потерями, в которых мощность поглощается неравномерно из-за разницы в проводимости каждого слоя. Поэтому важным условием точности расчетов внутреннего поля

является достаточно точное построение модели головы. Следует отметить, что электромагнитное моделирование тела человека в настоящее время, - это одна из выделившихся научных областей на стыке радиотехники и медицины. Усредненные значения основных параметров часто используемой трехслойной модели головы человека представлены в таблице 1.

Табл.1. Параметры трехслойной модели головы человека (в скобках указаны параметры для частоты 1.9 ГГц)

<i>Вещество</i>	<i>Толщина, мм</i>	<i>Отн. диэлектрическая проницаемость</i>	<i>Проводимость слоя См/м</i>	<i>tg δ [6]</i>	<i>Плотность слоя кг/м³</i>	<i>Теплопроводность Вт/К/м</i>
Мозг	заполнение	53 (0.9 ГГц) 46 (1.9 ГГц)	1.1 (1.7)	0.415 (0.369)	1030	0.3
Кость	3	9 (8)	0.06 (0.1)	0.133 (0.125)	1800	0.01
Кожа	1	59 (46)	1.3 (1.9)	0.44 (0.41)	1100	0.5

В данной работе численное исследование взаимодействия электромагнитного излучения телефона и головы пользователя было проведено с помощью программы CST Microwave Studio (CST MS). Эта программа основана на методе FDTD и позволяет найти все требуемые характеристики поля в ближней и дальней зонах.

Влияние головы пользователя на работу сотового телефона

Сначала рассчитали частотную характеристику сотового телефона, т.е. зависимость согласования его антенны от частоты, в свободном пространстве в отсутствие головы пользователя. Модель телефона состоит из спиральной антенны и металлического корпуса (см. рис. 1а). Полученная зависимость представлена на рис.2 синим цветом. Можно предположить, что находящееся в

близнем поле антенны большое диэлектрическое тело (каковым является модель головы пользователя) должно влиять на характеристики антенны, в частности на ее согласование. Численные расчеты, проведенные с помощью CST MS в присутствии фантома головы человека, подтверждают это (см. рис. 2).

