

Федеральное агентство по образованию

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет “ЛЭТИ”

---

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”  
2006

УДК 331.43:537.8 (075.8)

ББК 22.336ня73

Э 455

Электромагнитная безопасность человека: Учеб. пособие / В. А. Бука-  
Э 455 нин, А. А. Ковбасин, В. Н. Павлов, А. О. Трусов. – СПб.: Изд-во  
СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2006. – 120 с.

ISBN 5–7629–0739–2

Рассматриваются проблемные вопросы опасного и вредного влияний на человека электромагнитных полей. Дается их характеристика, приводятся сведения об источниках их возникновения, о воздействии на организм и возможных отрицательных последствиях такого воздействия, в результате которых могут возникать заболевания. Рассматриваются критерии нормирования и основные нормативные требования по ограничению воздействия электромагнитных полей на человека, регламентированные государственными стандартами, санитарными нормами и гигиеническими нормативами. Приводятся принципы снижения, практические рекомендации по расчёту параметров уменьшения электромагнитных воздействий и по защите от них в источнике образования и на пути распространения электромагнитных полей.

Предназначено для студентов всех специальностей СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

УДК 331.43:537.8 (075.8)

ББК 22.336ня73

Рецензенты: кафедра безопасности жизнедеятельности СПбГТУ;  
д-р техн. наук О. Н. Русак (СПбЛТА).

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

ISBN 5–7629–0739–2

© СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2006

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

$P$ , Вт (ватт) – активная мощность  
 $p'_s$ , Вт/м<sup>2</sup> ( $p'_v$ , Вт/м<sup>3</sup>) – удельная поверхностная (объёмная) мощность  
 $\Pi$ , Вт/м<sup>2</sup> (1 Вт/м<sup>2</sup> = 0.1 мВт/см<sup>2</sup> = 100 мкВт/см<sup>2</sup>) – плотность потока мощности (энергии)  
 $W$ , Дж (джоуль) – энергия  
 $T$ , К;  $t$ , °С – температура в кельвинах; градусах Цельсия  
 $S$ , м<sup>2</sup> – площадь поверхности  
 $f$ , Гц (герц) – частота  
 $v$ , м/с – скорость  
 $E$ , В/м – напряжённость электрического поля  
 $E_e$ , Вт/м<sup>2</sup> – облучённость лазерного излучения  
 $H$ , А/м – напряжённость магнитного поля  
 $B$ , Тл (тесла) – индукция магнитного поля  
ЭН или ЭЭ, (А/м)<sup>2</sup>·ч; (В/м)<sup>2</sup>·ч; (Вт/м<sup>2</sup>)·ч – энергетическая нагрузка или энергетическая экспозиция  
ЭЭ<sub>л</sub>, Дж/м<sup>2</sup> – энергетическая экспозиция лазерного излучения  
 $U$ , В (вольт) – электрическое напряжение  
 $u$ , В – электрический потенциал  
 $I$ , А (ампер) – электрический ток  
 $J_{\text{пр}}$  ( $J_{\text{см}}$ ), А/м<sup>2</sup> – плотность электрического тока проводимости (смещения)  
 $R$ , Ом (Ом) – активное электрическое сопротивление  
 $Z$ , Ом – электрическое сопротивление  
 $g$ , См (сименс) – активная электрическая проводимость  
 $\rho$ , Ом·м – удельное электрическое сопротивление  
 $\sigma$ , См/м – удельная электрическая проводимость  
 $\lambda$ , м – длина волны  
 $l$ , м – расстояние  
 $\mu$  – относительная магнитная проницаемость  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная  
 $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость  
 $\varepsilon_0 = 8.855 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная  
 $\Delta$ , м – глубина проникновения электромагнитного поля  
БЖД – безопасность жизнедеятельности  
БиоЭМС – биоэлектромагнитная совместимость  
ВДУ – временно допустимый уровень  
ИК – инфракрасный  
МП – магнитное поле  
ПДУ – предельно допустимый уровень  
ППМ (ППЭ) – плотность потока мощности (плотность потока энергии)  
РЧ – радиочастоты  
СанПиН – санитарно-эпидемиологические правила и нормативы  
СИЗ – средство индивидуальной защиты  
СКЗ – средство коллективной защиты  
СН – санитарные нормы  
УФ – ультрафиолет  
ЭМП – электромагнитное поле  
ЭМС – электромагнитная совместимость  
ЭП – электрическое поле

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные поля (ЭМП) являются одними из основных энергетических полей, с которыми человек взаимодействует и которые использует на протяжении всей своей жизни и деятельности. На земле эволюция человека происходила под действием естественных источников ЭМП как земного, так и космического происхождения. За исключением небольшой части частотного диапазона электромагнитного поля, воспринимаемого человеком как свет и обладающего огромным информационным воздействием на любой живой организм, другие виды ЭМП не вызывают у него ощущения воздействия. Электромагнитные волны инфракрасного диапазона являются источником необходимого человеку тепла, и он сам является источником инфракрасных волн определённой длины. Ультрафиолетовые лучи вызывают загар кожи, что некоторым людям очень нравится; небольшие дозы УФ-А благотворно влияют на здоровье человека и даже природное фоновое ионизирующее электромагнитное излучение является для него необходимым и полезным.

С момента открытия электричества, электромагнитных полей, осознания их роли для человека, выявления основных физических принципов, разработки математической теории, описывающей их основные характеристики, и т. д. началось развитие электротехники, появились новые области применения электромагнитных полей. За 120 лет существования ЛЭТИ за исследования в этом направлении мировую известность получили многие профессора, среди которых можно назвать А. С. Попова, В. П. Вологодина и др., сумевших “заставить” электромагнитные поля работать на человека. ЭМП стали объектом исследования многих дисциплин, как в теоретическом, так и в прикладном плане.

В настоящее время радиопередающие и телевизионные системы являются средством дистанционного общения между людьми и получения информации; электротермические установки позволяют проводить качественный нагрев изделия для различных технологических операций; компьютеры позволяют проводить моделирование и исследования многих сложных процессов, обучение на больших расстояниях и многое другое; электромедицинская аппаратура предоставляет возможность диагностировать и лечить тяжёлые заболевания и т. д. В то же время научно-технический прогресс в области использования ЭМП наряду с положительным эффектом принёс много

нежелательных проблем. Электромагнитные поля способны неблагоприятно воздействовать на человека, вызывая ухудшение его здоровья и различные болезни. ЭМП наводит в теле человека индуцированные токи или вызывает переменную поляризацию молекул, иногда нанося тем самым вред живой материи. В связи с этим ЭМП стали рассматриваться в дисциплине БЖД.

Появились такие новые понятия, как электромагнитная гигиена, электромагнитная, биоэлектромагнитная совместимости и электромагнитная безопасность. Согласно ГОСТ Р 51070–97 электромагнитная безопасность – это система организационных и технических мероприятий, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электромагнитного поля. В периодической печати и технической литературе много пишут о вредном влиянии ЭМП, однако чаще всего вопросы, связанные с таким влиянием, рассматриваются либо поверхностно без уделения должного внимания самим источникам ЭМП, либо электромагнитные поля и защита от них для конкретных систем рассматриваются подробно, но без учёта вопросов воздействия их на человека. Многие авторы склоняются к выводам о том, что действие ЭМП на живой организм, которое приводит к нежелательным эффектам и болезням, не достаточно хорошо изучено, а статистика заболеваний сильно затруднена или ведётся от случая к случаю.

Существуют и другие многочисленные вредные факторы, а выделить отдельное воздействие каждого из них на человека практически невозможно. Тем не менее снижение уровней ЭМП за счёт грамотного проектирования систем, создающих вредное электромагнитное поле, или средств защиты в целом может дать положительный эффект для человечества.

Основными целями написания данного учебного пособия являются:

- систематизация известных, а также дополненных авторами учебного пособия материалов по источникам электромагнитных полей, методик их приближённого расчёта для оценки потенциальной возможности негативного воздействия на человека;
- обобщение известных механизмов воздействия ЭМП на человека различного диапазона частот, эффектов этого воздействия и возможных последствий для здоровья;
- рассмотрение основных способов и методов снижения интенсивности ЭМП, оценка эффективности технических мероприятий по защите от них, проблемных вопросов проектирования устройств такой защиты;

- анализ гигиенического нормирования и вопросов биоэлектромагнитной совместимости.

Из-за ограниченных возможностей в учебном пособии не нашёл отражения вопрос об электромагнитных полях, которые относятся к ионизирующим. К ним применимо уже понятие “радиационная безопасность человека”, которая должна строиться на более высоком уровне.

Структурно учебное пособие состоит из введения, шести основных разделов, заключения и списка рекомендуемой литературы.

В первом разделе приводятся описания основных характеристик электромагнитных полей, известные из курсов физики, теоретической электротехники или радиотехники. Дается краткое определение величин, характеризующих электромагнитное поле, описываются и характеризуются основные зоны его распространения.

Во втором разделе рассматриваются виды воздействия электромагнитных полей на человека и возможные последствия этих воздействий.

Принципы санитарного нормирования параметров ЭМП приводятся в третьем разделе. Здесь же дается характеристика текущего состояния норм на допустимое воздействие ЭМП на человека.

Четвёртый раздел посвящён характеристикам основных источников электромагнитных полей, с которыми человек встречается в производственных и бытовых условиях или за пределами помещений, а также приближённым методам расчёта параметров ЭМП.

Методы защиты от воздействия ЭМП приведены в пятом разделе. Рассматриваются пассивные и некоторые активные средства снижения интенсивности электромагнитных полей, виды используемых для защиты материалов и конструкций, особенности и предельно достижимые характеристики защиты.

В шестом разделе рассматриваются средства измерения и контроля ЭМП, используемые для мониторинга электромагнитной обстановки среды обитания человека.

В конце каждого раздела и всего учебного пособия приведены вопросы, на которые студент должен уметь ответить, и задачи, которые он должен уметь решать после усвоения материала конкретного раздела БЖД.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

## 1.1. Виды и основные параметры ЭМП

*Электромагнитное поле* – это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрическими заряженными частицами. Когда на объект, например на электрический проводник, подаётся напряжение или по нему протекает электрический ток, то в объекте появляются неподвижные или движущиеся электрические заряды. При этом возникают силы, которые начинают воздействовать на другие заряды, расположенные вблизи от указанного проводника. Для описания существования и пространственного распределения этих сил физиками и математиками создана концепция *поля*. Таким образом, говорят о поле силы, или просто об электрических и магнитных полях.

Можно выделить следующие виды ЭМП:

- электростатическое поле (силы, возникающие из-за стационарных электрических зарядов и известные как *электростатические силы*);
- электрическое поле постоянного тока;
- магнитное поле постоянного тока, создаваемое при движении электрических зарядов по проводнику (силы, возникающие только при протекании электрического тока в проводнике, и известные как *магнитные силы*);
- электромагнитное поле переменного тока (переменное ЭМП).

Термин “*статический*” описывает ситуацию, когда все заряды неподвижны в пространстве или движутся как непрерывный поток. В результате, как заряд, так и плотность тока постоянны во времени. В случае с неподвижным зарядом, мы имеем электрическое поле, напряжённость которого в любой точке пространства зависит от величины и геометрии всех зарядов. В случае с непрерывным током в контуре мы имеем постоянные во времени электрическое и магнитное поля (статические поля), поскольку плотность заряда в любой точке контура не изменяется.

На рис. 1.1 приведены два варианта формирования условных силовых линий *электростатического поля*, т. е. поля заряженных тел, неподвижных относительно наблюдателя, от двух одиночных разноимённых зарядов (рис. 1.1, *а*) и от заряженных пластин, расположенных близко друг относительно друга (рис. 1.1, *б*). Электрические поля воспринимаются электрически заряженными объектами как сила.

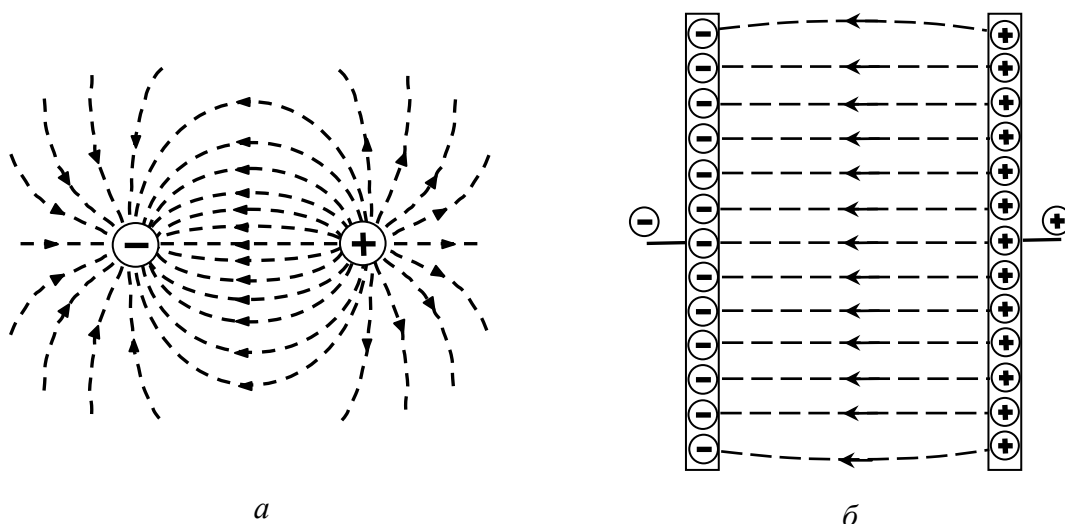


Рис. 1.1. Силовые линии электрического поля:  
*а* – двух одиночных зарядов, *б* – двух заряженных пластин

На рис. 1.2 показаны силовые линии магнитного поля от постоянного тока в одиночном проводе (рис. 1.2, *а*) и в круговом витке (рис. 1.2, *б*).

