

Электричество,  
электромагнитные волны и  
магнетизм

# Раздел IV. Электромагнитные волны

## IV.1. Некоторые основные положения теории Максвелла об электромагнитном поле

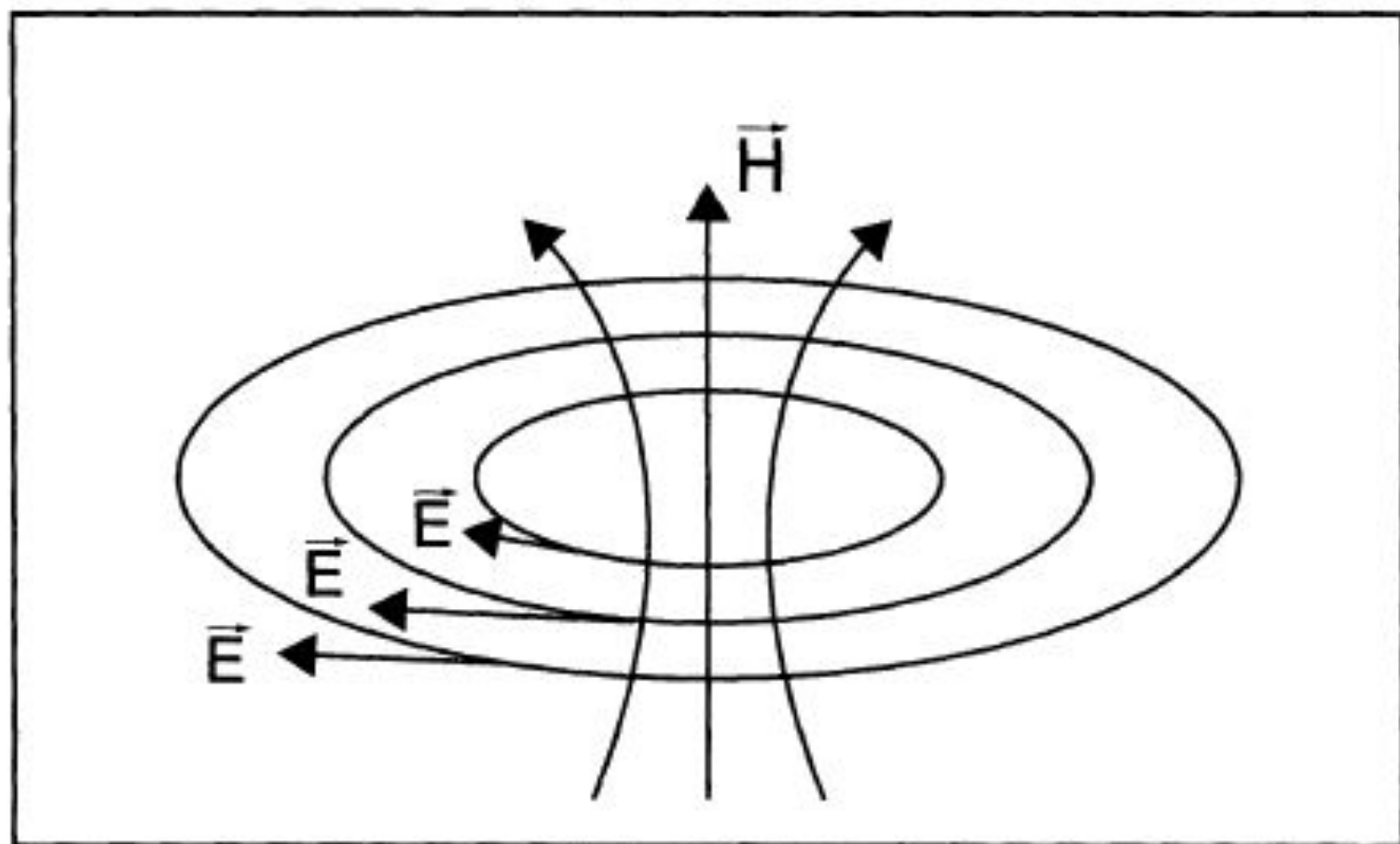
Стройное и последовательное изложение теории электромагнитного поля представил английский физик Д. Максвелл (1831–1879). Основные положения электродинамики Максвелл записал в компактной математической форме, сегодня они известны как уравнения Максвелла. Поскольку для записи и понимания этих уравнений требуется хорошее знание векторного анализа и математической теории поля, мы ограничимся словесной формулировкой их физического смысла.

Первое уравнение Максвелла является обобщением известного из курса физики средней школы закона электромагнитной индукции Фарадея: изменение напряженности магнитного поля  $H$  приводит к появлению вихревого\* электрического поля напряженности  $E$ . На рис. IV.1 показано магнитное поле, силовые линии которого находятся в плоскости рисунка.