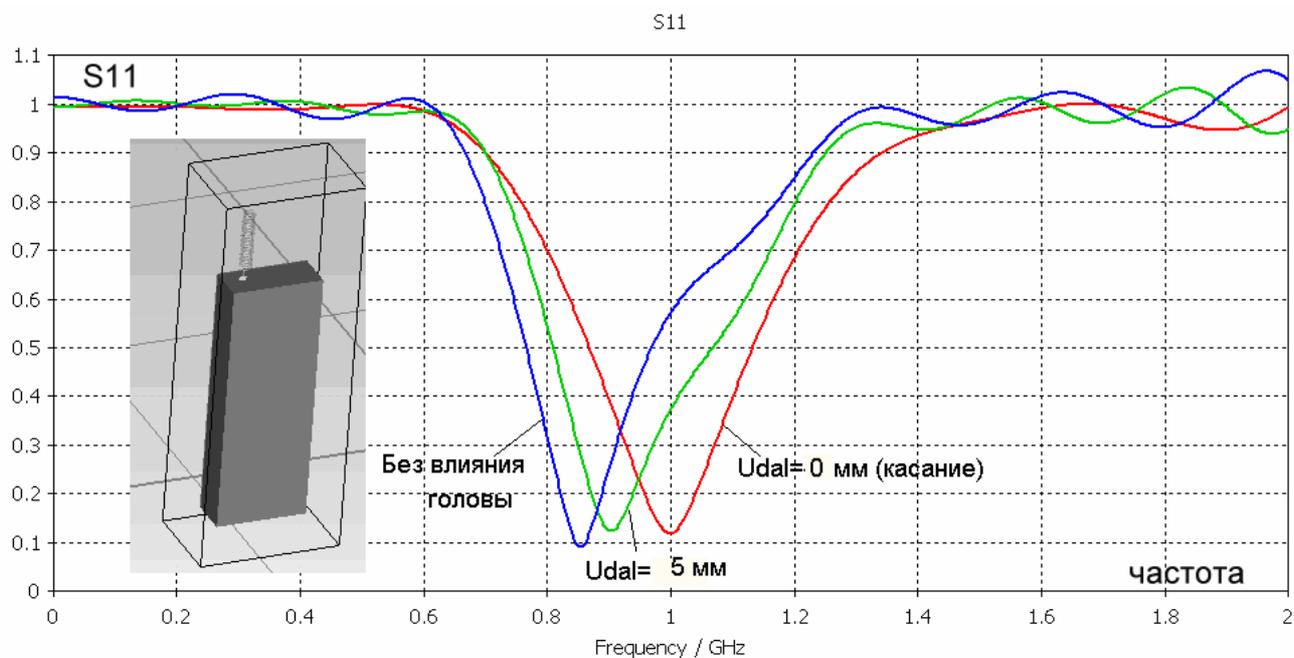


Рис. 2. Рассчитанные частотные характеристики антенны в отсутствие и в присутствии фантома головы пользователя. Параметр Udal – расстояние между телефоном и головой.

В программе CST MS расчет частотной характеристики выполняется как преобразование Фурье от временной зависимости волны, отраженной от антенны. Основное время в вычислениях занимает расчет во временной области. Программа может выполнять этот расчет сравнительно быстро на двухядерных компьютерах с частотой процессора 2 ГГц и RAM > 2 ГГб.

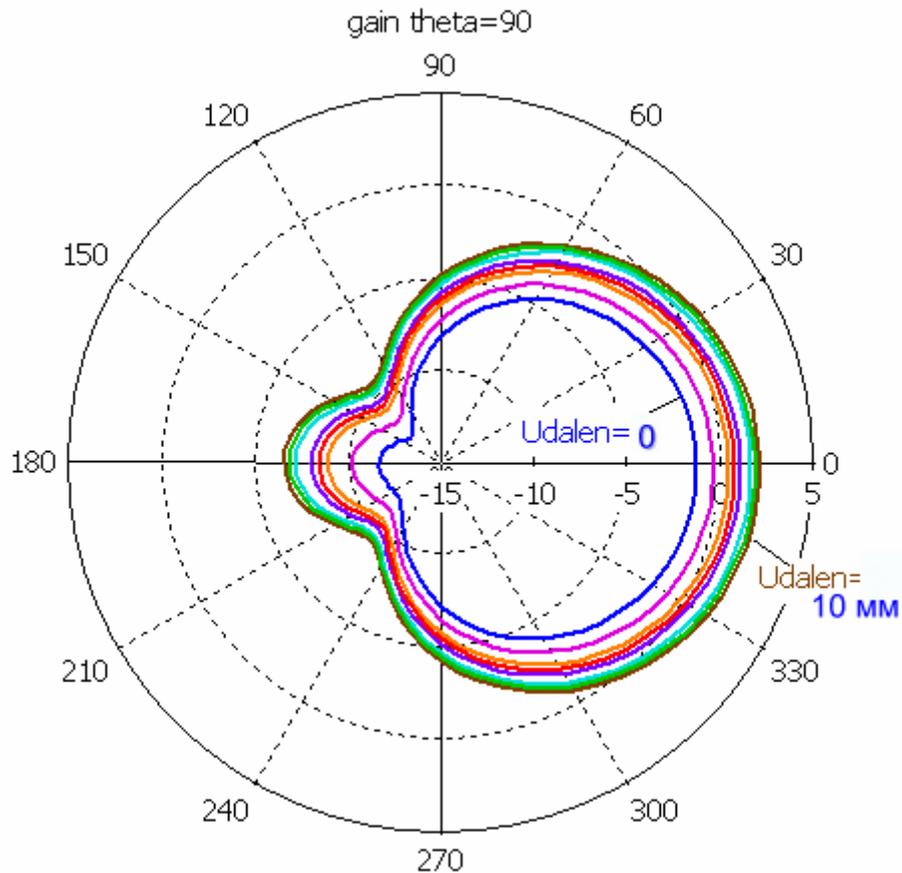


Рис. 3. Диаграмма направленности дальнего поля в системе телефон-голова для ряда значений параметра удаления телефона от головы.