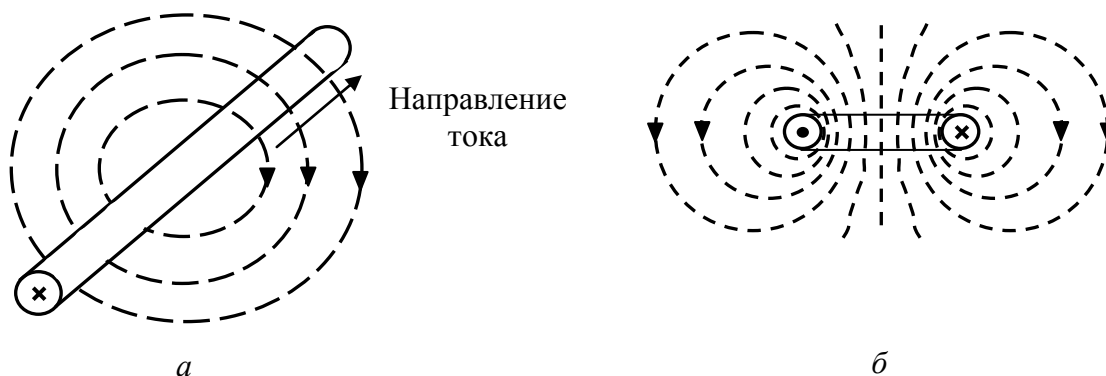


Рис. 1.2. Силовые линии магнитного поля:  
*а* – от одиночного проводника с током, *б* – от кругового витка с током

Количественной характеристикой электрического (электростатического) поля служит *напряжённость электрического (электростатического) поля  $E$* . Для характеристики электростатического поля также используется понятие “*потенциал электростатического поля*” и. Магнитное поле характеризуется напряжённостью магнитного поля  $H$ , а также *магнитной индукцией  $B$* , которые связаны между собой соотношением  $B = \mu\mu_0 H$ . Для воздушной среды, являющейся для человека средой обитания,  $\mu = 1$ , поэтому при переводе напряжённости в индукцию магнитного поля можно пользоваться следующими соотношениями:  $1 \text{ Тл} \leftrightarrow 800\,000 \text{ А/м}$  или  $1 \text{ А/м} \leftrightarrow 1.25 \text{ мкТл}$ .



Электричество и магнетизм – явления, отличающиеся друг от друга до тех пор, пока заряды и ток статичны. В ситуации такой статики исчезает любая взаимосвязь между электрическими и магнитными полями, и поэтому их можно рассматривать по отдельности (в отличие от ситуации с изменяющимися во времени полями). Статические электрические и магнитные поля чётко характеризуются непрерывной, независимой от времени напряжённостью и соответствуют пределу нулевой частоты в диапазоне сверхнизких частот.

Физические причины существования переменного электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле порождает магнитное поле, а изменяющееся магнитное поле – вихревое электрическое поле. В связи с этим электрическое и магнитное поля переменных токов нельзя изучать независимо друг от друга.

Переменные ЭМП вокруг любого источника излучения условно разделяют на три зоны: *ближнюю* – зону *индукции*, *промежуточную* (или *переходную*) – зону *интерференции* и *дальнюю* – *волновую* зону. Если геометрические размеры источника излучения меньше длины волны излучения  $\lambda$  (т. е. источник можно рассматривать как точечный), границы зон определяются следующими расстояниями  $l$  (рис. 1.3):

- ближняя зона (индукции)  $l < \lambda/(2\pi)$ ;
- промежуточная зона (интерференции)  $\lambda/(2\pi) < l < 2\pi\lambda$ ;
- дальняя зона (волновая)  $l > 2\pi\lambda$ .

Разбиение на эти зоны определяется характером возникновения и распространения электромагнитной волны. В зоне индукции, в которой только начинается формирование электромагнитной волны, в зависимости от типа излучателя преобладает электрическая или магнитная составляющая ЭМП. Электрические и магнитные поля сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Вектор Умова – Пойнтинга равен нулю: излучение во внешнее пространство отсутствует. Известно, что вибратор является излучателем электрического поля, а замкнутый контур – излучателем магнитного поля.

В переходной зоне присутствуют одновременно и электрическая и магнитная составляющие ЭМП, однако электромагнитная волна еще полностью не сформирована – в любой точке переходной зоны электрическая составляющая может преобладать над магнитной, и наоборот. Измерения ППЭ в такой зоне показывают сложную зависимость от расстояния с выраженными минимумами и максимумами, обусловленными интерференцией волн.

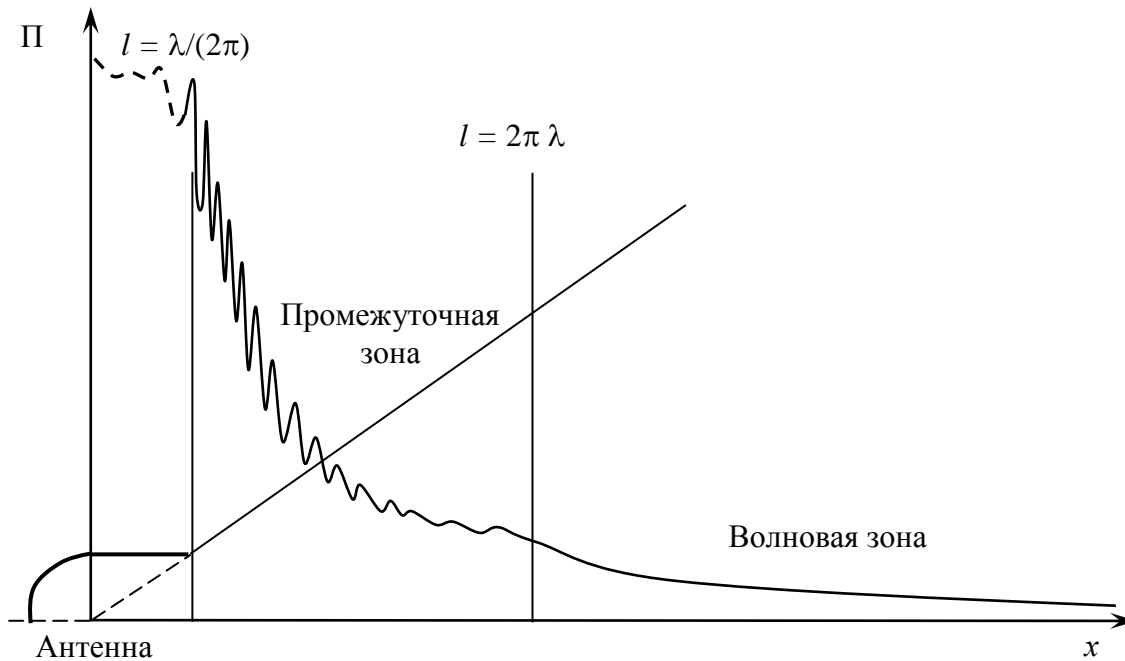


Рис. 1.3. Примерный вид измеренной ППМ (ППЭ) от антенны с параболическим отражателем в зависимости от расстояния до источника

В волновой зоне существует уже полностью сформировавшаяся плоская электромагнитная волна, в которой выполняется строгое соотношение между  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , характеризующееся *волновым сопротивлением* среды  $z_0$ :

$$z_0 = \frac{E}{H} \approx 377.$$

Электромагнитную волну, распространяющуюся в воздушном пространстве, можно считать плоской, когда все величины, характеризующие интенсивность электромагнитного процесса, зависят только от одной из декартовых координат. Примерно такой характер имеет электромагнитная волна, излучённая антенной, если эту волну рассматривать в небольшой области пространства на большом расстоянии от источника излучения. В электромагнитной волне, свободно распространяющейся в однородном и изотропном диэлектрике (например, в воздушной среде) векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  взаимно перпендикулярны:  $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ . Произведение векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  даёт третью характеристику ЭМП – вектор Умова – Пойнтинга  $\mathbf{\Pi}$ :

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}.$$

Распространение синусоидальной электромагнитной волны в воздушной среде можно представить так, как показано на рис. 1.4. Направление век-

тора  $\Pi$  определяется по правилу буравчика: если вращать буравчик по часовой стрелке от вектора  $E$  к вектору  $H$ , то направление его ввёртывания определяет направление распространения электромагнитной волны.

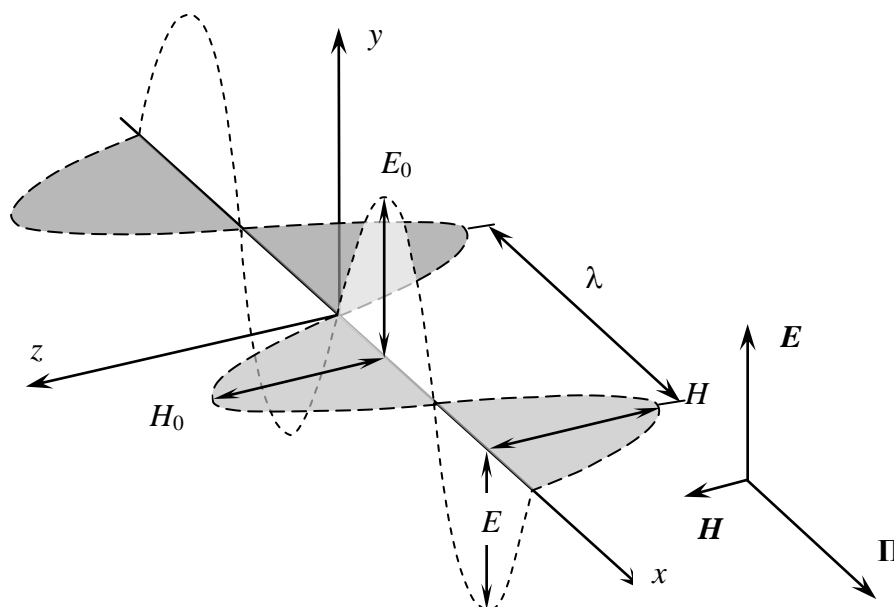


Рис. 1.4. Схема распространения электромагнитных волн

Абсолютная величина  $\Pi$  представляет собой мощность потока электромагнитной энергии, отнесённую к единице поверхности, нормальной к направлению распространения энергии, т. е. характеризует плотность потока мощности. Для плоской волны в воздушной среде ППЭ связана с напряжённостью электрического и магнитного полей выражением  $\Pi = E^2/377 = 377 \cdot H^2$ .

Скорость распространения электромагнитной волны в пространстве или в каком-либо теле зависит только от электрических и магнитных свойств среды (тела) и определяется выражением  $v = 1/\sqrt{\mu\mu_0\epsilon\epsilon_0}$ . Для воздушной среды можно принять, что она такая же, как и в вакууме ( $\mu = 1$ ,  $\epsilon = 1$ ) и равна скорости света ( $v \approx 3 \cdot 10^8$  м/с). Длина волны  $\lambda$  и частота  $f$  связаны между собой соотношением  $\lambda = v/f$ . Связь между энергией  $W$  и частотой колебаний определяется как  $W = hf$  ( $h$  – постоянная Планка, равная  $6.6 \cdot 10^{-30}$  Вт/м<sup>2</sup>) или энергией и длиной волны:  $W = hv/\lambda$ . Таким образом, с увеличением частоты или уменьшением длины волны энергия электромагнитного поля возрастает.

## 1.2. Частоты и длины волн электромагнитных излучений

Спектр электромагнитных колебаний, создаваемых различными источниками ЭМП, находится в широких пределах: по длине волны – от 100 000 км и более до 0.001 мкм и менее, а по частоте – от 3 Гц и менее до  $3 \cdot 10^{24}$  Гц и более, включая радиоволны, оптические и ионизирующие излучения (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Неионизирующие излучения ( $f \leq 3 \dots 3 \cdot 10^{15}$ Гц)						Ионизирующие излучения ( $f = 3 \cdot 10^{15} \dots \geq 3 \cdot 10^{24}$ Гц)		
Волны		Микро- волны	Инфра- красные лучи	Види- мые лу- чи	Ультра- фиолет	Ультра- фиолет	X-Лучи (рентген)	Гамма- лучи
низких частот	радио- частот							
$\lambda$ , км	$\lambda$ , м	$\lambda$ , мм	$\lambda$ , мкм			$\lambda$ , нм		
5... $\geq 100\ 000$	1...5000	1...1000	0.78... 1000	0.38... 0.78	0.1...0.38	100...1	1...0.001	0.001 и менее

Часть ЭМП, охватывающая ИК-излучения с частотами от 300 ГГц до  $7.89 \cdot 10^{14}$  Гц, видимые излучения с  $f = 3.85 \cdot 10^{14} \dots 7.89 \cdot 10^{14}$  Гц и УФ-излучения с  $f = 7.89 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$  Гц, носит название *оптической области спектра*.

Согласно классификации Международной комиссии по освещению, диапазон ИК-спектра подразделяется на излучение типа ИК-А (от 780 нм до 1.4 мкм), ИК-В (от 1.4 до 3 мкм) и ИК-С (от 3 мкм до 1 мм). Такое подразделение приблизительно соответствует зависящим от длины волны характеристикам поглощения ИК-излучения в тканях и возникающим вследствие этого различным биологическим эффектам.

Диапазон УФ в пределах 200...315 нм называется “*актиническим*” УФ и состоит из эритемного (ближнего) УФ-В и бактерицидного (дальнего УФ) УФ-С, вызывающего большинство биологических эффектов. Диапазон волн 315...400 нм относится к УФ-А излучению.

