

УДК 621.316

О ПРИРОДЕ И МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Червинский Л.С., д.т.н.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Тел. (044) 527-85-22

Аннотация – на основе законов электродинамики проанализированы первичные механизмы действия энергии электромагнитного излучения на биологические объекты.

Ключевые слова – энергия, электромагнитное излучение, биологические структуры, механизм действия.

Постановка проблемы. В современном технотронном развитии человеческого общества все большее влияние оказывают на жизнь биологических организмов различные электромагнитные излучения. Понимание их природы и механизмов воздействия есть актуальной задачей.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Используя законы классической электродинамики изучить первичные механизмы взаимодействия электромагнитного излучения со структурами биологических объектов. Методика и материалы исследования изложены на основе использования положений системного анализа и современных знаний об электромагнитном излучении.

Основная часть. Согласно теории Максвелла изменения в материальной среде пространственной конфигурации электрического поля порождаются изменением во времени магнитного поля. Изменения же в среде пространственной конфигурации магнитного поля порождаются как изменением во времени электрического поля (токами смещения), так и обычным током проводимости. Источниками в материальной среде электрического поля являются электрические заряды (согласно закону Кулона), а вот источников магнитного поля (магнитных зарядов, или, как их еще называют, магнитных монополей) в природе еще не обнаружено. Общее электромагнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами, но если просто движущийся с постоянной скоростью электрический заряд порождает стационарное магнитное поле, то заряд, движущийся с ускорением, и, в частности, колеблющийся в пространстве заряд (при колебаниях за-

ряд постоянно то разгоняется, то тормозит и меняет направление своего движения на противоположное), порождает переменное электромагнитное поле.

В этом переменном поле отдельно его электрическая и магнитная составляющие как бы постоянно порождают друг друга в пространстве, поэтому поле может распространяться на большие расстояния от места расположения источника. При очень малых ускорениях и медленных колебаниях зарядов поле в пространстве практически неотличимо от соответствующих стационарных электростатического и магнитостатического полей. Если же ускорение зарядов резко возрастает, это приводит к резким «всплескам» электромагнитного поля в пространстве около заряда. Поскольку при изменении электрической и магнитной составляющих поля они взаимно снова порождают друг друга то, на расстоянии чуть дальше от источника, весь «всплеск» или импульс поля плавно перемещается в пространстве как единое целое. Так порождается и распространяется в пространстве материальной среды *электромагнитная волна*.

Наглядно представить себе распространение электромагнитной волны можно с помощью изображения изменения силовых линий магнитного и электрического полей (E и H) в пространстве (рис. 1). Эти линии, в общем случае однородной и изотропной диэлектрической среды, перпендикулярны направлению распространения волны и перпендикулярны друг другу, т.е. электромагнитная волна является волной поперечных колебаний векторов E и H в пространстве. Плоскость колебаний вектора E определяет так называемую *плоскость поляризации* электромагнитной волны. Это очень важное понятие. Поляризованной считается волна, у которой есть какое-либо одно выделенное направление (плоскость), в котором преимущественно и совершает колебания вектор E . Если он все время совершает колебания в одной и той же плоскости, как бы вдоль одной прямой линии, как показано на рис. 1, то говорят, что волна «линейно поляризована».

В случае, когда вектор E по пути своего распространения меняет плоскость поляризации (например, он может в пространстве закручиваться подобно штопору) говорят о «круговой поляризации» волны. Если же вектор E произвольным образом (хаотически) во времени меняет свою плоскость поляризации, такая волна считается неполяризованной. Вектор H при этом будет всегда в каждый конкретный момент времени оставаться перпендикулярным вектору E , т.е. он также будет менять свою плоскость колебаний (плоскость поляризации), следуя за E . Электромагнитная волна, как и любой другой волновой процесс, характеризуется скоростью своего распространения V и частотой колебаний (ω или ν), периодом колебаний T и длиной волны в пространстве λ .