На рис. 3 показаны рассчитанные диаграммы направленности в дальней зоне для нескольких значений параметра удаления телефона от головы. Изменение интенсивности излучения при разных значениях U_{dal} (изменение коэффициента усиления антенны) объясняется рассогласованием, см. рис. 2. Голова человека экранирует поле антенны в направлении $\varphi=180$ град. Поэтому поле излучения имеет значительно меньшую величину в этом направлении по сравнению с противоположным направлением «от головы».

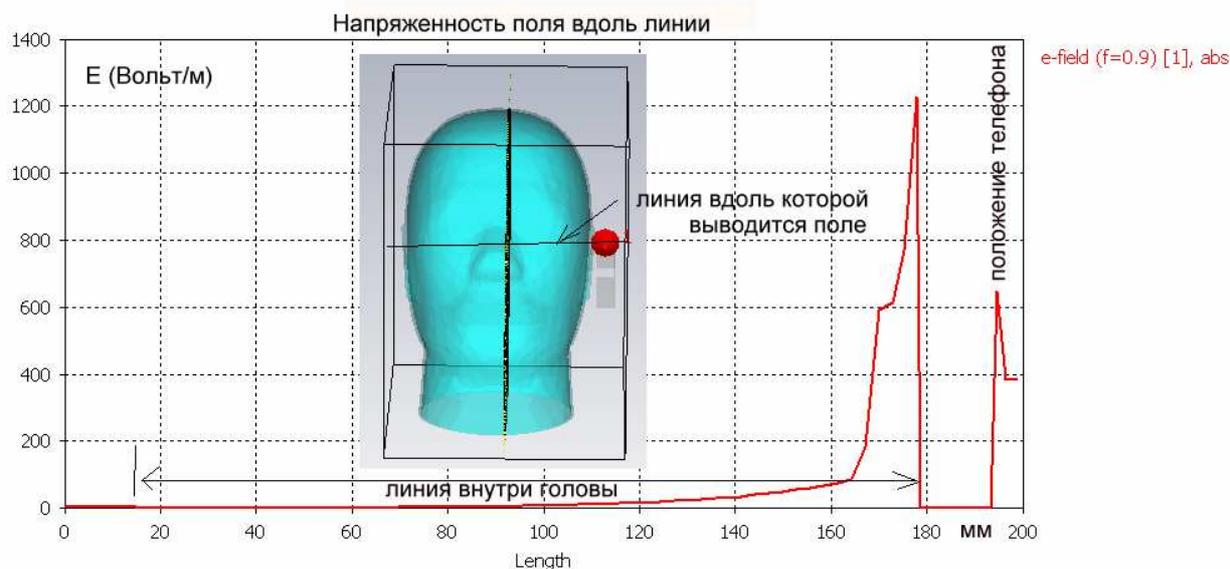


Рис. 4. Распределение поля E вдоль линии внутри головы.

Удельное поглощение рассчитывается на основе вычисленных значений электрического поля и заданных потерь в принятой 3-слойной модели головы, см. ф. (1). Интересно отметить, что рассчитанное распределение модуля электрического поля вдоль линии, проходящей внутри головы, имеет скачок на границе раздела сред, и, следовательно, в этой области можно ожидать наибольший нагрев.