Предполагается, что оно возрастает  $\frac{\partial H}{\partial t} > 0$ . Тогда в плоскости, перпендикулярной рисунку, следует изображать силовые линии возникшего вследствие изменения  $H$  вихревого электрического поля напряженностью  $E$ . Математическая запись этого положения в простейшем случае имеет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\mu_0 \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (\text{IV.1})$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная примерно  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. В левой части производная напряженности электрического поля по координате  $x$  показывает быстроту изменения напряженности в пространстве при переходе от одной точки к другой. В правой части — производная по времени от напряженности магнитного поля, отличие которой от нуля является причиной возникновения вихревого электрического поля.



**Рис. IV.1.** Переменное магнитное поле ( $\vec{H}$ ) порождает вихревое электрическое поле ( $\vec{E}$ ).

Второе уравнение Максвелла является утверждением, в некотором смысле обратным первому: изменение напряженности электрического поля приводит к возникновению магнитного поля. Это показано на рис. IV.2 и в математической форме в простейшем случае может быть записано так:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (\text{IV.2})$$

В формуле (IV.2)  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная ( $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м), в левой части — величина, показывающая скорость изменения напряженности магнитного поля в пространстве при переходе от точки к точке, а в правой — производная напряженности электрического поля по времени, отличие от нуля которой может рассматриваться в качестве причины возникновения магнитного поля.

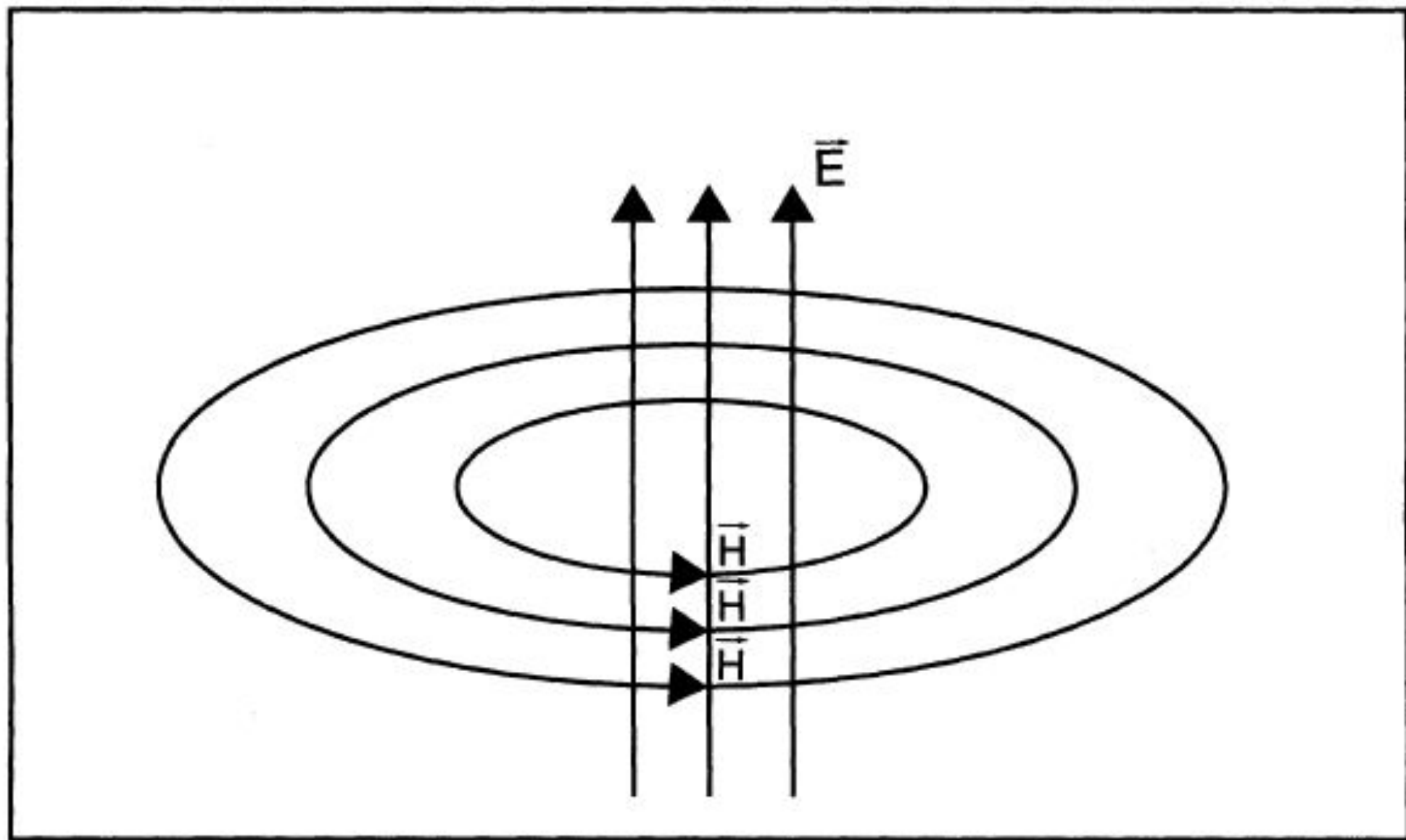


Рис. IV.2. Переменное электрическое поле ( $\vec{E}$ ) порождает магнитное поле ( $\vec{H}$ ).