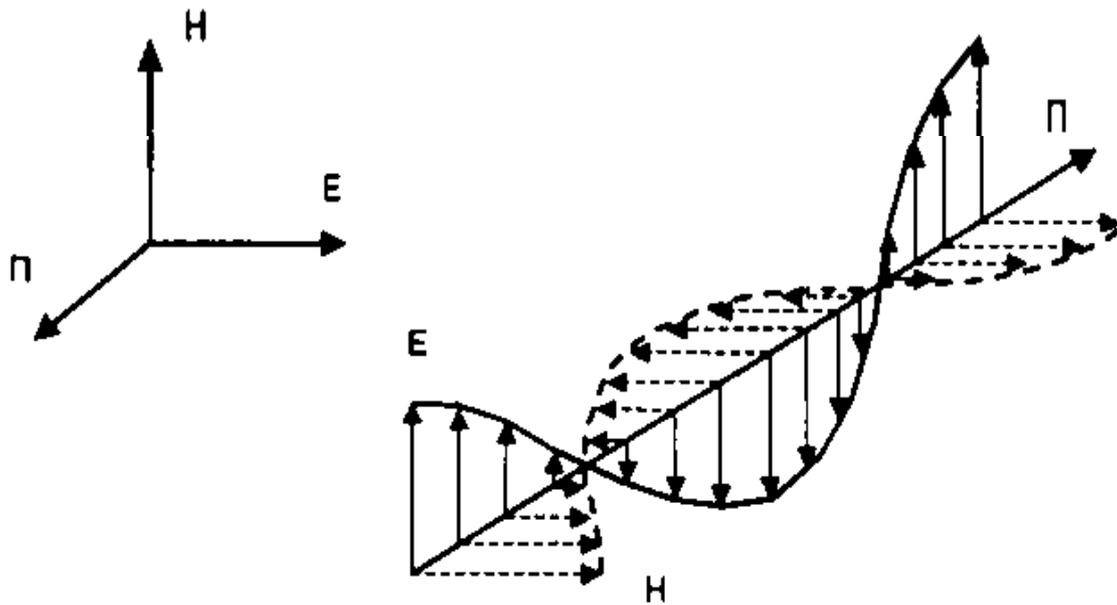


Рис.1. Электромагнитная волна в диэлектрической среде.

Она также несет с собой и энергию поля, но для практических задач по изучению взаимодействия электромагнитной энергии и биологических объектов удобнее характеризовать электромагнитную волну через ее поверхностную плотность мощности, т.е. энергию, удельную во времени и одновременно удельную по площади поверхности, на которую эта волна падает. Для этого используется *вектор Π* (в классической электродинамике вектор Пойтинга, а во многих русскоязычных (советских) руководствах вектор Умова-Пойтинга):

$$\Pi = [E \times H] \quad (1)$$

где Π – вектор (мгновенное значение) поверхностной плотности мощности электромагнитной волны (Вт/м^2).

В квадратных скобках указана операция векторного перемножения векторов E и H . Тройка векторов E , H и Π образует пространственную тройку векторов, как показано на рис. 1. В практических расчетах для определения мощности, которая падает на площадку S облучаемой поверхности, надо модуль вектора Π умножить на площадь поверхности S и найти среднее значение этого произведения за период колебаний волны. Модуль среднего значения вектора Π можно ε через модули векторов E и H следующим образом:

$$\Pi = \frac{1}{2} E^2 \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} = \frac{1}{2} H^2 \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} \quad (2)$$

где $\varepsilon \varepsilon_0$ и $\mu \mu_0$ – электрические и магнитные проницаемости среды и вакуума, соответственно.

Для любых изотропных (однородных) сред из выражения (2) следует, что модули векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} связаны между собой простым соотношением:

$$E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} = H\sqrt{\mu\mu_0} \quad (3)$$

При изучении влияния магнитной составляющей электромагнитного поля на биологические объекты более употребительной величиной является вектор магнитной индукции \mathbf{B} , с учетом формулы (3) можно представить в виде:

$$E\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0} = B, \quad (4)$$

где B — модуль вектора магнитной индукции (Тл).

Из уравнений Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитной волны (скорость переноса энергии, соответственно) в любой изотропной материальной среде можно определить по формуле:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} \quad (5)$$

Для вакуума эта скорость точно определяется введенными двумя фундаментальными физическими константами ε_0 и μ_0 , так как $\varepsilon = \mu = 1$ и равняется скорости света c :

$$v_{\text{вакуума}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = c \quad (6)$$

Попробуйте убедиться в этом и вычислить ее самостоятельно. С учетом (5), кстати, соотношение (4) можно записать как:

$$E = B \cdot v \quad (7)$$

Это соотношение справедливо для любых случаев однородных и изотропных материальных сред, если рассматривается, конечно, единая электромагнитная волна, а не отдельно электростатическое и магнитостатическое поля. Постоянные электрические и магнитные поля, обладая собственной энергией поля, не осуществляют ее перенос в пространстве. В материальной среде при обычных условиях скорость распространения электромагнитной волны будет меньше скорости света в вакууме, т.е. $v < c$. Отношение этих скоростей называется *коэффициентом преломления среды* n^* .

$$n^* = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (8)$$

Именно коэффициентом преломления определяются свойства и особенности материальной среды по взаимодействию с электромагнитной волной, которая в нее проникает и распространяется. Причем, коэффициент преломления является сложной (*комплексной*) функцией диэлектрических и электропроводных свойств среды. Например, если материальная среда является идеальным диэлектриком (изолятором),

то $n^* = n$ – обычная действительная величина, определяемая по (8) через действительные величины ε и μ .