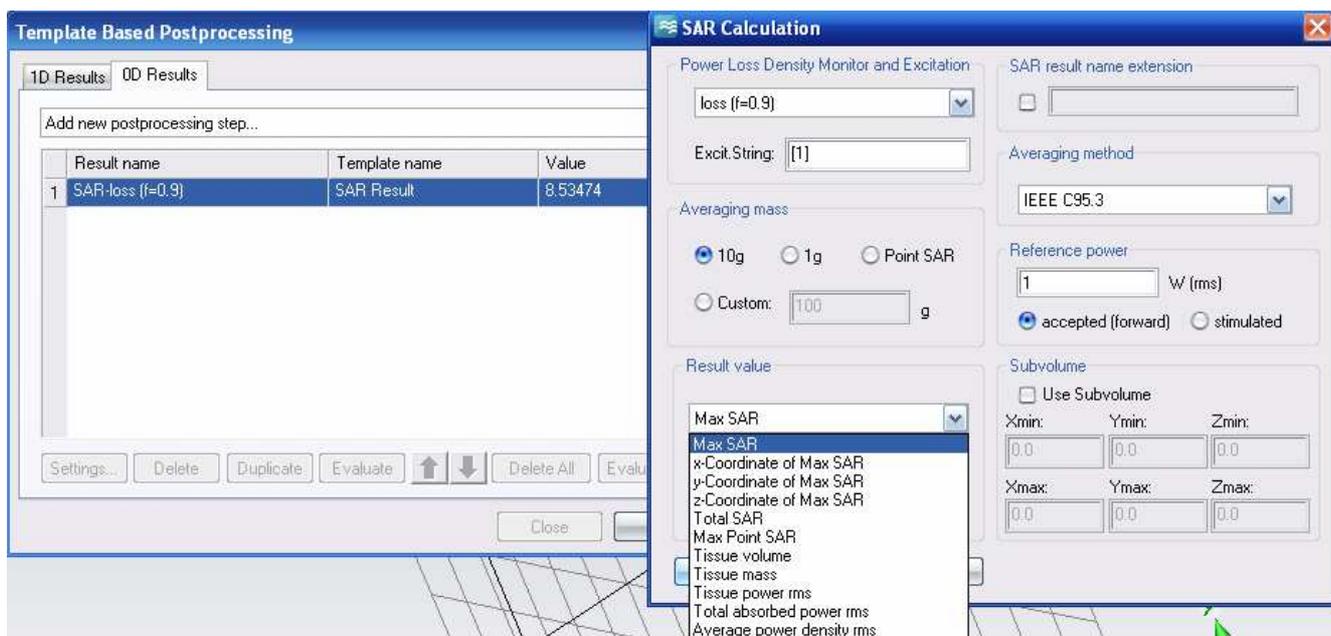


Рис. 5. Различные опции при расчете величины SAR.

В диалоговых окнах, относящихся к вычислению величины SAR (рис. 5), можно выбрать метод вычисления, а именно: SAR в ячейке с массой усреднения 10 г или 1 г, SAR в точке и другие характеристики, а также стандарт (например, IEEE C95.3), в соответствии с которым рассчитывается эта величина. Средняя мощность излучения антенной системы, от которой зависит величины SAR, принимаем равной 200 мВт.