## IV.2. Электромагнитные волны

Из теории Максвелла, в частности, следует, что если в некоторой точке пространства совершает гармонические колебания электрический заряд, то он является источником электромагнитной волны.

Предположим, что в некоторой точке с координатой  $x = 0$  колеблется заряд и создаваемое им электрическое поле изменяется по гармоническому закону:

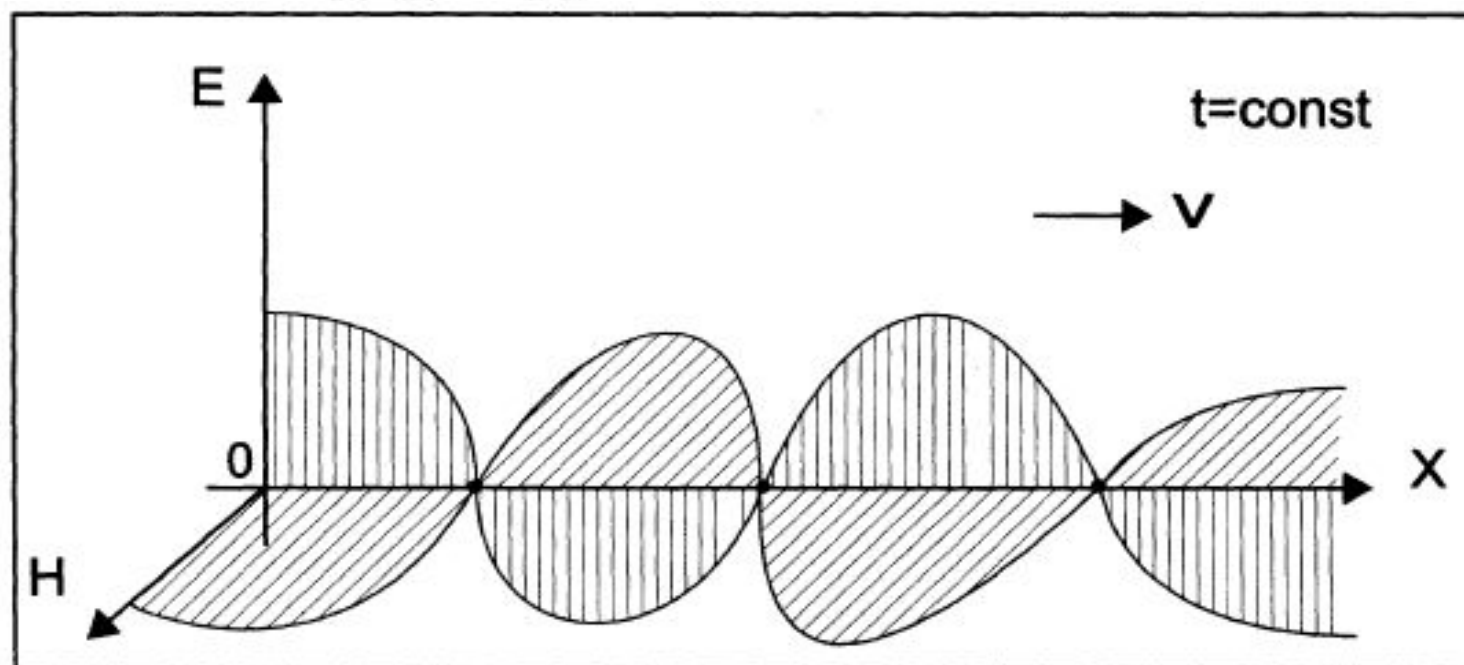
$$E = E_0 \cdot \sin \omega t. \quad (\text{IV.3})$$

Электромагнитное поле будет распространяться вдоль оси  $X$ , и следовательно, в какой-либо точке  $B$  на линии, удаленной на расстояние  $x$  от точки  $x = 0$ , также возникнут гармонические колебания поля. Однако распространение поля происходит с конечной скоростью  $v$ , так что колебания в точке  $B$  будут запаздывать относительно колебаний в начальной точке на время распространения импульса  $\tau = \frac{x}{v}$ . Следовательно, колебания электрического поля в точке с координатой  $x$  запишутся в виде:

$$E(x, t) = E_0 \cdot \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right]. \quad (\text{IV.4})$$

Можно показать, что максимумы электрического поля при распространении электромагнитного импульса совпадают с максимумами магнитного поля. Следовательно, колебания магнитного поля в точке с координатой  $x = 0$  будут записываться в виде  $H = H_0 \cdot \sin \omega t$ , а в точке с координатой  $x$ :

$$H(x, t) = H_0 \cdot \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right]. \quad (\text{IV.5})$$