## 1.3. Взаимодействие ЭМП с физическим веществом

Падая на границу раздела “воздух–вещество”, ЭМП может сильно изменять свои параметры в зависимости от частоты тока и электрофизических параметров этого вещества, основными из которых являются удельная электрическая проводимость  $\sigma$  или удельное электрическое сопротивление  $\rho$ ,

комплексная относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$  и комплексная относительная магнитная проницаемость  $\mu = \mu' - j\mu''$ .

Любое вещество кроме магнитной и диэлектрической проницаемостей характеризуется ещё тангенсом угла электрических потерь (зависимостью электрических свойств данной среды от частоты):  $\operatorname{tg} \xi_1 = \varepsilon''/\varepsilon' = 1/(2\pi f \rho \varepsilon_0 \varepsilon')$ , а также тангенсом угла магнитных потерь:  $\operatorname{tg} \xi_2 = \mu''/\mu'$ . При  $\operatorname{tg} \xi_1 \gg 1$  вещество считается проводником, при  $\operatorname{tg} \xi_1 \ll 1$  – диэлектриком, а при  $\operatorname{tg} \xi_1 \approx 1$  – полупроводником, в котором потери примерно одинаковы.

В среде с непрерывными физическими свойствами, не имеющей стороннего тока, пространственные и временные производные векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  связаны известными уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}}{\partial \tau} = \mathbf{J}_{\text{пр}} + \mathbf{J}_{\text{см}};$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mu_0 \mu \mathbf{H}}{\partial \tau}.$$

В монохроматических полях выражения для комплексных амплитуд напряжённостей ЭП и МП приобретают следующий вид:

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} = \sigma \dot{\mathbf{E}} - j\omega \varepsilon_0 \varepsilon \dot{\mathbf{E}};$$

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \mu_0 \mu \dot{\mathbf{H}}.$$

Если рассмотреть случай проникновения плоской синусоидальной электромагнитной волны в однородное проводящее полупространство (имеющее только одну координату  $x$ ), то на основе решения уравнений Максвелла можно получить в одномерном приближении следующие зависимости мгновенных значений напряжённостей электрического и магнитного полей от расстояния и круговой частоты (рис. 1.6):

$$E(x, \tau) = E_m e^{-\frac{x}{\Delta}} \cos(\omega \tau - \frac{x}{\Delta}), \quad H(x, \tau) = H_m e^{-\frac{x}{\Delta}} \cos(\omega \tau - \frac{x}{\Delta} - \frac{\pi}{4}).$$

В проводящем веществе напряжённости электрического и магнитного полей уже не совпадают по фазе, а вектор Пойнтинга, описывающий перенос электромагнитной энергии, в некоторых зонах (участки  $\pi/4 - \pi/2$  и  $5\pi/4 - 3\pi/2$ ) принимает отрицательные значения из-за различных знаков  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Это означает, что он направлен не в глубь проводника, а к его поверхности, т. е.

три четверти периода мощность поступает в тело, а одну четверть – возвращается обратно, хотя удельная объёмная мощность всегда положительна.

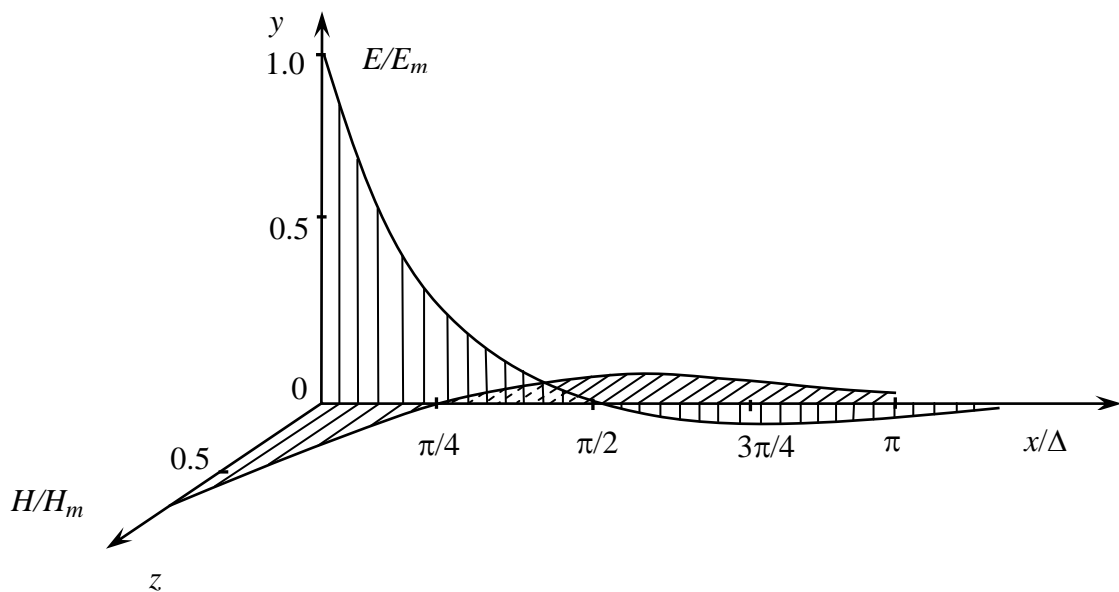


Рис. 1.6. Распределение напряжённостей электрического и магнитного полей в плоском проводящем теле в момент времени  $\tau$

Одной из важных характеристик взаимодействия ЭМП и вещества, которая имеется в этих выражениях, является глубина проникновения электромагнитного поля в глубь материала  $\Delta$ , показывающая, что при изменении расстояния на  $l = \Delta$  амплитуда уменьшается в  $e = 2.72$  раза, а фаза – на 1 рад:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu \mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

Глубина проникновения ЭМП (тока) в металлы достаточно мала, к примеру, в медь ( $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) и немагнитную сталь ( $\rho = 8 \cdot 10^{-7}$  Ом·м) на частоте 50 Гц она составляет около 0.01 и 0.06 м соответственно. С ростом частоты она уменьшается обратно пропорционально корню квадратному от частоты. В железе или в ферромагнитной стали из-за большого значения относительной магнитной проницаемости эта глубина проникновения значительно меньше. В зависимости от напряжённости магнитного поля, от которой в сильной степени зависит магнитная проницаемость, она может составлять для промышленной частоты от сотых долей до нескольких единиц миллиметров, соответственно, в слабых и в очень сильных ЭМП.

Длина волны ЭМП в проводнике связана с глубиной проникновения ( $\lambda = 2\pi\Delta$ ) и меньше, чем в воздухе.

ЭМП вызывает появление в проводящей среде вихревого тока проводимости (или индукционного тока) плотностью

$$J_{\text{пр}} = \sigma E = \frac{E}{\rho}.$$

Ток, в свою очередь, приводит к выделению активной мощности, объёмная удельная величина которой определяется выражением

$$p'_v = \frac{E_m^2}{2\rho} e^{-\frac{2x}{\Delta}}.$$

На расстоянии, равном глубине проникновения тока, удельная объёмная мощность составляет всего 13.5 %, поэтому считается, что практически вся мощность сосредоточена в поверхностном слое  $\Delta$ .

Для непроводящих (диэлектрических) материалов удельное сопротивление очень велико, и для большинства частот уже бессмысленно говорить о глубине проникновения. Для большей части ЭМП такие материалы являются “прозрачными”.

Основным процессом, возникающим при воздействии на диэлектрик электрического напряжения (напряжённости электрического поля), является *поляризация* – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул. На рис. 1.7 приведены примеры поляризации кристалла  $\text{NaCl}$ , молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  и органической неоднородной среды в электрическом поле.

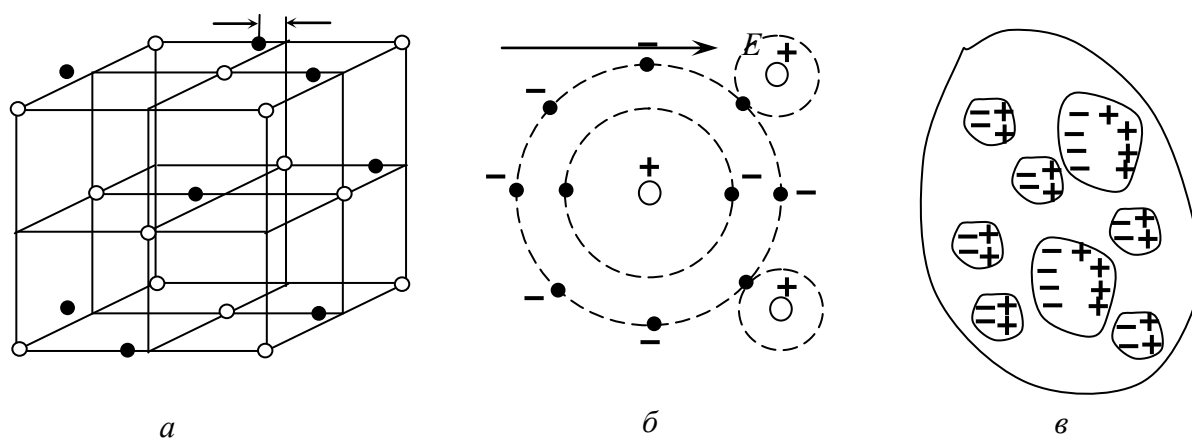


Рис. 1.7. Поляризация в электрическом поле: а – кристалла поваренной соли, б – молекулы воды, в – некоторых неоднородных органических сред

При приложении внешнего электрического поля  $E$  за короткое время, составляющее  $10^{-12} \dots 10^{-14}$  с, в кристалле происходит смещение отрицательных ионов хлора относительно положительных ионов натрия и кристалл приобретает дипольный момент (рис. 1.7, а). На полярные молекулы воды действуют силы, стремящиеся повернуть их таким образом, чтобы дипольные моменты совпадали (рис. 1.7, б). Время поляризации таких молекул значительно больше, чем в первом случае, и составляет примерно  $10^{-7} \dots 10^{-13}$  с. В органической клетке, содержащей полости, окружённые жидкостью, также происходит ограниченное перемещение зарядов, вызывая макроструктурную поляризацию (рис. 1.7, в) с временем  $10^{-3} \dots 10^{-8}$  с.

Существуют два основных вида поляризации диэлектрика в электрическом поле:

- *мгновенная*, без выделения теплоты – к ней относятся электронная (упругое смещение и деформация электронных оболочек атомом и ионов) и ионная (упругое смещение упругосвязанных ионов для твёрдых тел с ионным строением) поляризации;
- *релаксационная*, нарастающая и убывающая медленно и сопровождающаяся рассеиванием энергии – все другие механизмы поляризации.

*Дипольно-релаксационная* поляризация определяется тем, что молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля. Поворот диполей в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, поэтому такая поляризация связана с потерями энергии. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при высокой частоте диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и такая поляризация может полностью исчезнуть. В твёрдых полярных органических веществах она обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся у неё радикалов по отношению к молекуле.

*Ионно-релаксационная* поляризация наблюдается, например в неорганических стёклах, и представляет собой процесс смещения слабосвязанных ионов вещества под действием ЭП. *Электронно-релаксационная* поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок и характерна для оксидов некоторых металлов. Существуют и некоторые другие виды поляризаций, которые для рассматриваемых в учебном пособии вопросов не представляют интереса.



Несмотря на рост удельной проводимости с повышением частоты многие вещества, обычно считающиеся относительно хорошими проводниками, в той или иной степени “теряют” проводящие свойства и приобретают свойства диэлектриков. Согласно теории Максвелла, определяющим в данном случае являются не токи проводимости, а токи смещения. Так, например солёная (морская) вода, при сверхвысоких частотах “переходит” в разряд диэлектриков. Если при  $f < 10$  МГц для морской воды  $\text{tg } \xi_1 = 100$ , то при 1 ГГц он уменьшается до 1 (полупроводниковые свойства), а при  $f > 10$  ГГц  $\text{tg } \xi_1 = 0.1$ . То же самое происходит и с телом человека, обладающим при низких частотах проводящими свойствами (ток 50 Гц хорошо проводится телом), а при высоких – свойствами диэлектрика.

Таким образом, под действием внешнего ЭМП возникают:

- в проводниках – в основном токи проводимости;
- в идеальных диэлектриках – токи смещения;
- в неидеальных диэлектриках или полупроводниках – токи смещения и (при наличии свободных зарядов) токи проводимости, сила которых зависит от удельной проводимости (поверхностной и объёмной).

#### 1.4. Контрольные вопросы

1. Какие виды ЭМП различают?
2. Какими параметрами оцениваются ЭМП?
3. Что характеризует вектор Пойнтинга?
4. Какие процессы протекают в различных веществах (проводниках, диэлектриках) под воздействием электромагнитного поля?
5. Какова особенность различных зон вокруг источника ЭМП; как эти зоны называются?

#### 1.5. Выводы

Электромагнитное поле – особая форма материи, которая может вызывать изменение в любом физическом теле за счёт неподвижных или перемещающихся в нём электрических зарядов. При распространении в воздушном пространстве в волновой зоне синусоидально изменяющееся во времени ЭМП характеризуется тремя взаимно перпендикулярными векторами, частотой колебания и длиной электромагнитной волны. При падении этой волны на проводящее тело характер и параметры его сильно изменяются, при этом возникают токи проводимости, связанные с наличием сво-

бодных зарядов внутри тела. В непроводящем теле из-за того, что большинство зарядов связаны, возникают разного рода поляризационные процессы, вызывая смещение атомов и молекул вещества и приводя к появлению токов смещения. Токи проводимости в проводящих областях и токи смещения при релаксационной поляризации являются источниками теплоты и при определённых условиях вызывают значительный нагрев тела.