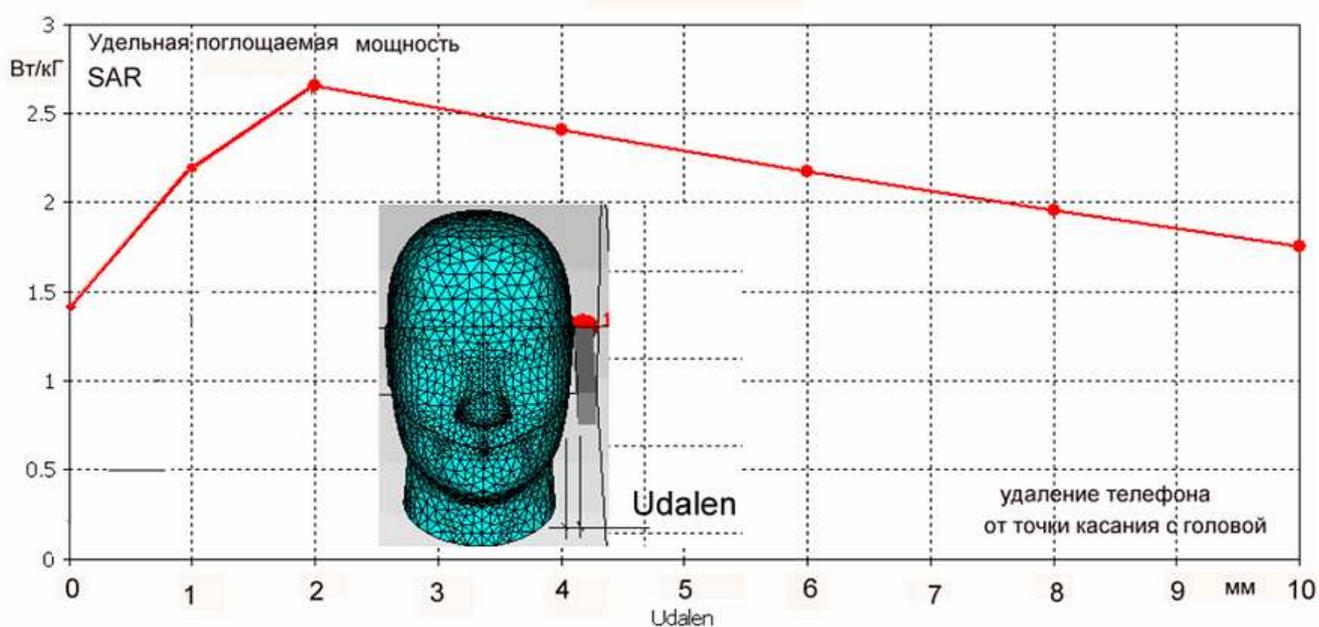


Рис. 6. Зависимость максимального значения SAR от расстояния между телефоном и головой.

Зависимость SAR от расстояния между телефоном и головой (рис. 6) имеет несколько неожиданный характер (уменьшение SAR при приближении телефона к голове от 2 мм до 0 мм) и, это может быть объяснено частичной экранировкой определенных областей головы близко расположенным корпусом телефона. Значение SAR=2.7 Вт/кг достигается при расстоянии 2 мм от головы, а при значительном удалении снижается до 1.5 Вт/кг, что является близким к допустимой норме значением [5].

Расчет распределения температуры внутри головы пользователя

По рассчитанным значениям внутреннего поля на следующем шаге можем решить задачу вычисления температурного распределения внутри головы. Для этого в программе CST MWS необходимо задать соответствующие граничные условия.