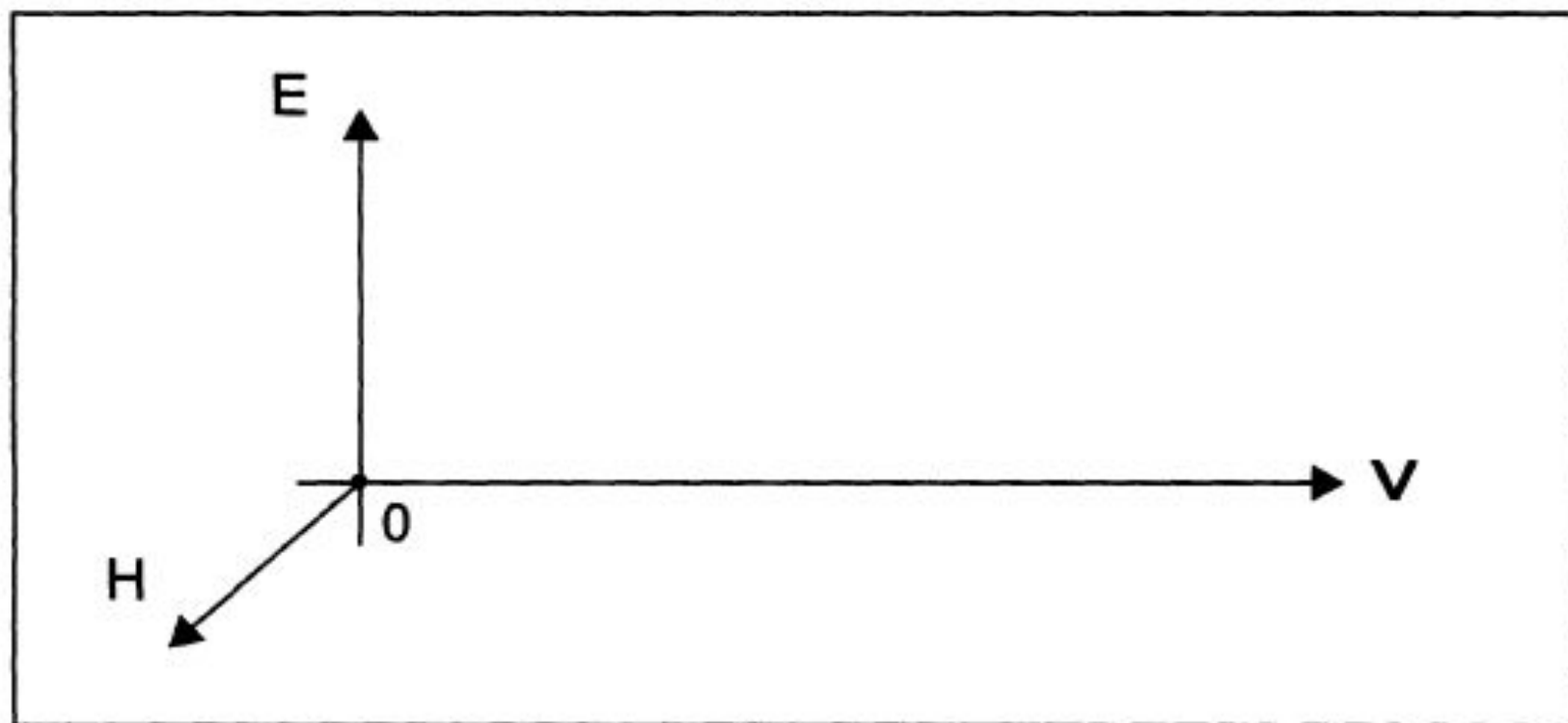


**Рис. IV.3.** Направления и величины напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей в плоской гармонической электромагнитной волне в точках с различными координатами  $x$ ;  $v$  — скорость распространения волны.



Эти формулы выражают законы изменения электрического и магнитного полей в волне, распространяющейся в одном определенном направлении, а именно в положительном направлении оси  $X$ . Они называются уравнениями плоской гармонической электромагнитной волны.

На рис. IV.3 представлена «фотография» такой волны, на ней показано, чему в некоторый фиксированный момент времени равны и куда направлены в каждой точке векторы напряженности электрического и магнитного полей.



**Рис. IV.4.** Взаимное расположение векторов напряженностей электрического и магнитного полей и скорости распространения волны.

Видно, что в любой точке оси  $X$  они перпендикулярны друг другу, а также скорости распространения волны:  $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{v}$  (рис. IV.4).

Как и в механической волне, длина электромагнитной волны — это расстояние между двумя ближайшими максимумами и расстояние, на которое волна распространяется за время, равное периоду колебаний  $T$ :  $\lambda = v T$ .

Тогда между длиной волны, скоростью ее распространения и частотой существует связь:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (\text{IV.6})$$

Из теории Максвелла также следует, что скорость распространения электромагнитных волн в вакууме вычисляется по формуле:

$$v_{\text{вак}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (\text{IV.7})$$

Подставив в формулу (IV.7) значение универсальных постоянных, получим, что она равна примерно  $3 \cdot 10^8$  м/с и называется скоростью света. В дальнейшем мы будем обозначать эту величину буквой  $c$ :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} . \quad (\text{IV.8})$$

В веществе эта скорость уменьшается:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} . \quad (\text{IV.9})$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость рассматриваемой среды;  $\mu$  — ее магнитная проницаемость.