## 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭМП НА ЧЕЛОВЕКА

### 2.1. Характеристики тела человека как физического объекта

Для ЭМП тело человека представляет собой сложный физический объект, обладающий удельным сопротивлением, магнитной и диэлектрической проницаемостями, который в некоторых условиях ведёт себя как проводник, а в некоторых – как полупроводник или диэлектрик.

Электрические характеристики мышечной ткани и жира (рис. 2.1) в сильной степени зависят от свойств ткани (содержания полярных органических веществ и т. д.), воды и растворённой в ней соли NaCl.

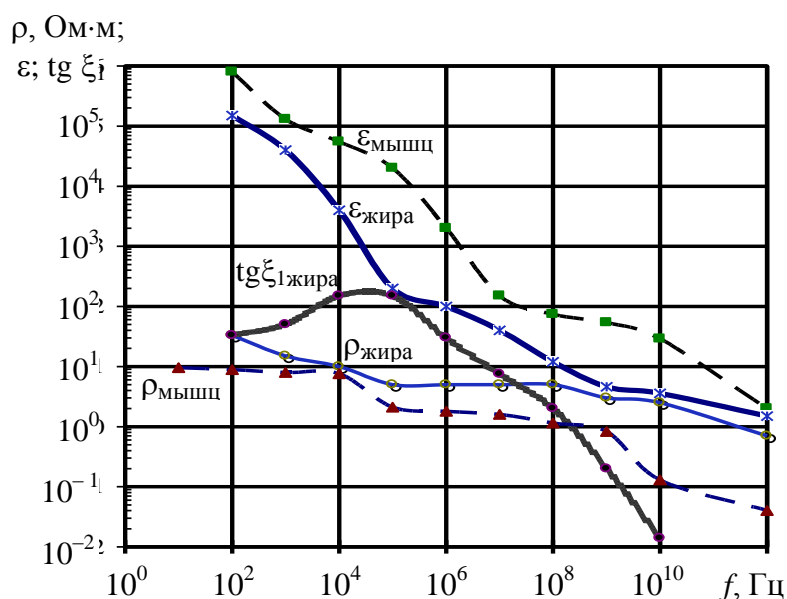


Рис. 2.1. Зависимость удельного электрического сопротивления ткани  $\rho$ , относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла потерь от частоты тока

В области низких частот перенос свободных зарядов происходит в основном за счёт ионов, находящихся в межклеточном пространстве, объём ко-

торого примерно в 10 раз меньше, чем объём всей ткани. Под действием электрического поля заряды, разделённые в пространстве, поляризуют ткань, заряжают клетки, что может привести к полной компенсации самого поля внутри них. Степень поляризации ткани значительно превышает дипольную поляризацию обычного водного раствора.

С ростом частоты поляризация перестаёт успевать за изменением поля, величина поляризации мышечной ткани начинает уменьшаться, следовательно, снижается и её диэлектрическая проницаемость. Процесс поляризации характеризуется частотой релаксации, вблизи которой наблюдается резкое уменьшение  $\epsilon$ . Все мягкие ткани с высоким содержанием воды характеризуются тремя механизмами релаксации:  $\alpha$  ( $f_{\text{рел}} = 90$  Гц) – процесс поляризации клеток за счёт двойного электрического слоя,  $\beta$  ( $f_{\text{рел}} = 50$  кГц) – процесс поляризации клеток за счёт клеточной мембраны и  $\gamma$  ( $f_{\text{рел}} = 25$  ГГц) – процесс поляризации в основном за счёт воды. Сложный характер зависимости диэлектрической проницаемости показывает, что в поляризации принимают участие и молекулы, составляющие ткань, и субклеточные структуры.

На частотах ЭМП меньших 10 кГц период электромагнитных колебаний является настолько большим, что клетки мембран ткани не успевают перезарядиться за счёт ионов вне и внутри клетки. На частотах 10...100 кГц происходит вовлечение внутриклеточной среды в процесс образования ионных токов и начинается процесс поляризации молекул ткани и воды, т. е. возникают токи смещения. При частотах свыше  $10^8$  Гц ёмкостное сопротивление мембран клеток становится настолько малым, что клетку можно считать короткозамкнутой. В связи с этим поляризация и токи смещения становятся преобладающими. Диапазон 300...2000 МГц характеризуется процессом вращения боковых групп белковых молекул и релаксацией белковосвязанной воды. При ещё более высоких частотах дипольные молекулы воды приходят в колебательные движения и сталкиваются с псевдовозбуждёнными, передавая им свою энергию. Таким образом, с увеличением частоты индуцирование ионных токов постепенно замещается поляризацией молекул. Если при 1 ГГц возникает 50 % диэлектрических потерь, то при 10...30 ГГц – уже 90...98 %. На этих частотах глубина проникновения электромагнитной волны в ткань составляет примерно 12...60 и 0.7...11 мм соответственно.

Взаимодействие ЭМП различных длин волн с телом человека можно условно представить, как показано на рис. 2.2.

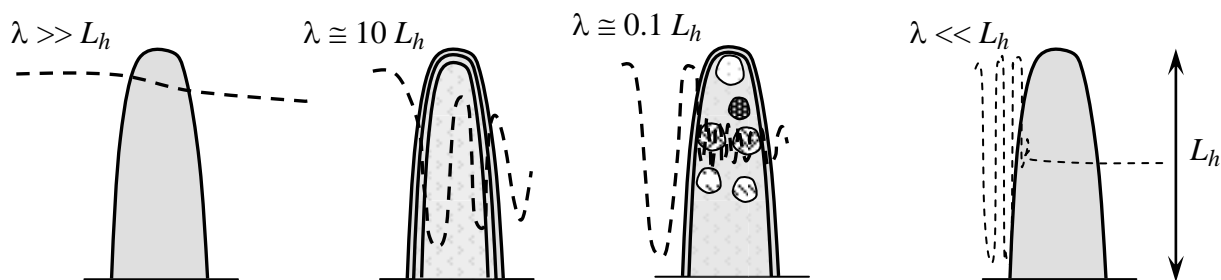


Рис. 2.2. Воздействие ЭМП различной длины волны на человека

Характерной особенностью тела человека является *неоднородность физических свойств* различных тканей (кожи, жира, мышц, стекловидного тела и т. д.). В связи с этим на некоторых частотах, для которых глубина проникновения волны несколько больше толщины слоёв тканей, из-за отражений от различных слоёв возникают эффекты стоячих волн с соответствующими максимумами поглощений электромагнитной энергии. Отдельные слои тканей играют роль своеобразного согласующего трансформатора. Этим объясняют тот факт, что излучение с длинами волн 0.1...0.3 м поглощается в широком диапазоне (20...100 %) в коже, жире и мышцах. При длинах волн 0.3...1 м оно поглощается в количестве 30...40 % в основном во внутренних органах. Излучение с длинами волн менее 0.1 м поглощается в основном слоем кожи.

## 2.2. Механизмы воздействия ЭМП на живой объект

При нахождении в *постоянном электрическом поле* на человеке наводится поляризованный заряд, который при определённых условиях может долгое время сохраняться после снятия стороннего электрического поля. *Электростатическое поле* вызывает статическую поляризацию, при которой на поверхности кожи, обращённой к источнику потенциала одного знака, возникает статический потенциал другого знака. В зависимости от условий экспозиции, размера, формы и положения тела, подвергающегося воздействию поля, плотность поверхностного заряда может существенно варьироваться. Это приводит к изменчивому, неоднородному распределению токов в теле. В связи с тем, что мембраны клеток являются хорошими изоляторами, ионные токи протекают по межклеточной жидкости. При больших уровнях электростатического поля возможен электрофорез заряженных частиц, таких, как макромолекулы и клетки.

Индукцированный на поверхности тела человека заряд может ощущаться при его разряде на заземлённый объект (иногда с заметными искрами). При достаточно высоком напряжении воздух ионизируется и становится способным проводить электрический ток, например между заряженным объектом и заземлённым человеком. *Пробивное напряжение* зависит от ряда факторов, к которым, в частности, относятся форма заряженного объекта и атмосферные условия. При этом значение соответствующей напряжённости электрического поля находится в диапазоне от 500 до 1200 кВ/м.

В *постоянном магнитном поле* ферромагнитные частицы тела человека поворачиваются и строго ориентируются по силовым линиям этого поля.

Взаимодействуя с неоднородным физическим объектом (телом человека), переменное ЭМП вызывает в нём различного вида поляризации, появление вихревых токов и зарядов (эффект слабой ионизации атомов и молекул). В связи с тем, что энергия электромагнитного поля вплоть до частоты 300 ГГц невелика, излучение такого диапазона частот не относят к ионизирующим. Считается, что ЭМП воздействуют только на уже имеющиеся свободные заряды и диполи. Колебания свободных зарядов (ионов) приводят к увеличению токов проводимостей и потере энергии, связанной с электрическим сопротивлением среды. Вращение дипольных молекул влияет на токи смещения и диэлектрические потери, обусловленные вязкостью среды.

ЭМП сверхвысоких частот способны поляризовать боковые цепи белковой молекулы, вызывая разрывы водородных связей и изменяя зону гидратации молекул. Основные спектральные полосы поглощения ЭМП ИК-области спектра: широкая неправильная полоса с максимумом  $\lambda = 2.9$  мкм, соответствующая валентным колебаниям О–Н-молекул, полоса с максимумом  $\lambda = 6$  мкм, соответствующая деформационным модам Н–О–Н-молекул, полоса с максимумом  $\lambda = 14$  мкм, соответствующая вибрациям молекул воды, полоса с максимумом  $\lambda = 50$  мкм, соответствующая вращательным движениям молекул воды (H<sub>2</sub>O).

Некоторую особенность имеют когерентные электромагнитные колебания, имеющие одну фазу, присущую, к примеру лазерному излучению. Фазовым детектором может служить только вращающийся либо колеблющийся объект. В биологической ткани единственной структурой, обладающей таким требованием, является вращающийся электрон любых молекулы или атома. При воздействии оптического излучения изменяют-

ся энергия электрона и, соответственно, скорость его вращения. При совпадении фазы вращения электрона и фазы оптического излучения скорость вращения увеличивается настолько, что он переходит на другую орбиту, при этом происходит отрыв его от материнской молекулы с одновременным её возбуждением. В зависимости от условий взаимодействия возникают либо возбуждение атома или молекулы ткани, либо их ионизация, либо диссоциация. Выделяемая и потребляемая при этом энергия в ткани в случае излучения когерентных колебаний становится во много раз больше, чем суммы некогерентных.

### 2.3. Виды и последствия воздействия ЭМП на человека

Тело человека является биологической макросистемой, а его отдельные ткани и органы – сложными биологическими микросистемами. При взаимодействии с ними ЭМП возникают различного рода реакции: физическая и биофизическая, химическая и биохимическая, физиологическая.

Возможные виды воздействия ЭМП приведены на рис. 2.3.

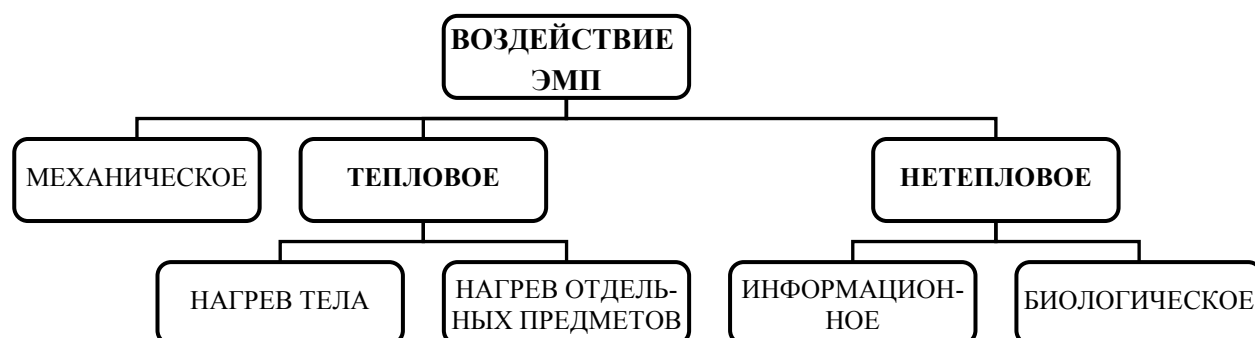


Рис. 2.3. Виды воздействия электромагнитного поля на человека

Прямое воздействие электромагнитных полей на человека рассматривается в рамках *электромагнитной гигиены* или биоЭМС. Косвенное воздействие рассматривается при возникновении проблем электромагнитной совместимости между оборудованием или техническими системами, в результате которых могут возникнуть сбои в работе, приводящие в некоторых случаях к возникновению аварийных и чрезвычайных ситуаций.

**Особенности механического воздействия.** Постоянное или низкочастотные магнитные поля вызывают большие механические усилия в проводниках. Незакреплённые ферромагнитные и парамагнитные (любые намагничиваю-

щиеся вещества) объекты, такие, как ножницы, пилки для ногтей, отвертки и скальпели, в непосредственной близости к полю могут превратиться в опасные летящие снаряды под воздействием на них сильного градиента магнитного поля. Магнитное поле способно вызвать выбрасывание нагреваемых немагнитных заготовок из индукторов промышленной частоты со скоростью, достаточной для механического травмирования обслуживающего персонала. При этом индукционный нагреватель действует как электромагнитная пушка, выстреливая слитки массой в сотни килограммов на расстояние несколько метров.