Идеальные диэлектрики просто пропускают через себя электромагнитную волну без потерь энергии. Потери же электромагнитной энергии происходят только в реальных, проводящих ток средах. А все биологические ткани, особенно жидкости, как раз и являются реальными материальными средами, в той или иной степени проводящими электрические токи. Поэтому целесообразно ввести понятие *импеданса среды*, который характеризует свойства среды «сопротивляться» прохождению сквозь нее электромагнитной волны. Импеданс среды Z определяется выражением:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} \quad (9)$$

Измеряется он в Омах, как и сопротивление в электрических цепях. Установлено, что для вакуума (при $\varepsilon = \mu = 1$) импеданс равен примерно 377 Ом. Все другие среды имеют, как правило, меньшее сопротивление (так как обычно $\varepsilon > \mu$). В теоретической электродинамике импеданс называют ещё *волновым сопротивлением* среды, в отличие от обычного электрического сопротивления проводников с током. Волновое сопротивление отвечает за поглощение энергии электромагнитных волн в среде. Проходя материальную среду, электромагнитные волны наводят в ней электрические токи и магнитные поля. Электрические токи преодолевают сопротивление среды, магнитные поля ослабляются, и энергия волны, в общем случае, теряется или преобразуется. Происходит, например, нагрев среды. Принцип действия СВЧ печей основан именно на этом явлении. Это же явление положено и в основу физиотерапевтического действия процедур УВЧ терапии для людей или сельскохозяйственных животных, а также для электротехнологий передпосевной обработки зерновых культур.

Волновое сопротивление среды, вследствие частотной зависимости параметров среды ε и μ , является также функцией частоты колебаний электромагнитной волны ν , поэтому волны разной частоты по-разному взаимодействуют с материальной средой и имеют разную способность распространяться в окружающем пространстве. На рис. 2 представлен спектр электромагнитных излучений в зависимости от частоты или длины волны колебаний.

При падении волны электромагнитного излучения на поверхность облучаемого тела (границу раздела двух различных сред), согласно волновой теории света и теории электромагнетизма Максвелла учитывают *коэффициент отражения* r_λ , который определяется ком-

плексним коефіцієнтом преломлення среды n^* (см. формулу (8)) или, что то же самое, ее импедансом (9).

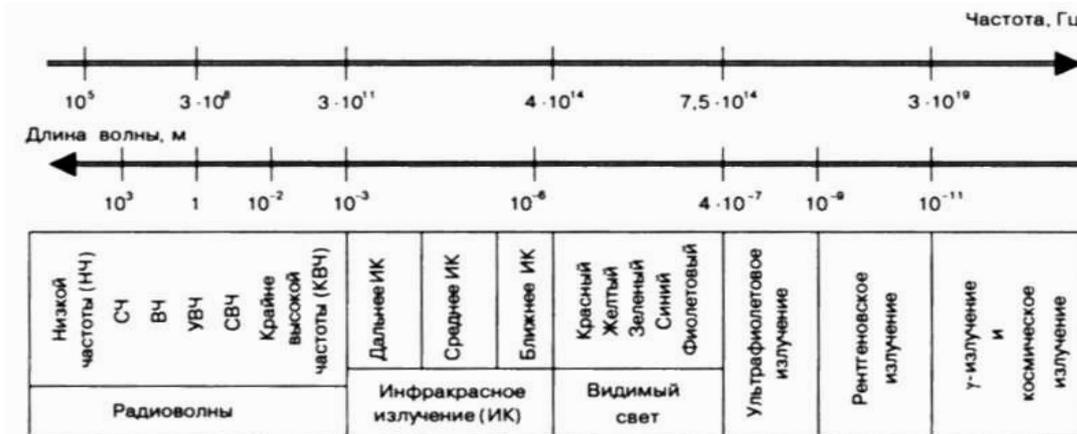


Рис.2. Спектр электромагнитных колебаний.

При падении излучения из среды 1 в среду 2 перпендикулярно границе раздела сред поляризация излучения не имеет значения, и коэффициент отражения r может быть вычислен по упрощенной формуле Френеля:

$$r = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (10)$$

где Z_1 и Z_2 – импеданс сред 1 и 2, соответственно.