Как и для механических волн, в данном случае вводится величина плотности потока энергии, которая вычисляется по формуле:

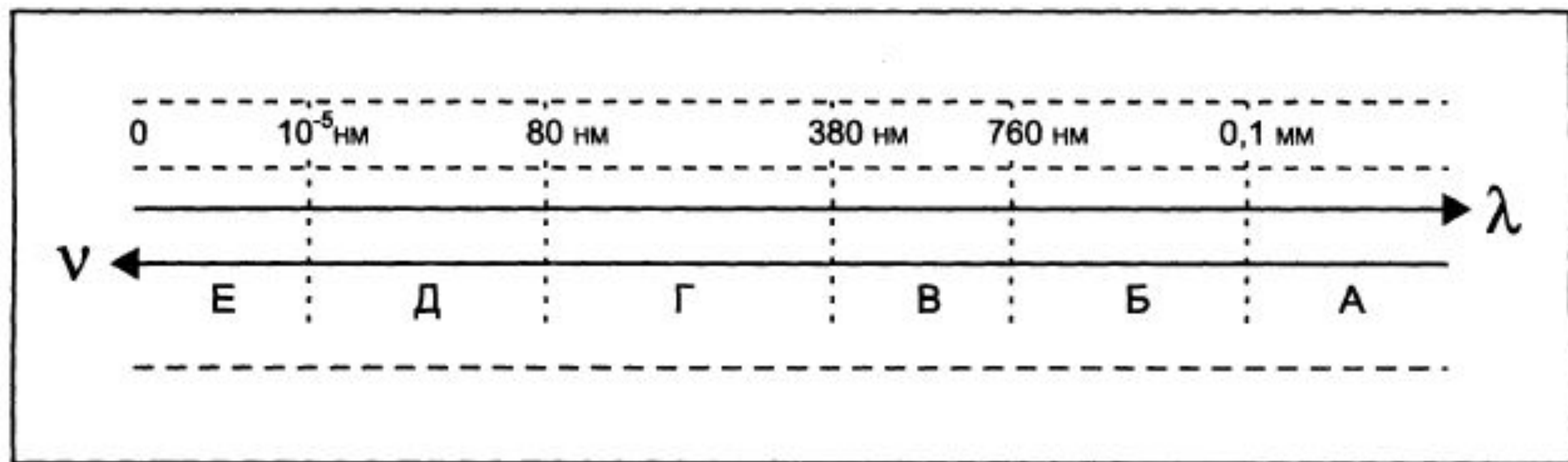
$$\vec{j} = [\vec{E} \cdot \vec{H}] . \quad (\text{IV.10; вектор Пойтинга})$$

### **IV.3. Шкала электромагнитных волн**

Деление всех электромагнитных волн на ряд диапазонов (в зависимости от их частоты и длины волны в вакууме) стало традиционным в физике. В первом приближении различают радиоволны (А), инфракрасное (Б), видимое (В), ультрафиолетовое (Г), рентгеновское (Д) и гамма-излучение (Е) (рис. IV.5).

Рассмотрим источники излучений различных типов:  $\gamma$ -лучи возникают при переходе атомных ядер из возбужденных состояний в невозбужденные, рентгеновское излучение — при торможении первоначально ускоренных электронов при попадании в вещество и при переходах электронов в тяжелых атомах с внешних на внутренние орбиты. Ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные лучи также возникают при различных переходах в атомах и молекулах вещества. Основными источниками радиоволн на Земле служат различные электрические явления, происходящие в атмосфере, радиоизлучение Солнца, а также радиовещательные и телевизионные станции, радиолокаторы, системы связи.

Электромагнитные излучения всех видов так или иначе находят применение в медицине.  $\gamma$ -Излучение используют в диагностике ряда заболеваний (например, регистрируя радиоактивное излучение введенного в организм радионуклида, можно локализовать ряд участков и областей в организме человека, в которых имеется патология), а также в терапии. Благодаря различному ослаблению рентгеновских лучей различными тканями организма их также можно использовать для диагностики внутренней патологии, получая рентгеновские изображения внутренних органов. Видимые, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи вызывают в различных структурах фотобиологические процессы, видимый свет обуславливает реакции



**Рис. IV.5.** Шкала электромагнитных излучений (возрастание длины волны слева направо обуславливает уменьшение ее частоты).



