

"ОСЛЕПЛЕНИЕ" МИЛЛИМЕТРОВЫМИ ВОЛНАМИ

При резком изменении яркости объектов или уровня их освещенности у наблюдателя временно нарушается зрительное восприятие этих объектов. Обнаружено возникновение подобного эффекта при воздействии миллиметровых волн на органы зрения. Устройство временного нелетального воздействия на человека построено на этом принципе.

Миллиметровые волны соответствуют диапазону частот от 30 до 300 ГГц, поэтому для них также используется термин крайневысокочастотное излучение (КВЧ-излучение). Характерной особенностью этого излучения является сильное поглощение в воде и водных растворах. Так после прохождения миллиметрового слоя воды излучение с длиной волны 8 мм ослабляется примерно в 100 раз и в 104 раз при длине волны 2 мм. Это обусловлено тем, что частоты вращательных движений молекул воды приходятся на эту область спектра электромагнитных волн. Поэтому происходит быстрая перекачка энергии электромагнитного поля в эти степени свободы молекул с последующим переходом энергии в тепло за счет межмолекулярных столкновений [1].

Кожа человека примерно на 60% состоит из воды, в роговице ее содержание еще больше – 75%, а передняя камера глаза заполнена водянистой влагой [2]. Поэтому основное поглощение миллиметровых волн происходит в приповерхностном слое этих биотканей, что при соответствующих уровнях облучения может вызвать значительный рост температуры. Как известно, при превышении порога тепловое ощущение сменяется болевым ощущением, интенсивность которого растет с увеличением степени нагрева вплоть до непереносимого уровня боли. Выяснение условий возникновения подобных болевых ощущений в роговице при воздействии КВЧ-излучения, т.е. когда можно говорить об "ослеплении" миллиметровыми волнами, стало целью работы.

Исходя из простой модели биоткани в виде полубесконечной среды с комплексной диэлектрической постоянной ϵ и используя закономерности распространения электромагнитных волн в такой среде [3], нетрудно найти выражение для плотности мощности тепловыделения, обусловленного поглощением энергии электромагнитного поля:

Н. Наумов, д.ф.-м.н.;
Д. Сосков, к.т.н., 12 ЦНИИ МО РФ

$$Y(z) = (1 - R) \frac{I}{\delta} e^{z/\delta} \quad (1)$$

Здесь $R = |(\sqrt{\epsilon} - 1)/(\sqrt{\epsilon} + 1)|^2$ – коэффициент отражения; I – плотность потока энергии (ППЭ) облучения; $\delta = ic/\omega(\sqrt{\epsilon} - \sqrt{\epsilon^*})$; c – скорость света; $\omega = 2\pi f$, f – частота волны; координата z отсчитывается от границы среды.

Очевидно, что величина δ характеризует глубину проникновения миллиметровых волн в биоткань. В работе [4] приводятся данные по зависимости диэлектрической постоянной различных биотканей от частоты электромагнитных волн. Используя данные по зависимости диэлектрической постоянной роговицы от частоты, можно построить аналогичную зависимость для глубины проникновения в среду с таким значением ϵ . Результаты расчета представлены на рис.1.

Поскольку толщина роговицы составляет 0,5 мм, то из полученных результатов следует, что излучение с частотой более 90 ГГц практически полностью поглощается в роговице. Поэтому для этих частот миллиметровых волн использование указанной выше модели среды является оправданным.

Температурное поле, возникающее в роговице при облучении миллиметровыми волнами, можно определить, решая уравнение теплопроводности. Если длительность воздействия не превышает 10 с, то, как показывают оценки характерных времен тепловых процессов, можно пренебречь влиянием как эффекта теплоотдачи с поверхности роговицы во внешнюю среду, так и внутренним теплопереносом, обеспечивающим соответствующий температурный режим в биотканях при отсутствии воздействия.

Для теплового источника пик распределения температуры находится на границе среды. Из решения уравнения теплопроводности следует, что температура поверхности роговицы следующим образом зависит от времени облучения:

$$T(t) = T_0 + \delta(1-R) \frac{I}{K} [\operatorname{erfc}(\sqrt{\beta t}) \exp(\beta t) + 2\sqrt{t} \frac{I}{K} - 1] \quad (2)$$

Здесь T_0 – температура роговицы при отсутствии воздействия; $\beta = K/\rho C \delta^2$; K , ρ , C – соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость роговицы; $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du - \text{интеграл вероятностей.}$$

На рис.2 представлены результаты расчета нагрева роговицы КВЧ-излучением с частотой 100 ГГц при $I=2,5 \text{ Вт/см}^2$ (зеленая кривая) и $I = 3 \text{ Вт/см}^2$ (красная кривая).