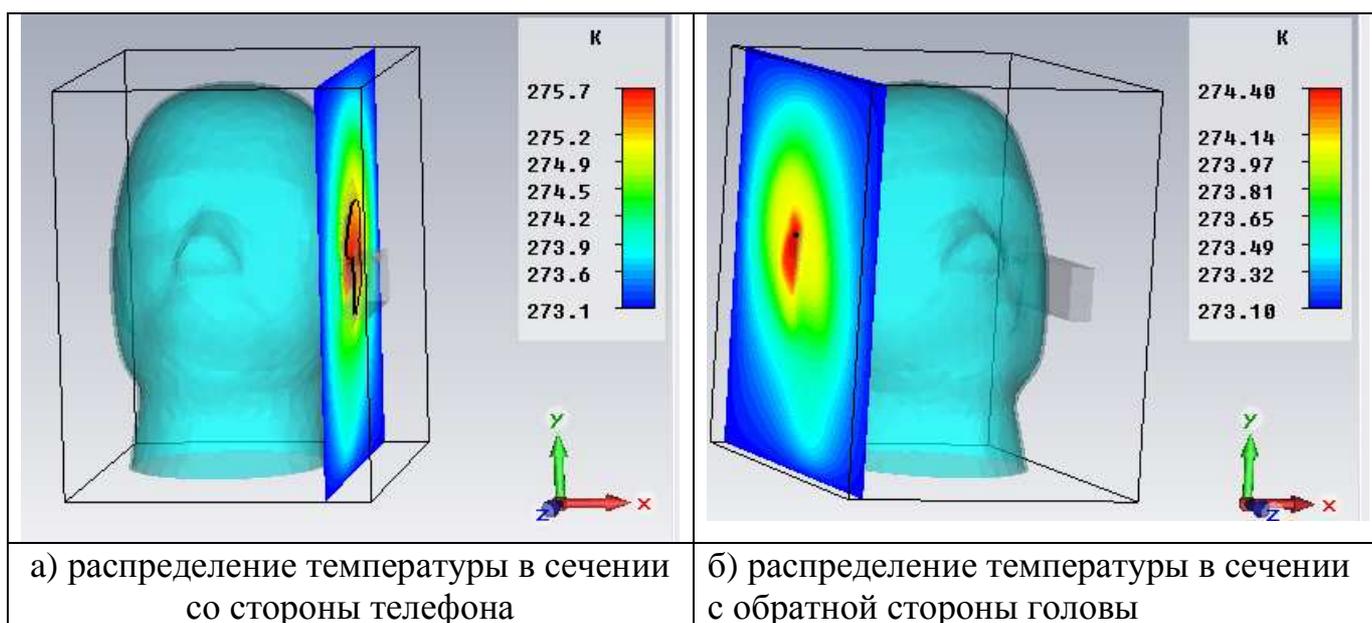


Рис. 7. Рассчитанные распределения температуры в сечениях фантома головы пользователя сотового телефона.

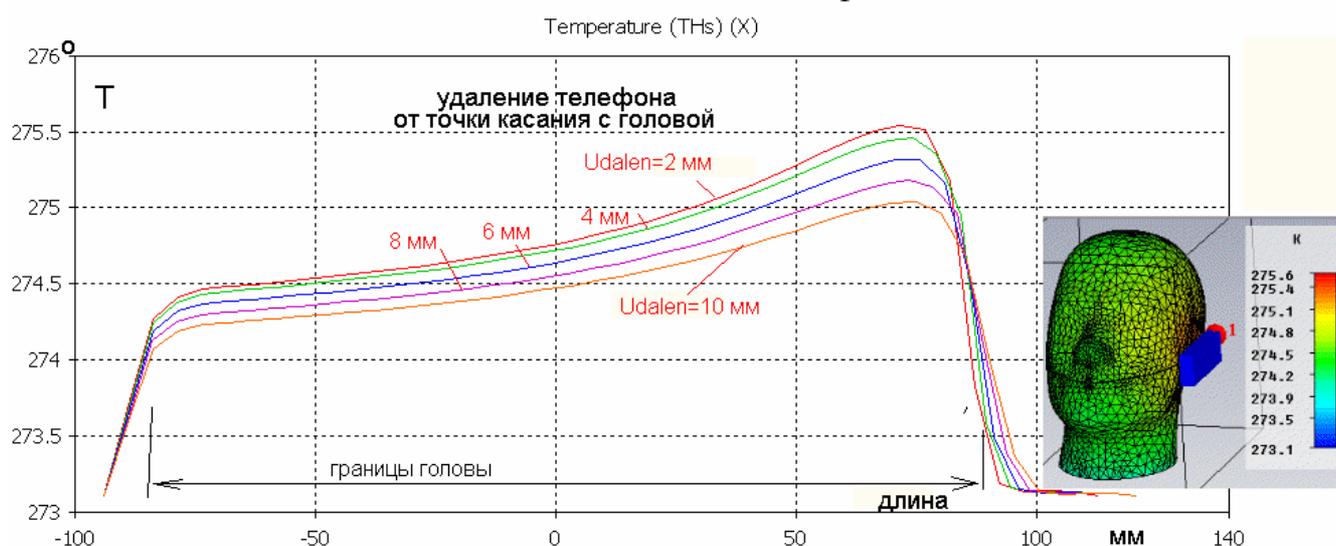


Рис. 8. Рассчитанная температура вдоль линии максимального SAR для нескольких значений расстояния телефона от головы.