фотосинтеза в растениях; тепловой эффект инфракрасного излучения применяют для лечения заболеваний поверхностных тканей (глубиной около 20 мм), для активации метаболизма в тканях и т.п. Первичное действие ультрафиолетовых лучей на кожу связано с фотохимическими реакциями. Ультрафиолетовые лучи в диапазоне  $315 \leq \lambda \leq 380$  нм способствуют образованию из дегидрохолестерина кожи витамина D, участвующего в фосфорно-кальциевом обмене; небольшие дозы ультрафиолетовых лучей в диапазоне  $280 \leq \lambda \leq 315$  нм, проникая на глубину около 0,1–1 мм, вызывают эритему – интенсивное покраснение кожи, переходящее в загар. Наконец, короткие ультрафиолетовые лучи (200–280 нм) оказывают бактерицидное действие.

Эффект нагревания тканей организма радиоволнами сегодня широко используют в медицине при проведении физиотерапевтических процедур с помощью аппаратов ультравысокочастотной и высокочастотной терапии\* и индуктотермии.

Так, при УВЧ-терапии на ту или иную область тела помещают два плоских изолированных электрода, не касающихся тела (получаются обкладки конденсатора). Под воздействием переменного электромагнитного поля в тканях возникают токи проводимости и в соответствии с законом Джоуля–Ленца выделяется количество теплоты  $Q$ :

$$Q = \frac{k \cdot E_{\text{эф}}^2 \cdot V \cdot \Delta t}{\rho}, \quad (\text{IV.11})$$

где  $E_{\text{эф}}$  — эффективное значение напряженности воздействующего на организм электрического поля;  $\rho$  — удельное сопротивление ткани  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $V$  — объем прогреваемой ткани;  $\Delta t$  — время процедуры.

Это рассмотрение соответствовало проводящим тканям; в тканях-диэлектриках под действием переменного электрического поля происходит поляризация молекул. Вращательные колебания поляризованных молекул, колебания ионов и ионных групп в крупных молекулах, вызываемые переменным электрическим полем, отстают по фазе от колебаний самого этого поля. Энергия электрического поля, затрачиваемая на преодоление сил связи между молекула-

ми, ионами и т.п., преобразуется в тепловую. Количество выделяемой теплоты рассчитывают по формуле:

$$Q = \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\text{эф}}^2 \cdot V \cdot \text{tg} \delta \cdot \Delta t, \quad (\text{IV.12})$$

где  $E_{\text{эф}}$  — эффективное значение напряженности воздействующего на ткань переменного электрического поля  $\left( E_{\text{эф}} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right)$ ;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\omega$  — циклическая частота изменения величины поля;  $V$  — объем прогреваемой ткани;  $\Delta t$  — время процедуры;  $\text{tg} \delta$  — величина, определенным образом связанная с разностью фаз колебаний электрического тока и напряжения в цепи, содержащей генератор и прогреваемую ткань.

В индуктотермии для воздействия на организм используют переменное высокочастотное магнитное поле. При этом в токопроводящих тканях (содержащих растворы электролитов) по закону электромагнитной индукции возникают замкнутые вихревые токи и их энергия преобразуется в тепловую. Переменное магнитное поле дает тепловой эффект, и количество выделяемой теплоты вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{k}{\rho} \cdot \omega^2 \cdot V_{\text{эф}}^2 \cdot \Delta t. \quad (\text{IV.13})$$

Все входящие в формулу величины рассмотрены выше. Требуется пояснений только  $V_{\text{эф}}$  — это эффективное значение индукции магнитного поля, которое в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудного значения.

## **IV. 4 Свойства электромагнитных волн**

***Электромагнитная волна - электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве и переносящие энергию.***

Особенности электромагнитных волн, законы их возбуждения и распространения описываются уравнениями Максвелла (которые в данном курсе не рассматриваются). Если в какой-то области пространства существуют электрические заряды и токи, то изменение их со временем приводит к излучению электромагнитных волн. Описание их распространения аналогично описанию механических волн.

Если среда однородна и волна распространяется вдоль оси  $X$  со скоростью  $v$ , то электрическая ( $E$ ) и магнитная ( $B$ ) составляющие