Как известно, если уровень тепловой стимуляции превышает пороговое значение, то возбуждаются терморепцепторы и появляется ощущение тепла. Функциональная зависимость между интенсивностью теплового ощущения и интенсивностью стимуляции определяется психофизическим законом Стивенса. Следует отметить, что это математическое описание субъективно оцениваемой интенсивности ощущения согласуется с объективно определяемой интенсивностью реакции сенсорных нейронов. Если сила стимула возрастает, то возрастает и амплитуда рецепторного потенциала, что вызывает соответствующие изменения частоты потенциалов действия. Соотношение между интенсивностью стимула и частотой импульсов описывается фигурирующей в законе Стивенса степенной функцией [5].

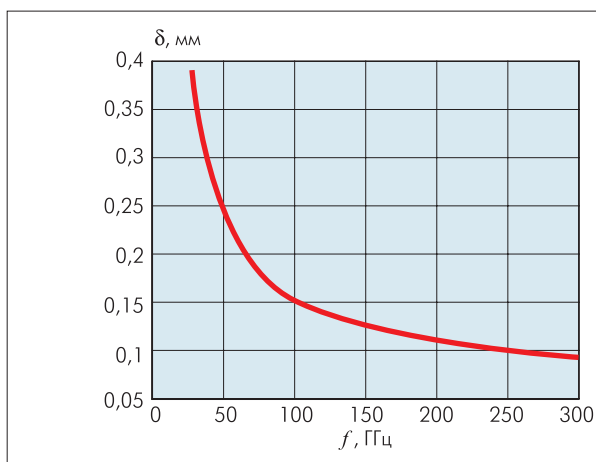


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения миллиметровых волн в роговицу от частоты излучения

При дальнейшем увеличении уровня тепловой стимуляции наступает превышение болевого порога; для кожи он составляет 45°C . Это приводит к возбуждению рецепторов боли, к которым относятся свободные нервные окончания [6]. В роговице тоже имеются свободные нервные окончания. Поэтому для оценки интенсивности болевых ощущений в роговице можно использовать аналогичные результаты для кожи. Такие результаты приводятся в работе [7], где на основе экспериментальных исследований получена зависимость интенсивности болевых ощущений, измеряемой в долях, от ППЭ теплового излучения для длительности облучения 3 с. Результаты этой работы, пересчитанные на температуру кожи, приведены на рис.3.

Как видно из рис.2 и 3, для излучения с частотой 100 ГГц и ППЭ $2,5 - 3 \text{ Вт/см}^2$ болевой порог достигается приблизительно через 1,5 с, а далее, через 3,5 – 4,5 с интенсивность частоты становится довольно близкой к порогу болеустойчи-

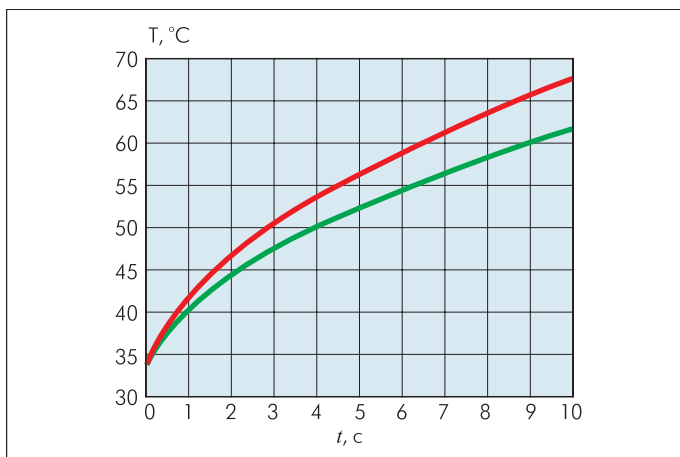


Рис.2. Изменение температуры поверхности роговицы при ППЭ $2,5 \text{ Вт/см}^2$ (зеленая кривая) и ППЭ 3 Вт/см^2 (красная кривая)

вости. В этом случае у человека будет возникать естественная реакция, заключающаяся в смыкании век, повороте головы, т.е. зрительное восприятие в направлении источника излучения становится невозможным.