Из графиков на рис. 8 следует, что с обратной (по отношению к телефону) стороны головы температура на 1.3° меньше, чем со стороны телефона, но тем не менее она остается на 1.3° выше температуры окружающей среды. Если сравнить рис. 8 и 4, то видно, что величина SAR внутри головы уменьшается значительно быстрее, чем температура, которая даже на стороне, противоположной телефону, превышает температуру окружающей среды. Из этого результата заключаем, что значения и распределение SAR не полностью отражают влияние поля и поглощения на распределение температуры внутри головы. Это объясняется тем, что установившаяся температура зависит, в частности, и от теплопроводности биологической среды. Отсюда можно сделать вывод, что расчет температуры внутри головы является важным при оценке степени воздействия СВЧ излучения на организм человека.

Ранее [6, 7] с помощью программы CST MWS была смоделирована сложная конфигурация корпуса сотового телефона, с крышкой и традиционной спиральной антенной, в свободном пространстве. Прототипом является телефон, измеренная величина SAR у которого равна 1.5 Вт/кг [6]. Расчет SAR с помощью программы CST MS показал хорошее совпадение с экспериментом [6].

Отметим одно из перспективных приложений данной технологии моделирования электромагнитных и тепловых процессов в биологическом теле. Известно, что в ряде современных медицинских приборов в области гипертермии нагрев биологического тела используется для достижения положительного эффекта. Программа CST MS позволяет моделировать эти сложные тепловые эффекты нагрева и рассчитывать распределения напряженности электрического поля и плотности потерь мощности внутри тела с соответствующим этому поглощению распределением температуры.

Выводы

Показано, что теплопередача биологического материала играет важную роль при моделировании эффекта поглощения мощности в голове человека при пользовании сотовым телефоном. При задании установившегося значения излучаемой мощности 200 мВт рассчитанное значение нагрева составляет примерно 2° по сравнению с температурой окружающей среды.

Данный подход является перспективным для проектирования современных медицинских приборов, например, в гипертермии (медицинская терапия), которая использует сфокусированное СВЧ излучение для локального нагрева ткани внутри тела до определенной температуры. Компьютерное моделирование и медицинское исследование в комплексе позволяют перевести лечение СВЧ излучением на качественно новый более высокий уровень.

Литература

- 1. Н.Н. Pennes**, Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm, J. Appl. Physiol., **1**, 93–122 (1948).
- 2. Paolo Bernardi, etc.** Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User. IEEE Trans. on MTT, Vol. 48, No.7, July 2000.
- 3. Hanus, M. Luong, F. Lethimonnier**, "Electromagnetics Fields and SAR Computations in a Human Head with a Multi-port Driven RF Coil at 11.7 Tesla", Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. **13** (2005).
4. Biological Effects in the cm/mm Wave Range, Part II/III.
5. IEEE C95.1-1991, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz", New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., April 1992.
- 6. Курушин А., Титов А.** Расчет мощности, поглощаемой в голове пользователя сотового телефона//CHIP NEWS. 2001. 8. С.40 45.

7. **Курушин А.А., Титов А.П.** Расчет антенной системы сотового телефона в присутствии биологического тела. LVII научная сессия посвященная дню радио. 15-16 мая 2002 г., Москва. Том 2, стр.97-99.
8. **Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.** Анализ и оптимизация трёхмерных СВЧ-структур с помощью HFSS М.: СОЛОН-Пресс, 2005. - 216 с.
9. **Antonio Faraone, Q. Baszano, D. Simunic.** Experimental Dosimetry in a Sphere of Simulated Brain Tissue Near a Half-Wave Dipole Antenna. IEEE Trans. On Veh. Tech., Vol. 44, pp. 390-403.
10. **J. Wang and O. Fujiwara,** "Reduction of electromagnetic absorption in the human head for portable telephones by a ferrite sheet attachment", IEICE Trans. Commun., vol. E80-B, no.12, pp.1810-1815, Dec. 1997.
11. **Калиничев В.И., Курушин А.А.** Микрополосковые антенны в сотовых телефонах. New Chips (Инженерная микроэлектроника), 2001, № 7, стр. 5-10.
12. **M.Pelosi, O.Franek, M.B.Knudsen, G.F.Pedersen, and J.B.Andersen.** Antenna Proximity Effects for Talk and Data Modes in Mobile Phones. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.52, No 3, June 2010, pp. 15-27.