Кроме этого авторам пособия известен и другой негативный феномен электромагнитного поля – эффект “затягивания” ферромагнитных изделий внутрь индуктора или стальных приспособлений для манипулирования ими во время нагрева, а также притягивания стальных инструментов к проводникам с током. К примеру, стальной лом притягивался к индуктору промышленной частоты с такой силой, что мужчина в расцвете лет и сил не мог оторвать его от нагревателя. Магнитное поле вблизи токопроводов с токами в несколько тысяч ампер способно удерживать металлический лом в вертикальном или в наклонном положении, не давая ему упасть.

Из-за действия сил Лоренца на ионы в электролите тела человека и на свободные метаболиты в ионизированной форме в клеточной среде возможен механический отрыв отдельно заряженных частиц и эффект ионизации.

**Особенности теплового воздействия.** Металлические изделия и предметы, в том числе и экраны для защиты от ЭМП, под действием наведённого (вихревого) электрического тока могут сильно нагреваться. Для исключения косвенного воздействия от нагретых до высокой температуры изделий некоторые стандарты и правила запрещают, к примеру, носить кольца и браслеты при работе с высокочастотными электротермическими установками.

Ранее было отмечено, что тело человека обладает определёнными электрофизическими свойствами и как любой материал способно нагреваться под действием ЭМП. На низких частотах тело человека можно считать однородным проводящим телом, нагрев тканей в этом случае происходит или за счёт токов проводимости, возникающих в результате возникновения разности потенциалов в органах и тканях под воздействием электрического поля, или за счёт вихревых (ионных) токов, возникающих под воздействием магнитного поля. На высоких частотах различные ткани и органы человека обладают как проводящими, так и полупроводниковыми свойствами, поэтому нагрев тка-

ней происходит не только за счёт токов проводимости, но в большей степени за счёт процесса переменной поляризации молекул или других видов поляризаций, характерных, к примеру для технологий “диэлектрического” нагрева. Вращательные (или колебательные) движения дипольных молекул воды и ионов, содержащихся в тканях, приводят к преобразованию электромагнитной энергии внешнего поля в механическую и тепловую, что сопровождается повышением температуры.

Степень поглощения высокочастотной энергии тканями зависит от их способности к её отражению на границе раздела, определяемой их свойствами и другими особенностями. Коэффициенты отражения при длинах волн от 0.03 до 3 м составляют 0.53...0.76; 0.23...0.34 и 0.25...0.36 соответственно для граничных поверхностей “воздух–кожа”, “кожа–жир” и “жир–мышцы”.

Согласно принципу Гротгуса эффект или изменения в веществе (в данном случае в тканях организма) может вызвать только та часть энергии излучения, которая поглощается этим веществом, а энергия, отражённая или проходящая через него, действия на это вещество не оказывает. Активная мощность в ваттах, выделяющаяся в теле человека, от электрической  $P_E$  или магнитной  $P_H$  составляющих поля, пропорциональна квадрату этих напряжённостей и частоты:

$$P_E = 1.4 \cdot 10^{-23} \rho f^2 E^2; \quad P_H = 1.4 \cdot 10^{-19} \rho f^2 H^2.$$

Если считать, что удельное сопротивление органов и тканей в определённых диапазонах частот меняется незначительно, то величина эффекта пропорциональна разности интенсивностей поля на границах тела человека и с ростом частоты “эффективность” воздействия электромагнитного поля будет возрастать.

Пороговые интенсивности теплового действия ЭМП на живой организм, при которых такой организм начинает ощущать нагрев тела (тепловой порог электромагнитного поля), составляют для диапазона низких частот десятки киловольт на метр, средних и высоких частот – единицы киловольт на метр или сотни – десятки киловатт на квадратный метр, очень высоких – около 120...150 В/м или тысячи – сотни ватт на квадратный метр, для дециметровых и миллиметровых волн – около 200 – 170 В/м или 200 – 70 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 2.4).



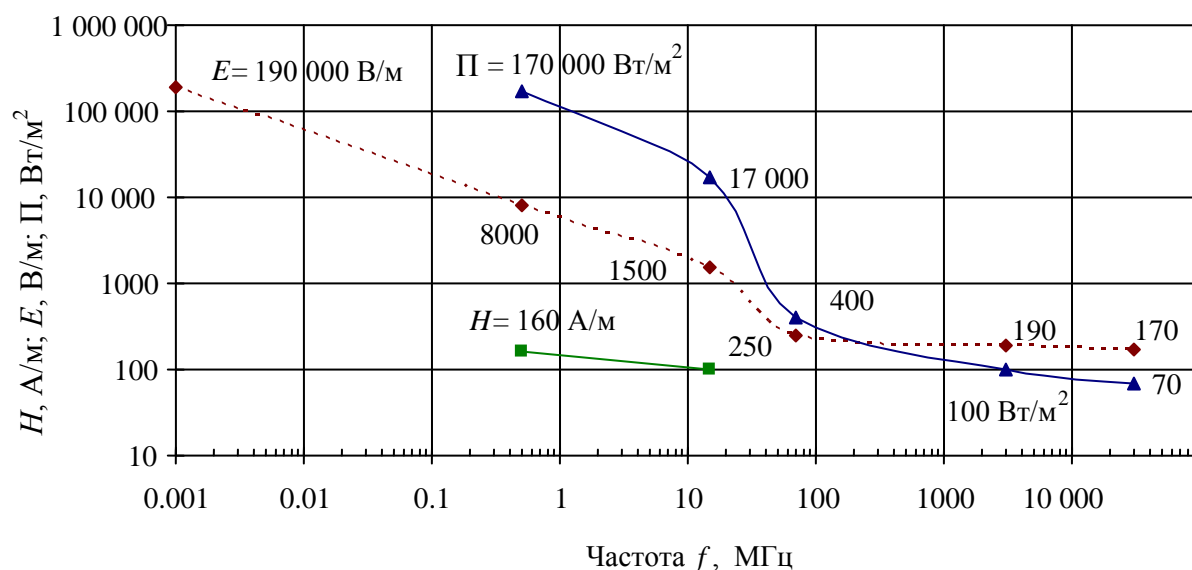


Рис. 2.4. Тепловой порог электромагнитных полей

Тепловые эффекты ЭМП успешно используют в медицине при осуществлении прогрева различных участков тела человека, подверженных болезням. К примеру, токами ультравысокой частоты лечат полученные из-за переохлаждения простудные или хронические болезни ушей, носа либо других органов. Локальный индукционный нагрев отдельных злокачественных опухолей за счёт имплантированного внутрь металлического предмета может разрушить поражённые клетки, минимальным образом затрагивая рядом расположенные здоровые клетки. Такие разработки проводятся, и исследования новых форм применения ЭМП будут продолжаться.

Пространственное распределение удельной поглощённой мощности внутри тела очень неоднородно. Неоднородное выделение энергии приводит к неоднородности глубокого прогрева тела и может вызвать возникновение внутренних температурных градиентов.

По критериям поглощения электромагнитной энергии человеком различают четыре области частот:

- от 100 кГц до 20 МГц. Значимое поглощение может произойти в шее и ногах;
- от 20 до 300 МГц. Сравнительно высокое поглощение может произойти в целом теле и в голове. Максимальная поглощённая мощность возникает при частоте приблизительно 70 МГц у человека в обычных условиях и приблизительно 30 МГц у человека, находящегося в контакте с землей. В экстремальных условиях температуры и влажности ожидается, что выделе-

ние во всём теле мощности от 1 до 4 Вт/кг при 70 МГц вызовет у здорового человека подъём внутренней температуры примерно на 2 К в течение одного часа. Существуют резонансные частоты в отношении удельной поглощённой мощности для различных участков человеческого тела, т. е. такие частоты, при которых происходит максимальное поглощение ими энергии (100 МГц для ног; 100...300 МГц для рук; 300...400 МГц для головы);

- от 300 МГц до нескольких гигагерц. Поглощение происходит в локальных неоднородных частях (к примеру, наблюдается интенсивный перегрев хрящей, сухожилий, поскольку в зоне ЭМП они характеризуются как диэлектрики);
- выше 10 ГГц. Поглощение происходит в основном на поверхности тела.

ЭМП с небольшой интенсивностью не обладает термическим действием на организм, но вызывает *нетепловое действие*, т. е. переход ЭМ-энергии в объекте в какую-либо форму нетепловой энергии.

*Информационное воздействие* ЭМП является одной из форм нетеплового воздействия. Оно проявляется в том, что рецепторы различных органов или частей тела человека, возбуждаясь под действием ЭМП, передают информацию центральной нервной системе. Известно, что зрительная система реагирует на ЭМП светового диапазона частот. Простейшие животные, моллюски, рыбы и птицы ориентируются по силовым линиям электромагнитного поля Земли, однако обычному человеку это не доступно. Электромагнитные поля инфракрасного диапазона частот (конечно, большей частью с помощью тепла) тоже информируют человека о наличии источников такого излучения. Электростатическое поле за счёт силового воздействия на волосяной покров тела, при котором человек может ощущать как волосы “поднимаются”, также оказывает информационное воздействие, свидетельствующее о наличии такого поля.

Вполне возможно, что на подсознательном уровне человека информационным воздействием обладает и обычное ЭМП другого человека, близкое присутствие которого иногда угадывается. Изменение характеристик этого поля служит основанием для определения болезни, а внезапное исчезновение или отсутствие внутреннего поля говорят о смерти человека. Конечно это проблемные вопросы, на которые в настоящее время ответ ещё не найден, но вполне возможно в ближайшем будущем будут созданы приборы, реагирующие на подобные изменения, или приборы, позволяющие лечить людей на расстоянии.

Электромагнитное поле за счёт наведения сторонних электрических токов в теле человека способно вызывать сбой в каналах передачи информационных сигналов, осуществляемых с помощью биотоков человека. Микроволны с ППЭ  $10 \text{ Вт/м}^2$  вызывают чётко выраженное изменение биоэлектрической активности мозга практически у всех людей; информационным действием на организм человека обладают сигналы любой энергетической природы с интенсивностью  $10^{-2} \dots 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ .

Существует биологическая реакция на очень слабые электрические и магнитные поля: изменяется мобильность ионов кальция в мозговых тканях, происходят изменения в схеме “запуска” нейронов и отмечается изменённое поведение объекта исследования.

Информационное воздействие может проявляться в аудиоэффектах (например при облучении импульсным электромагнитным полем радиолокационных станций некоторые американские лётчики ощущали возбуждаемые звуки в виде щелчков, жужжания или чириканья, как бы происходящих в голове).

Электромагнитные волны лишь частично поглощаются тканями биологического объекта, поэтому *биологический эффект* зависит от физических параметров ЭМП радиочастотного диапазона: длины волны (частоты колебаний), интенсивности и режима излучения (непрерывный, прерывистый, импульсно-модулированный), продолжительности и характера облучения организма, а также от площади облучаемой поверхности и анатомического строения органа или ткани.

Медицина накопила большое количество данных о связи различного рода последствий и заболеваний с воздействием ЭМП (рис. 2.5).

На первом месте стоят заболевания нервной системы, так как она наиболее чувствительна к воздействию излучений. Далее по чувствительности к ЭМП стоят сердечно-сосудистая система, кроветворная система и затем остальные органы и системы человеческого организма. От воздействия ЭМП может страдать иммунная, эндокринная и половая системы.

Чтобы вызвать значимые эффекты, интенсивность ЭМП нулевой частоты должна быть крайне высокой, тем не менее исследования постоянных электромагнитных полей даже слабой интенсивности выявили подавление жизнедеятельности биологических структур. Электростатическое поле от экрана телевизора или монитора одновременно с электростатическим зарядом оператора может оказаться причиной кожных расстройств. Постоянное маг-

нитное поле с индукцией, превышающей 2 Тл, может стать причиной возникновения острых реакций, таких, как головокружение или тошнота, и вредных для здоровья эффектов, возникающих из-за сердечной аритмии или ослабления функций мозга. Теоретически, в сильном магнитном поле при 5 Тл и более магнитные эффекты могут задерживать протекание крови и вызывать подъём кровяного давления.



Рис. 2.5. Некоторые нарушения и последствия воздействия ЭМП на человека

Исследования рабочих, занятых в производстве постоянных магнитов, выявили различные субъективные симптомы и функциональные расстройства: раздражительность, усталость, головную боль, потерю аппетита, брадикардию (замедленное сердцебиение), тахикардию (ускоренное сердцебиение), пониженное кровяное давление, зуд, жжение и онемение конечностей. У людей, подвергавшихся воздействию магнитного потока плотностью 4 Тл, отмечалось возникновение сенсорных эффектов, связанных с движением в этом поле. К таким эффектам относились, например, головокружение, чувство тошноты, металлический привкус во рту и магнитные ощущения при движении глаз или головы.

*ЭМП низкочастотного диапазона* (до частоты 50 Гц), совпадающие с частотами биоэлектрической активности головного мозга человека (альфа- ,

бета-, гамма- и дельта-ритмами), могут нарушать его нормальную работу, в результате чего ухудшаются процессы запоминания информации и контроль движения, а среднечастотные (до 10 кГц) – вызывать аудиоэффекты.

Зрительные ощущения мерцания возникают в человеческом глазу при воздействии магнитным полем 5...10 Тл. На частотах 1...1.5 кГц с индукцией несколько микротесла, когда плотность тока превышала 1 А/м<sup>2</sup>, происходит раздражение нервных клеток и мышц человека. Нейрофизиологические исследования показывают, что при плотности тока свыше 10 мА/м<sup>2</sup> тонкие функции центральной нервной системы, например способность к рассуждению или память, могут ухудшаться. Пороговые значения, при которых возникают зрительные ощущения, остаются постоянными до частоты приблизительно 1 кГц и возрастают при дальнейшем её увеличении.