Для живого организма боль играет особую роль; она предупреждает о том, что может произойти повреждение биотканей. Для оценки повреждающих уровней воздействия миллиметровых волн можно использовать результаты измерений длительностей контакта кожи с нагретой поверхностью, которые приводят к одинаковой степени повреждения кожи при различных значениях температуры этой горячей поверхности. На рис.4 представлена подобная зависимость, полученная интерполяцией экспериментальных значений длительностей воздействия, необходимых для достижения некроза эпидермиса кожи [8].

Из рис.2 и 4 видно, что для тех же условий воздействия критическая длительность облучения составляет 9–10 с. Таким образом, в течение некоторого промежутка времени после достижения состояния временного "ослепления" в биоткани не возникнут необратимые изменения, обусловленные воздействием КВЧ-излучения. Существование этого интерва-

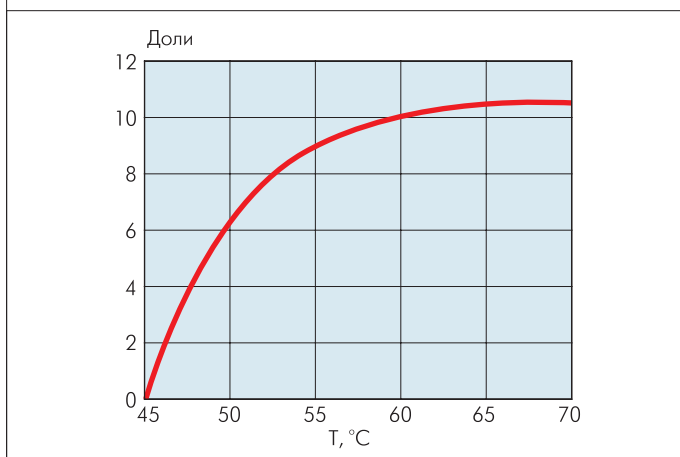


Рис.3. Зависимость интенсивности болевых ощущений в коже от ее температуры

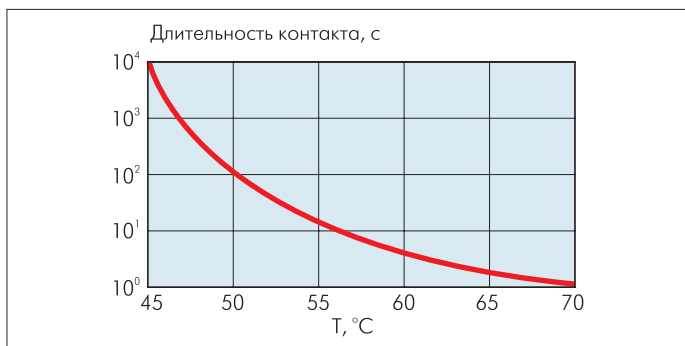


Рис.4. Зависимость повреждающей длительности контакта кожи с нагретой поверхностью от температуры этой поверхности

ла времени позволяет выбрать неповреждающий режим облучения и создать устройство [9] для временного "ослепления" органа зрения миллиметровыми волнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бецкий О.В.** Миллиметровые волны в биологии и медицине. – Радиотехника и электроника, 1993, №10.
2. **Кравков С.В.** Глаз и его работа. Изд-во АН СССР: Матлит, 1950.
3. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах.–М.: Наука, 1973.
4. **Gabriel C.** Compilation on the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037.
5. Основы сенсорной физиологии/Под ред. Р. Шмидта. – М.: Мир, 1984.
6. **Michaelson S.M., Lin J.C.** Biological effects and health implications of radiofrequency radiation. Plenum Press: New York and London, 1987.
7. **Hardy J.D., Wolff H.G., Goodell H.** Studies on pain: discrimination of differences of a pain stimulus as a basis of a scale of pain intensity. – J. of Clinic. Invest., 1947, v. 26.
8. **Moritz A.R., Henriques F.C.** Studies of thermal injury II. The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. – Am. J. of Pathology, 1947, v. 23.
9. **Анисимова О.В., Бойко Е.Н., Зайцев Д.В. и др.** Способ нелетального воздействия на органы зрения человека с помощью КВЧ-излучения и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2366885 от 10.09.09 г.