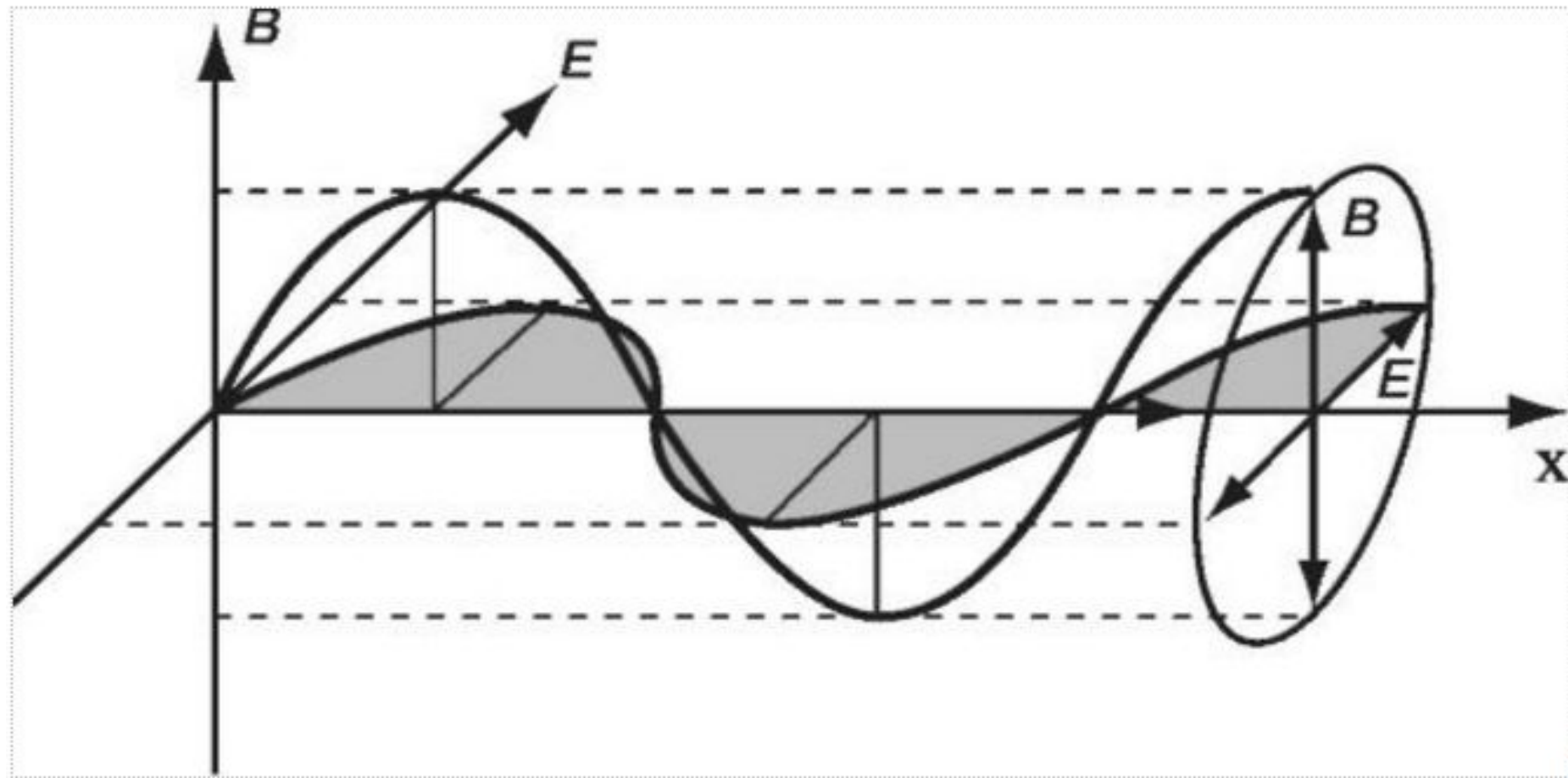
поля в каждой точке среды изменяются по гармоническому закону с одинаковой круговой частотой ( $\omega$ ) и в одинаковой фазе (уравнение плоской волны):

$$E = E_m \cos[\omega(t - x/v)], \quad (16.1)$$

$$B = B_m \cos[\omega(t - x/v)], \quad (16.2)$$

где  $x$  — координата точки, а  $t$  — время.

Векторы  $B$  и  $E$  взаимно перпендикулярны, и каждый из них перпендикулярен направлению распространения волны (ось  $X$ ). Поэтому электромагнитные волны являются поперечными (рис. 16.1).



**Рис. 16.1.** Взаимное расположение векторов  $E$ ,  $B$  в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль оси  $X$



Модули векторов  $E$  и  $B$  в плоской электромагнитной волне связаны соотношением  $\varepsilon_0 \varepsilon E^2 = B^2 / \mu_0 \mu$ .

Скорость распространения электромагнитной волны зависит от относительной диэлектрической ( $\varepsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостей среды и определяется формулой

$$v = 1 / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu} = c / \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (16.3)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м и  $\mu_0 = 12,6 \times 10^{-7}$  Гн/м – электрическая и магнитная постоянные,  $c$  – скорость электромагнитных волн в вакууме, равная  $c = 1 / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 3 \times 10^8$  м/с.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости распространения света (это послужило основанием для создания Максвеллом *электромагнитной теории света*).

Учитывая, что абсолютный показатель преломления среды равен  $n = c/v$ , можно установить связь между  $\eta$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ :

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (16.4)$$

## *Свойства* электромагнитных волн:

- поперечные;
- скорость распространения в вакууме не зависит от частоты;
- частичное поглощение волн диэлектриком;
- практически полное отражение волн от металлов;
- преломление волн на границе диэлектриков;
- интерференция, дифракция волн.

## IV. 5 Энергетические характеристики электромагнитной волны

Энергетические характеристики электромагнитных волн по своему смыслу совпадают с энергетическими характеристиками механических волн (раздел 2.4).

Среда, в которой распространяется волна, обладает электромагнитной энергией, складывающейся из энергий электрического и магнитного полей.