Вплоть до конца 80-х годов считалось, что неионизирующее излучение не может вредно влиять на организм, если его интенсивность недостаточно велика. Однако лабораторные исследования дали совсем другие результаты. В ряде экспериментов было обнаружено, что ЭМП промышленной частоты (возникающие вокруг линий электропередач, видеодисплеев и даже внутренней электропроводки и бытовых электроприборов) могут инициировать биологические сдвиги (вплоть до нарушения синтеза ДНК) в клетках животных.

Эпидемиологические исследования показали, что существует связь между проживанием вблизи линии электропередач и возникновением онкологических заболеваний у детей, между интенсивной работой с видеодисплеями и частотой выкидышей на разных стадиях беременности. В отличие от рентгеновских лучей электромагнитные волны радиочастот обладают необычным свойством: опасность их воздействия совсем не обязательно уменьшается при снижении интенсивности облучения. Определённые виды ЭМП, по-видимому, действуют на клетки лишь при малых интенсивностях излучения или на конкретных частотах.

Исследования в области “электрических” профессий выявили дополнительный риск лейкемии и возникновения опухоли мозга у рабочих-электриков. Исследования в области профессиональной медицины выявили одну особую форму лейкемии – острую костномозговую, и распространение другой формы – хронической лимфолейкемии. Результаты исследований, проведенных на жителях Скандинавии, показывают удвоенный риск в заболевании их лейкемией при уровне воздействия выше 0.2 Тл на частоте 50 Гц.

У некоторых людей сверхчувствительность к электричеству проявляется большим разнообразием симптомов и недугов, связанных в основном с кожей (покраснение, огрубление, повышенная температура, ощущение покалывания, тупая боль и “натянутость”) или с нервной системой (головная боль, головокружение, усталость и тошнота, ощущения покалывания и покалывания в конечностях, одышка, учащённое сердцебиение, обильное потоотделение, депрессии и проблемы с памятью). При этом характерных симптомов органических заболеваний нервной системы не наблюдается.

Длительное хроническое действие радиоволн ультравысоких и сверхвысоких частот может вызвать функциональные изменения и истощение центральной нервной системы и изменения в сердечно-сосудистой системе с последующими головными болями, нарушением сна или сонливостью, повышенной утомляемостью, раздражительностью, головокружением, ухудшением памяти, понижением половой потенции, понижением или повышением давления, изменениями в составе крови, печени и селезёнке. Возможны гормональные сдвиги и нарушение обменных процессов, трофические расстройства: похудение, выпадение волос и ломкость ногтей.

Большую озабоченность вызывает воздействие ЭМП сотовых телефонов на здоровье человека, в первую очередь на детей и подростков. В результате исследований выявлены изменения биоэлектрической активности мозга, сохраняющиеся в течение двух часов после прекращения действия ЭМП; увеличение времени реакции; головные боли, отличающиеся от обычных; головокружение; повышенная усталость; нарушение сна; раздражительность; гиперчувствительность и другие эффекты.

Воздействие электромагнитных излучений увеличивает вероятность возникновения онкологических заболеваний и генетических изменений. Это связано с тем, что они могут стимулировать возникновение канцерогенных процессов в тканях человеческого организма, особенно у беременных женщин, детей и молодых людей в возрасте до 25...30 лет, у которых не завершился рост клеток в развивающемся организме. Именно поэтому во многих странах беременным женщинам и детям рекомендовано ограничить пользование сотовыми телефонами. Наименее подверженными риску возникновения рака являются люди преклонного возраста, у которых цикл роста тканей закончился.

Продолжаются также эпидемиологические исследования по проблеме связи использования мобильных телефонов и рака мозга. Пока были опубликованы только исследования на животных (в экспериментах мыши подвергались в течение 18 месяцев ежедневному часовому воздействию сигнала, аналогичного сигналу, применяющемуся в цифровой мобильной связи. В конце эксперимента 43 из 101 подвергавшихся экспозиции животных имели лимфомы).

Исследования воздействия ЭМП на человеческий организм показывают, что изменения в органах и тканях продолжают происходить в течение некоторого времени и после прекращения воздействия электромагнитного излучения – реакция “*последствия*” ЭМП. Изменения в организме могут быть обратимыми или необратимыми. Возможно накопление (кумуляция) воздействия излучения на человека.

Вновь образовавшиеся на этапе “действия” ЭМП микрочастицы имеют период существования от долей микросекунд до нескольких секунд для возбуждённых молекул и более длительное время для ионов, полученных в результате диссоциации. Они вступают в реакцию с окружающими веществами или разносятся по всему организму, вызывая различные метаболизмы. Биохимические и физиологические процессы, протекающие на этапе последствия, очень сложны. Примерами последствия могут служить активность артериальной крови (свечение) при её облучении лазерным излучением за счёт большей насыщенности кислородом, блокирование передачи сигналов боли по нервному стволу в зоне облучения (процесс обезболивания лазерным излучением) и другие.

Нежелательным результатом эффектов резонансного поглощения энергии ЭМП на область головы и позвоночника может явиться потеря контроля над моторными функциями.

Операторы видеотерминалов выражают озабоченность по поводу возможных эффектов, возникающих вследствие эмиссии низкоуровневого излучения. Несмотря на интенсивные исследования эксперты не могут договориться о степени вреда, причиняемого ЭМП ПЭВМ. В то же время слишком большое число компьютерных пользователей жалуются на симптомы заболеваний, которые трудно объяснить иными причинами. Пока достоверные знания по этому вопросу не получены, было принято решение ограничивать ЭМП ПЭВМ на технически достижимом низком уровне.

## 2.4. Особенности воздействия на человека оптических излучений

Оптическое излучение, как правило, не проникает глубоко в ткани организма. Таким образом, основными объектами воздействия инфракрасного излучения становятся кожа и глаза. В большинстве случаев основным механизмом воздействия ИК-излучения является тепловой, и только очень короткие мощные импульсы, которые могут давать лазеры, могут привести к механотермическим эффектам.

ИК-Излучение является одним из факторов теплового стресса. Высокие температура окружающего воздуха и влажность, а также низкий уровень воздушной циркуляции, могут в сочетании с лучистым теплом вызвать тепловой стресс, потенциально приводящий к тепловым повреждениям.

Существует по крайней мере пять отдельных видов опасности для глаз и кожи, возникающих при интенсивном излучении света и ИК-источников.

1. Термические повреждения, которые могут возникнуть при длинах волн от 400 до 1400 нм от лазеров – очень сильных источников с излучением дуги ксенона. В слепом пятне сетчатки возникает местный ожог (скотома).

2. Фотохимические повреждения сетчатки, вызываемые фиолетовым или голубым светом, преимущественно с длинами волн 440...550 нм – фото-ретинит “голубого света”, или *солнечный ретинит*.

3. Термическая опасность ИК-излучения для хрусталика, связанная с длинами волн приблизительно 800...3000 нм, которая обладает также способностью вызывать “катаракту промышленного нагрева”. У рабочих стекольной и сталеплавильной промышленности, подвергавшихся инфракрасному облучению порядка 0.8...4 кВт/м<sup>2</sup> ежедневно в течение 10...15 лет, развивалось помутнение хрусталика.

4. Термические повреждения сетчатки и конъюнктивы (при длинах волн приблизительно 1400 нм...1 мм) преимущественно от лазерного излучения.

5. Термические повреждения кожи могут возникать в пределах всего оптического спектра, хотя и довольно редко.

Из-за прозрачности глазного центра ИК-А воздействует в основном на сетчатку, наиболее чувствительную к повреждению, чем на любые другие части тела из-за фокусирующих свойства в области ИК-А-излучения. Для коротких периодов облучения важную роль в развитии помутнения зрачков играет нагревание радужки из-за поглощения видимого или ИК-излучения.



С увеличением длины волн свыше, примерно, 1 мкм поглощение излучения глазным центром возрастает. Таким образом, в образовании катаракты играет роль поглощение ИК-А излучения как хрусталиками, так и пигментированной радужкой. Повреждение хрусталика вызывается волнами до 3 мкм (ИК-А и ИК-В). Для ИК-волн более 1.4 мкм особенно сильными абсорбентами являются внутриглазная жидкость и хрусталик.

В ИК-В- и ИК-С-областях спектра глазной центр становится матовым в результате сильной абсорбции излучения составляющей его водой. Поглощение в этой области излучения сосредоточено в основном в роговице и внутриглазной жидкости. При длине волны менее 1.9 мкм роговица является единственным эффективным абсорбентом излучения. В диапазоне ИК-С-излучения экспозиция может вызвать ожог роговицы.

Облучение кожи очень сильным ИК-излучением может привести к возникновению местных термических эффектов различной тяжести и даже вызывать серьёзные ожоги. Наибольшее проникновение ИК-излучения в тело человека отмечается при длинах волн  $750 \pm 200$  мкм (от 5 до 21 % поглощается в жире, а остальное – в коже). Плотность теплового потока  $10 \text{ кВт/м}^2$  может в течение 5 с вызвать болезненные ощущения, в то время как  $2 \text{ кВт/м}^2$  в течение периода продолжительностью менее 50 с подобной реакции не вызовет.

В отсутствие какой-либо физической работы максимальное ИК-облучение с  $300 \text{ Вт/м}^2$  при определённых условиях окружающей среды может переноситься более восьми часов. Однако во время тяжелой физической работы это значение снижается примерно до  $140 \text{ Вт/м}^2$ .

УФ-В является наиболее вредным для глаз и кожи видом ультрафиолетового излучения, и, хотя большинство этой энергии (входящей в состав солнечного света) поглощается атмосферой, она вызывает солнечный ожог и приводит к другим биологическим эффектам. Несмотря на то, что УФ-А может глубоко проникать в ткани, оно не является столь биологически разрушительным, сколь УФ-В, потому что энергии отдельных фотонов в нем меньше, чем в УФ-В или УФ-С.

Молекулярные повреждения основных клеточных элементов кожи и тканей глаза, возникающие в результате воздействия УФ-излучения, происходят постоянно. Однако существуют механизмы восстановления, и только когда они подавлены, может проявиться острое биологическое повреждение.

*Эритема*, или “солнечный ожог” – покраснение кожи, обычно, проявляющееся через 4...8 ч после воздействия ультрафиолетового излучения и постепенно бледнеющее в течение нескольких дней. Серьёзный солнечный ожог может повлечь за собой образование пузырей на коже и её шелушение. Как УФ-В, так и УФ-С примерно в 1000 раз более опасны для возникновения эритемы, чем УФ-А, но эритема, вызываемая более длинными волнами УФ-В (от 295 до 315 нм), бывает более тяжёлой и продолжается дольше. Увеличивающиеся тяжесть и период действия эритемы связаны с более глубоким проникновением волн этой длины в эпидермис.

Специалисты в области профессиональной гигиены часто сталкиваются с неблагоприятными эффектами, возникающими в результате профессиональной экспозиции ультрафиолету у фотосенсибилизированных рабочих. Фотосенсибилизация кожи может быть вызвана кремами или мазями, нанесёнными на кожу, лекарствами или инъекциями, а также использованием рецептурных ингаляторов.

Длительное облучение солнечным светом, особенно его ультрафиолетовым компонентом, ускоряет старение кожи и увеличивает риск развития рака кожи. Точные количественные взаимоотношения “доза–реакция” для канцерогенеза человеческой кожи еще не установлены, хотя светлокожие люди, особенно кельтского происхождения, гораздо больше подвержены возникновению рака кожи.

Фотокератит и фотоконъюнктивит – это острые воспалительные реакции, возникающие в результате воздействия УФ-В- и УФ-С-излучения, проявляющиеся в течение нескольких часов избыточного облучения и обычно, проходящие в течение одного-двух дней.

Ультрафиолетовое излучение видов УФ-В, УФ-С сильно поглощается дермой и конъюнктивой, вызывая кератоконъюнктивит, обычно называемый “вспышка сварщика”, “дуговой глаз” или “снежная слепота”. Заболевание проявляется в течение 6...12 ч, а недомогание исчезает в течение 48 ч. Радиация редко вызывает необратимые глазные повреждения. Исследования роговичных тканей показали, что они быстро восстанавливаются и заживают.

УФ-В в солнечном свете является фактором старческой катаракты. Хотя УФ-В-излучение вызывает мутагенные и канцерогенные процессы в коже, очень редко встречается канцерогенез в роговице и конъюнктиве.

## 2.5. Воздействие на человека лазерного излучения

При воздействии лазерного излучения нарушается жизнедеятельность как отдельных органов, так и организма в целом. Непосредственное воздействие на человека оказывает лазерное излучение любой длины волны, однако в связи со спектральными особенностями поражаемых органов и различными предельно допустимыми дозами облучения обычно различают воздействие на глаза и на кожные покровы человека.

Основной элемент зрительного аппарата человека – *сетчатка глаза* может быть поражена лишь излучением видимого (от 0.4 мкм) и ближнего ИК- (до 1.4 мкм) диапазонов, что объясняется спектральными характеристиками человеческого глаза: относительным пропусканием глазной среды  $\Psi_1$  и произведением пропускания глазной среды на поглощение всеми слоями сетчатки  $\Psi_2$  (рис. 2.6).