Если излучение падает на среду из вакуума (воздуха), то с большой степенью точности можно выразить импеданс среды через относительный комплексный показатель преломления, вернее, через его отдельные части n и σ . Тогда (10) может быть записано в виде:

$$r = \frac{(n-1)^2 + \sigma^2}{(n+1)^2 + \sigma^2} \quad (11)$$

где n – действительная часть показателя преломления;

σ – параметр проводимости среды (проводимости для переменного электрического тока, с данной частотой колебаний).

Сильно отражать излучение могут, только хорошо проводящие ток материалы и среды ($\sigma \gg 0$). Именно поэтому хорошо отражают свет полированные металлы (до 90...95%). Поверхность стекла имеет коэффициент отражения порядка 51%. В биологических тканях основными проводниками тока являются растворы электролитов (кровь, например). Ее проводимость существенно меньше, чем у металлов. Поэтому ожидать больших коэффициентов отражения электромагнитного излучения от биологических тканей не приходится.

Мощность W , падающая на какую либо площадку S , создает облученность этой площадки, соответствующую пространственной

плотности мощности излучения в электродинамике, т.е. модулю вектора Умова-Пойтинга:

$$P = \frac{W}{S} \quad (12).$$

Выводы. Все изложенные здесь явления и действующие физические факторы присущи электромагнитным излучениям любой частоты колебаний, в том числе и оптическому излучению. Свет – это обычная электромагнитная волна. Если инфракрасный свет (излучение), проходя сквозь материальную среду (биологическое тело), сильно поглощается в ней, то среда нагревается, так как поглощенная энергия в среде переходит главным образом в тепловую через колебания молекул. Но это не значит, что биоткань не нагревается похожим образом от излучения зеленого диапазона спектра, красного или даже СВЧ. Любое поглощенное излучение в той или иной степени переходит в тепло вызываемое колебаниями соразмерных структур биологического облучаемого объекта. СВЧ-печи («микроволновки») и УВЧ-терапия прямое тому подтверждение. Если говорят об интерференции (наложении волн с учетом их фазы) для света, то это означает, что интерферировать могут и любые другие переменные электрические токи в тканях, а также переменные магнитные поля. Это же касается и рассеяния, отражения, поглощения. Просто свет – очень наглядный (в буквальном смысле этого слова) пример, с помощью которого легко представить все другие электромагнитные волновые явления и изучить их внутреннюю логику и взаимосвязь.

Следует также отметить, что все изложенное выше характерно для электромагнитного излучения сравнительно невысоких уровней плотности энергии. При высоких уровнях энергии электромагнитных излучений проявляются квантовые свойства (воздействие на структуры биологической среды как от потока движущихся материальных частиц (квантов)), что наглядно изучается на ультрафиолетовом, рентгеновском или гамма излучениях, но уже законами квантовой биофизики.

Литература

1. *Вестерхофф Х.* Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах / *Х. Вестерхофф, К. Ван Дам* // Пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 686 с.
2. *Вихман Э.* Квантовая физика / *Э. Вихман* // Пер. с англ. – 3-е изд. испр. – М.: Наука, 1986. – 392 с.
3. *Владимиров Ю.А.* Физико-химические основы фотобиологических процессов / *Ю.А. Владимиров, А.Я. Потапенко.* – М.: Высшая школа. 1989. – 199 с.
4. *Биофизика* / [*Ю.А. Владимиров, Д.И. Рошупкин, А.Я. Потапенко, А.И. Леев*]. – М.: Медицина, 1983. – 272 с.

5. *Волькенштейн М.В.* Биофизика / *М.В. Волькенштейн.* – М.: Наука, 1981. – 575 с.
6. *Кузнецов А.Н.* Биофизика электромагнитных воздействий (Основы дозиметрии) / *А.Н. Кузнецов.* – М.: Энергоатомиздат. 1994. – 256 с.
7. *Рубин А.Б.* Биофизика: Теоретическая биофизика / *А.Б. Рубин.* – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 448 с.
8. *Рубин А.Б.* Биофизика: Биофизика клеточных процессов / *А.Б. Рубин.* – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 469 с.
9. *Самойлов В.О.* Элементы квантовой биофизики / *В.О. Самойлов.* – СПб: Изд-во СПб ГТУ, 2001. – 44 с.
10. *Самойлов В.О.* Медицинская биофизика / *В.О. Самойлов.* – СПб.: Спец-Лит, 2004. – 496 с.

ПРО ПРИРОДУ І МЕХАНІЗМ ДІЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Червiнський Л.С.

Анотація

На основі біофізики проаналізовано первинні механізми дії енергії оптичного випромінювання на структури біологічних об'єктів.

THE NATURE AND MECHANISM OF ACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

L. Chervinskiy

Summary

There was analyzed the primary mechanisms of action energy optical radiation on the structure of biological objects with help of biophysics.