**Объемная плотность энергии** электромагнитного поля ( $w$ ) - суммарная энергия электрического и магнитного полей в единице объема среды:

$$w_{\text{ЭМ}} = w_{\text{Э}} + w_{\text{М}} = \varepsilon\varepsilon_0 E^2/2 + B^2/2\mu\mu_0. \quad (16.5)$$

Плотности энергий электрического и магнитного полей в электромагнитной волне одинаковы:

$$\varepsilon\varepsilon_0 E^2/2 = B^2/2\mu\mu_0. \quad (16.6)$$

Поэтому для объемной плотности энергии электромагнитного поля можно записать несколько эквивалентных выражений:

$$w_{\text{ЭМ}} = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = B^2/\mu\mu_0 = B \times E \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu_0\mu}. \quad (16.7)$$

Распространение электромагнитных волн, как и распространение механических волн, сопровождается переносом энергии.

**Поток энергии ( $\Phi$ )** - величина, равная энергии, переносимой электромагнитной волной через данную поверхность за единицу времени:

$$\Phi = dE/dt, [\text{Вт}]. \quad (16.8)$$

**Интенсивность волны** или плотность потока энергии ( $I$ ) – величина, равная потоку энергии, переносимой электромагнитной волной через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:

$$I = \Phi/S, [\text{Вт}/\text{м}^2]. \quad (16.9)$$

Как и для механических волн, интенсивность электромагнитной волны выражается через скорость распространения и объемную плотность энергии:

$$I = w_{\text{ЭМ}} \cdot v = B \cdot E \cdot \sqrt{\epsilon\epsilon_0/\mu_0\mu}. \quad (16.10)$$

На границе атмосферы Земли среднегодовое значение  $I$  солнечного света составляет  $1,370 \text{ кВт}/\text{м}^2$  (солнечная постоянная). Эта интенсивность обеспечивает все процессы, которые протекают за счет солнечной энергии.

## IV. 6 Телемедицина

**Телемедицина** – прикладное направление медицинской науки, связанное с разработкой и применением на практике методов дистанционного оказания медицинской помощи и обмена специализированной информацией на базе использования современных телекоммуникационных технологий

**Цель телемедицины** – предоставление качественной медицинской помощи любому человеку независимо от его местонахождения и социального положения

**Предмет телемедицины** – передача посредством телекоммуникаций и компьютерных технологий всех видов медицинской информации между отдаленными друг от друга пунктами (медицинскими учреждениями, пациентами и врачами, представителями здравоохранения и т.д.)



# Типы технологий телемедицины

1. **Off-line** или телеконсультация отложенная - разновидность удаленного консультирования, происходящая без использования систем внутрисетевого общения в реальном времени.

Суть состоит в получении и передачи изображений в цифровом виде от одного пользователя (врача) к другому. Для общения и передачи информации консультант и абонент используют электронную почту и специальные системы отложенных телеконсультаций. Диагноз или консультация могут быть получены в течение 24 – 48 часов.

2. **On-line** или очное удаленное консультирование («двустороннее интерактивное телевидение») - телемедицинская процедура, разновидность удаленного консультирования, проводимая с использованием систем реального времени (как правило, видеосвязи)



## Сферы телемедицины

- **Инструктаж** – телемедицинская процедура, представляющая собой обеспечение физического лица (медицинскую сестру, фельдшера и т.д.) односторонней видео- и голосовой связью с консультантом для получения рекомендаций по оказанию первой медицинской помощи. Применяется в случаях массовых поражений при катастрофах.

- **Биорадиотелеметрия** (БРТМ, телеметрия) – регистрация физиологических данных на расстоянии посредством радиосвязи. Это наиболее старая область применения телемедицины (космическая медицина).
- **Мониторинг** – телемедицинская процедура, разновидность, телеметрии: удаленная регистрация физиологических показателей у людей, заведомо страдающих тем или иным заболеванием

### **Системы мониторинга:**

1. Внутрибольничный
2. Бытовой
3. Передвижной



- **Дистанционное обучение** – разновидность учебного процесса, при котором либо преподаватель и аудитория, либо студенты и источник информации разделены географически. Для обеспечения сеансов дистанционного обучения используются компьютеры и телекоммуникации, преимущественно Интернет

- **Кардиология**

Применение телемедицины в кардиологии строится на дистанционном анализе электрокардиограммы, эхокардиограммы и некоторых других исследований как в реальном, так и в отсроченном времени



# Направления телемедицины

## ● Телемедицина критических состояний

Во время катастроф специалисты-медики выделяют два принципиальных этапа:

1. ранний период, когда проводятся спасательные работы и ликвидируются опасные для жизни последствия. На этом этапе крайне важна правильная организация очередности и объема оказания медицинской помощи
2. отстроченный период, когда пострадавшим оказывается квалифицированная и специализированная помощь. Здесь важна консультативная помощь специалистов определенного профиля (удаленный доступ к информации

- **Военная телемедицина**

Новое дыхание телемедицинские технологии получили с развитием военной медицины. Все разработки могут быть с успехом применены в медицине критических состояний.