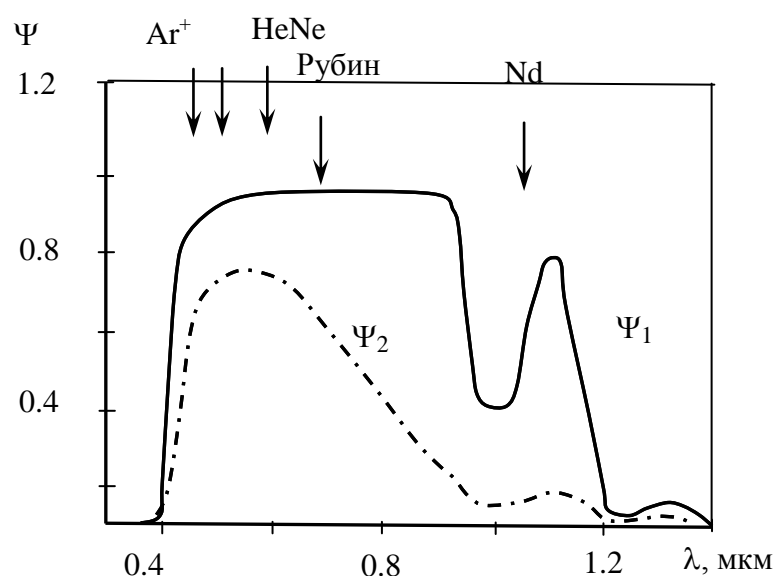


Рис. 2.6. Спектральные характеристики глаза

При этом хрусталик и глазное яблоко, действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышают концентрацию энергии на сетчатке, что, в свою очередь, на несколько порядков понижает максимально допустимый уровень облучённости зрачка.

Основные факторы, определяющие биологическое действие лазерного излучения, представлены на рис. 2.7.

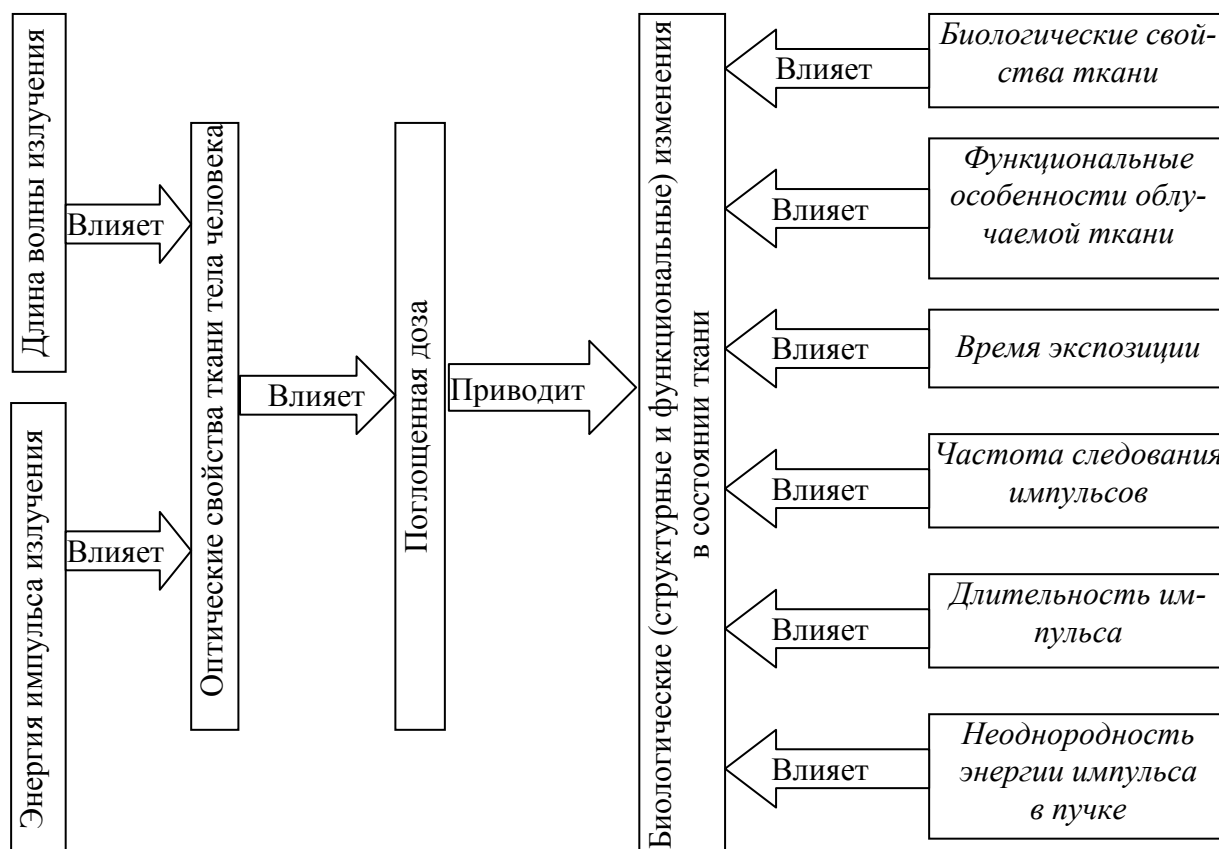


Рис. 2.7. Характеристика влияющих факторов лазерного излучения

При воздействии лазерного излучения на организм человека различают три стадии: физическую, физико-химическую и химическую.

На первой (*физической*) стадии происходят нагревание вещества, преобразование энергии электромагнитного излучения в механические колебания, ионизация атомов и молекул, возбуждение и переход электронов с валентных уровней в зону проводимости, рекомбинация возбужденных атомов и т. д. При воздействии непрерывного лазерного излучения преобладает в основном тепловой механизм действия, в результате которого происходит свёртывание белка, а при больших мощностях – испарение биологической ткани. При импульсном режиме вероятно преобразование излучения в энергию механических колебаний среды: протоплазма клеток из-за быстрого разогрева закипает и разрывает оболочку. При мощности свыше 10 Вт и высокой степени фокусировки лазерного луча возможна ионизация вещества.

На второй стадии (*физико-химической*) из ионов и возбуждённых молекул образуются свободные радикалы, обладающие высокой способностью к химическим реакциям.

На третьей стадии (*химической*) свободные радикалы реагируют с молекулами веществ, входящих в состав живой ткани, и при этом возникают те молекулярные повреждения, которые определяют общую картину воздействия лазерного излучения на облучаемую ткань и организм в целом.

Эффекты воздействия лазерного излучения (тепловой, фотохимический, ударно-акустический и др.) определяются механизмом его взаимодействия с тканями и зависят от энергетических и временных параметров излучения и физико-химических особенностей облучаемых тканей и органов.

Лазерное излучение представляет особую опасность для тканей, максимально поглощающих излучение. Сравнительно легкая уязвимость роговицы и хрусталика глаза, а также способность оптической системы глаза многократно увеличивать плотность энергии (мощности) излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов ( $780 < \lambda \leq 1400$  нм) на глазном дне по отношению к роговице делают глаз наиболее уязвимым органом.

При повреждении появляется боль в глазах, спазм век, слезотечение, отёк век и глазного яблока, помутнение сетчатки, кровоизлияние. При неблагоприятных условиях лазерное излучение может привести к повреждению глаза. Степень тяжести и характер повреждения зависят от длины волны излучения, его энергии, длительности воздействия и других условий. Клетки сетчатки после повреждения не восстанавливаются. Длительное действие лазерного излучения видимого диапазона на сетчатку глаза (не намного меньше порога ожога) может вызвать необратимые изменения в ней, а в диапазоне ближнего ИК-излучения – привести к помутнению хрусталика глаза.

УФ- ( $180 < \lambda \leq 315$  нм) или ИК-излучения ( $1400 < \lambda \leq 10^6$  нм) практически не доходят до сетчатки и потому могут повреждать лишь наружные части глаз человека: УФ-излучение вызывает фотокератит, средневолновое ИК-излучение ( $1400 < \lambda < 3000$  нм) – отёк, катаракту и ожог роговой оболочки глаза; дальнее ИК-излучение ( $3000 < \lambda < 10^6$  нм) – ожог роговицы.

Повреждение кожи может быть вызвано лазерным излучением любой длины волны в спектральном диапазоне  $180 \dots 1 \cdot 10^5$  нм. Характер поражения аналогичен термическим ожогам. Степень тяжести повреждения кожи, а в некоторых случаях и всего организма, зависит от энергии излучения, длительности его воздействия, площади поражения, её локализации, добавления вторичных источников воздействия (горение, тление). Действие лазерного излучения на кожу приводит к различным поражениям: от легкой эритемы

(покраснения) до поверхностного обугливания и в конечном итоге образования глубоких дефектов кожи. Повреждение кожи энергией лазерного излучения УФ-диапазона спектра (нетепловые уровни энергии) может происходить без возникновения каких-либо ощущений. Минимальное повреждение кожи развивается при плотности энергии  $1000...10\,000\text{ Дж/м}^2$ .

Лазерное излучение дальней инфракрасной области ( $>1400\text{ нм}$ ) способно проникать через ткани тела на значительную глубину, поражая внутренние органы (прямое лазерное излучение). Например, прямое облучение поверхности брюшной стенки вызывает повреждение печени, кишечника и других органов брюшной полости; при облучении головы возможны внутричерепные и внутримозговые кровоизлияния.

Длительное хроническое действие диффузно отражённого лазерного излучения малой интенсивности может вызывать неспецифические, преимущественно вегетативно-сосудистые нарушения; функциональные сдвиги могут наблюдаться со стороны нервной и сердечно-сосудистой систем, желез внутренней секреции. Работающие жалуются на головные боли, повышенную утомляемость, раздражительность, потливость.

Интересно отметить некоторые положительные эффекты лазерного облучения (информационное воздействие) – в частности, обезболивание физиотерапевтическим лазером при лечении раковых заболеваний. Эффект заключается в выводе из строя рецептора, что приводит к нарушению передачи сигнала от рецептора к системе восприятия этого сигнала и последующему выводу из строя системы анализа информации. В связи с тем, что через определённое время болевые ощущения восстанавливаются, можно сделать вывод, что морфологических и разрушительных действий нервной системы при этом не наблюдается.

## **2.6. Контрольные вопросы**

Как ведут себя электрофизические параметры тканей человека с ростом частоты?

В чём выражается информационное действие электромагнитных полей?

Что такое тепловой порог ЭМП, и как он зависит от мощности?

В чём состоят особенности резонансных частот ЭМП?

В чём выражаются основные отличия воздействия ЭМП на живую материю от воздействия на неживую материю?

Каковы особенности воздействия на человека оптических излучений?

## 2.7. Выводы

В зависимости от своих параметров ЭМП воздействуют на человека по-разному. Энергия, способная выделяться в теле человека, зависит от частоты, поэтому считается, что высокочастотные ЭМП вызывают большее воздействие на него, чем низкочастотные или статические ЭМП (по крайней мере по критериям теплового действия). С ростом частоты всё большее значение приобретает ионизация вещества, взаимодействующая с ЭМП, поэтому, начиная с жёсткого ультрафиолетового излучения, такие ЭМП называют ионизирующими. Они значительно сильнее воздействуют на человека, приводя к серьёзным заболеваниям. Несмотря на научные дискуссии и сомнения о доказательствах вредности низкочастотных электромагнитных полей, особенно промышленной частоты, всё большую озабоченность вызывает проблема воздействия слабых низкочастотных ЭМП, которые не способны создавать тепловые эффект, а выражаются в основном в биологических эффектах, которые ещё пока мало изучены.

## 3. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

### 3.1. Принципы нормирования ЭМП

Одним из основных организационных принципов защиты от опасного и вредного воздействий электромагнитных полей на человека как негативного фактора является их нормирование. Риск здоровью и жизни человека в зоне воздействия ЭМП не должен превышать определённой величины, которую на данном этапе развития общество может считаться приемлемой.

*Гигиеническое нормирование ЭМП на человека осуществляется отдельно для бытовых и производственных условий на основе следующих основных подходов:*

- для населения ЭМП нормируется только по ПДУ;
- для производственных условий нормирование ведётся как по ПДУ или ВДУ, так и в зависимости от времени нахождения под воздействием ЭМП.

В бытовых условиях человек может подвергаться воздействию ЭМП непрерывно в течение длительного времени (круглосуточно), не подозревая об этом. На производстве длительность воздействия ЭМП может регулироваться, а его уровень должен контролироваться. Производственный персонал, работающий во вредных условиях, постоянно находится под медицин-

ским контролем. Обнаружение отклонений здоровья на самой ранней стадии их возникновения позволяет принять предупредительные меры, вплоть до перевода работника на работы, не связанные с вредным воздействием. В отношении населения подобные меры труднореализуемы.

Нормирование воздействия на человека производится в зависимости от вида ЭМП и частоты. При частоте электромагнитного излучения источника до 10 кГц длина волны составляет более 30 км, поэтому человек, находясь в зоне индукции, подвергается воздействию, как правило, только одной преобладающей составляющей ЭМП (магнитной или электрической). Вплоть до частоты 300 МГц человек, вероятнее всего, попадёт или в зону индукции, или в переходную зону. В этом случае ЭМП нормируется отдельно по напряжённости магнитного и электрического полей. При частоте источника свыше 300 МГц человек находится в зоне воздействия сформировавшейся электромагнитной волны, в связи с чем нормирование ведётся по плотности потока мощности (энергии).

*Принципы нормирования* основаны, как правило, на недопущении опасных и вредных воздействий ЭМП на человека по следующим двум характеристикам:

- тепловому порогу;
- биологическим эффектам, способным недопустимым образом воздействовать на сердечно-сосудистую и центральную нервную системы.

Кроме этого, в практике отечественного нормирования учитываются накопление вредных биологических факторов при длительном облучении, а также после прекращения облучения возможность адаптации к ЭМП и восстановления организма за определённое время отдыха. В связи с тем, что выявление этих факторов занимает много времени и сил, требует тщательности и неоднократной проверки, некоторые диапазоны частот в России не были охвачены исследованиями, поэтому имеются некоторые “окна”, в которых нормы не определены.

ПДУ электростатического поля и постоянного магнитного поля определяются не на основе теплового порога, который практически никогда не может быть достигнут, а по критериям отсутствия нетепловых эффектов.

*Максимально допустимые значения* параметров ЭМП радиочастотного диапазона определяются из теплового порога с определёнными коэффициентами запаса, превышать которые не рекомендуется даже кратковременно. В



то же время зависимость от времени ПДУ ЭМП определяются исходя из допустимой поглощённой энергии (принцип дозирования в виде энергетической нагрузки или энергетической экспозиции, аналогичной дозе или мощности дозы для ионизирующих излучений).

В мировой практике, в частности ICNIRP, начиная с некоторой частоты ЭМП нормирование ведётся по удельной поглощённой электромагнитной мощности, которая характеризуется показателем, названным SAR (Specific Absorption Rate), и по плотности наведённого в теле человека тока. За основу принято предельное значение SAR, составляющее 4 Вт/кг. Считается, что выше этого значения вероятность вредных для здоровья последствий в результате поглощения радиочастотной энергии возрастает. В качестве основы для вычисления пределов профессиональной экспозиции принят *“множитель безопасности”*, равный 10, и используется значение 0.4 Вт/кг для работающих (для населения ПДУ снижен ещё в пять раз и составляет 0.08 Вт/кг).

Также считается, что биологических эффектов можно избежать ограничением плотности индуцированных в голове токов  $10 \text{ мА/м}^2$  при частотах от 4 Гц до 1 кГц. Этот лимит основан на том, что плотность токов, создаваемая электрической активностью нервов и мышц обычно составляет  $1 \text{ мА/м}^2$  и может достигать  $10 \text{ мА/м}^2$  в сердце, и поэтому указанная плотность тока не должна оказывать вредного воздействия на нервы, мышцы и другие ткани. Для более низких и более высоких частот допустимая плотность тока возрастает.

В то же время имеются и допустимые значения отдельных составляющих ЭМП как для непрерывного облучения, превышающего так называемое время осреднения (6 мин) или равного ему, так и для кратковременного воздействия (менее 6 мин).

Самые жесткие требования к нормированию ЭМП предъявлены для электронно-вычислительной и офисной техники. Временно допустимые уровни ЭМП от ПЭВМ намного жёстче (в 20 – 400 раз меньше), чем соответствующие значения таковых для промышленных или для бытовых условий применительно к другим электрическим системам, и основываются на принципе *“настолько низко, насколько рационально достижимо”*.

### 3.2. Состояние нормирования ЭМП

Основными российскими нормативными документами по неионизирующему ЭМП являются СанПиН 2.2.4.1191–03, СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190–03, СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383–03, СанПиН 2.2.4.1329–03, ГОСТ 12.1.006–84, а для ПЭВМ – СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03, МСанПиН 001–96 и некоторые другие.

Весь диапазон частот электромагнитных полей в производственных условиях охвачен СанПиН 2.2.4.1191–03. Для радиочастот, начиная с 30 кГц и выше, предельно допустимые значения  $E$ ,  $H$  или ППЭ на рабочих местах персонала определяются исходя из допустимой энергетической экспозиции (или энергетической нагрузки) и времени воздействия по следующим формулам:

$$E_{\text{ПД}} = \sqrt{\frac{\text{ЭЭ}_{E_{\text{ПД}}}}{\tau}}, H_{\text{ПД}} = \sqrt{\frac{\text{ЭЭ}_{H_{\text{ПД}}}}{\tau}}, \text{ППЭ}_{\text{ПД}} = \frac{\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}_{\text{ПД}}}}{\tau},$$

где  $\text{ЭЭ}_{E_{\text{ПД}}}$ ,  $(\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}$ ,  $\text{ЭЭ}_{H_{\text{ПД}}}$ ,  $(\text{А/м})^2 \cdot \text{ч}$  и  $\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}_{\text{ПД}}}$ ,  $\text{Вт} \cdot \text{ч/м}^2$  – допустимые значения энергетической экспозиции в течение рабочего дня; в нижних индексах – предельно допустимые значения напряжённости электрического ( $E_{\text{ПД}}$ ), магнитного ( $H_{\text{ПД}}$ ) полей и плотности потока энергии (ППЭ<sub>ПД</sub>);  $\tau$ , ч – время воздействия.

Энергетические экспозиции, создаваемые ЭП, МП и ЭМП, равны, соответственно,  $\text{ЭЭ}_E = E^2 \tau$ ;  $\text{ЭЭ}_H = H^2 \tau$  и  $\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}_{\text{ПД}}} = \text{ППЭ} \cdot \tau$ .

В табл. 3.1 приведены принятые в России ПДУ электромагнитных полей всего диапазона частот, начиная с электростатического поля и постоянного магнитного поля (частота тока  $f = 0$ ) и кончая ЭМП частотой 300 ГГц. Нетрудно заметить, что с повышением частоты ПДУ уменьшаются, т. е. принято во внимание, что ЭМП более высоких частот более вредны.

СанПиН 2971–84 и СанПиН 2.1.2.1002–00 ограничивают напряжённости электрического поля и индукцию магнитного поля промышленной частоты для населения следующими значениями:

- внутри жилых зданий – 0.5 кВ/м и 10 мкТл;
- на территории жилой застройки – 1 кВ/м и 50 мкТл;
- в населённой местности, вне зоны жилой застройки, а также на территории огородов и садов – 5 кВ/м;

- на участках пересечения воздушных линий с автомобильными дорогами – 10 кВ/м;
- в ненаселённой местности (незастроенные местности, хотя бы и частично посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья) – 15 кВ/м;
- в труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения, – 20 кВ/м.

Таблица 3.1

$f$	$E_{\max}$ ( $E_{\text{ПДУ } 8 \text{ ч}}$ )	$\text{ЭЭ}_{E_{\text{ПД}}}$	$H_{\max}$ ( $H_{\text{ПДУ } 8 \text{ ч}}$ )	$\text{ЭЭ}_{H_{\text{ПД}}}$	$\text{ППЭ}_{\max}$ ( $\text{ППЭ}_{\text{ПДУ } 8 \text{ ч}}$ )	$\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}_{\text{ПД}}}$
	В/м	(В/м <sup>2</sup> )·ч	А/м	(А/м) <sup>2</sup> ·ч	Вт/м <sup>2</sup>	Вт·ч/м <sup>2</sup>
	Электромагнитные поля в производственных условиях					
0	60 000* (20 000)	–	24 000 (8000)	–	–	–
50 Гц	25 000* (5000)	–	1600* (80)	–	–	–
10...30 кГц	1000** (500)		100 (50)			
0.03...3 МГц	500 (50)	20 000	50 (5)	200	–	–
3...30 МГц	300 (30)	7 000	–	–	–	–
30...50 МГц	80*** (10)	800	3 (0.3)	0.72	–	–
50...300 МГц	80*** (10)	800	–	–	–	–
0.3...300 ГГц	–	–	–	–	10*** (0.25)	2
ВДУ ЭМП от ПЭВМ						
5 Гц ... 2 кГц	25	–	0.2	–	–	–
2...400 кГц	2.5	–	0.02	–	–	–
ЭМП для населения, лиц до 18 лет и беременных женщин****						
0.03...3 МГц	25	–	–	–	–	–
3...30 МГц	15	–	–	–	–	–
30...50 МГц	10	–	–	–	–	–
50...300 МГц	3	–	–	–	–	–
0.3...300 ГГц	–	–	–	–	0.1	–
ВДУ ЭМП, создаваемые подвижными станциями сухопутной радиосвязи непосредственно у головы пользователя						
27...30 МГц	45	–	–	–	–	–
30...300 МГц	15	–	–	–	–	–
0.3...2.4 ГГц	–	–	–	–	1	–

Примечания: 1. Максимальные значения параметров соответствуют времени воздействия не более 1 ч (\*), не более 2 ч (\*\*), не более 0.08 ч для диапазона частот 27...300 МГц и 0.2 ч – в диапазоне 0.3...300 ГГц (\*\*\*). ППЭ<sub>ПДУ</sub> для вращающихся и сканирующих антенн увеличены в 10 раз.

2. \*\*\*\*ПДУ напряжённости электрического поля от телевизионных станций: 5 В/м для 48.4 МГц; 4 В/м для 88.4 МГц; 2.5 В/м для 192 МГц 3 В/м и для 300 МГц.

В табл. 3.2 и на рис. 3.1 для сравнения приведены некоторые рекомендации ICNIRP по предельным воздействиям ЭМП на работающих.

Таблица 3.2

Частота тока $f$	$E$ , В/м	$H$ , А/м	$B$ , мкТл	ППЭ, Вт/м <sup>2</sup>
До 1 Гц	–	$1.63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	–
1...8 Гц	20000	$1.63 \cdot 10^5 / f^2$	$2 \cdot 10^5 / f^2$	–
8...25 Гц	20000	$2 \cdot 10^4 / f$	$2.5 \cdot 10^4 / f$	–
0.025...0.82 кГц	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	–
0.82...65 кГц	610	24.4	30.7	–
0.065...1 МГц	610	$1.6 / f$	$2 / f$	–
1...10 МГц	$610 / f$	$1.6 / f$	$2 / f$	–
10...400 МГц	61	0.16	0.2	10
400...2000 МГц	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	$f/40$
2...300 ГГц	137	0.36	0.45	50

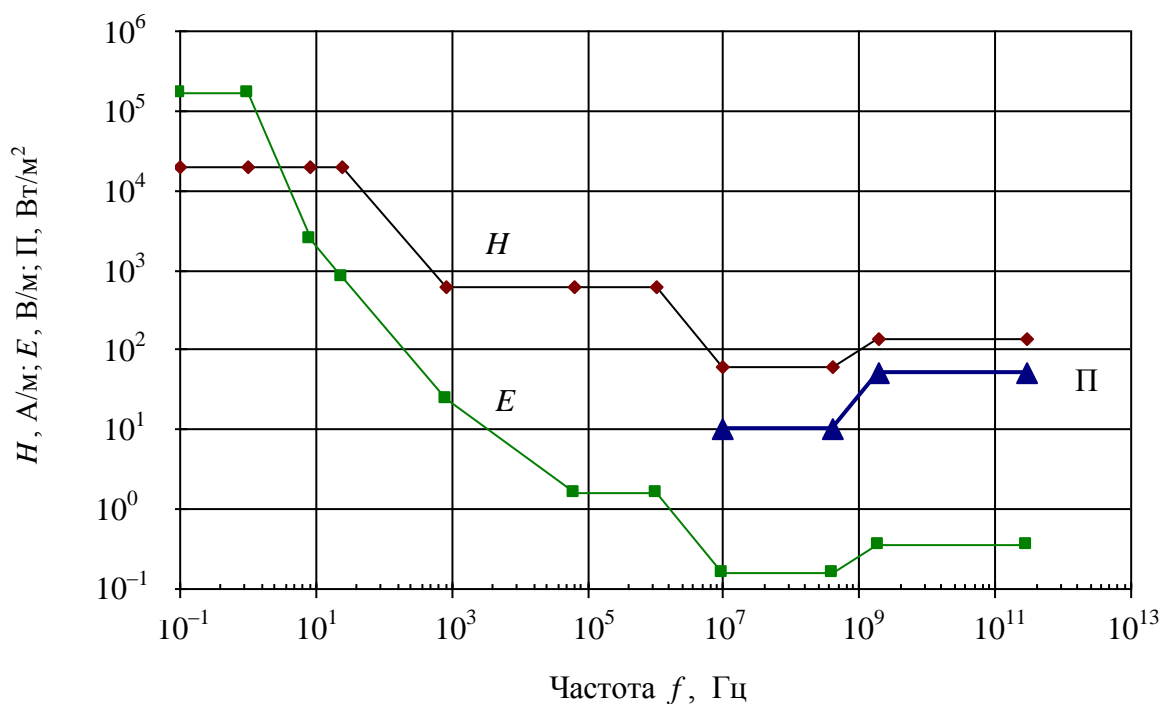


Рис. 3.1. Нормирование электромагнитных полей по ICNIRP

В настоящее время во многих странах (включая и Россию), используются ограничения по ЭМП ЭВМ, предусмотренные MPR-II 1990:8, 10 – стандартом, выпущенным Шведским национальным департаментом стандартов и утверждённым ЕЭС. MPR-II налагает ограничения на излучения от компьютерных мониторов и промышленной техники, используемой в офисе. Нормы шведского стандарта профсоюзов (включая последний TCO-03), несколько

жестче, чем МРП (по напряжённости электрического поля в 2.5 раза). Рекомендации, разрабатываемые Шведской конфедерацией профсоюзов и Национальным советом индустриального и технического развития Швеции NUTEK, регламентируют взаимодействие с окружающей средой. Для того чтобы получить сертификат ТСО, монитор должен иметь низкий уровень электромагнитного поля, обеспечивать автоматическое снижение энергопотребления при долгом неиспользовании, отвечать европейским стандартам пожарной и электрической безопасности. Требования к допустимым уровням ЭМП во всех редакциях оставались неизменными, за исключением того, что в ТСО-03 они были распространены также и на ЖК- и плазменные мониторы.

Следует при этом отметить, что для указанных стандартов несколько различаются между собой и методики проведения измерения контролируемых параметров. Так, для правил МРП-П измерения необходимо проводить на расстоянии 50 см вокруг монитора. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 измерение уровней ЭМП на рабочем месте, оборудованном ПЭВМ, производится на расстоянии 50 см от экрана на трёх уровнях на высоте 0.5; 1.0 и 1.5 м. Для правил ТСО показатели замеряются на расстоянии 0.3 м от фронтальной плоскости экрана и 0.5 м вокруг дисплея (за исключением магнитного поля в области 2...400 кГц, где все расстояния составляют 0.5 м).

Нормативные требования по оптическому диапазону электромагнитных излучений приведены на рис. 3.2.

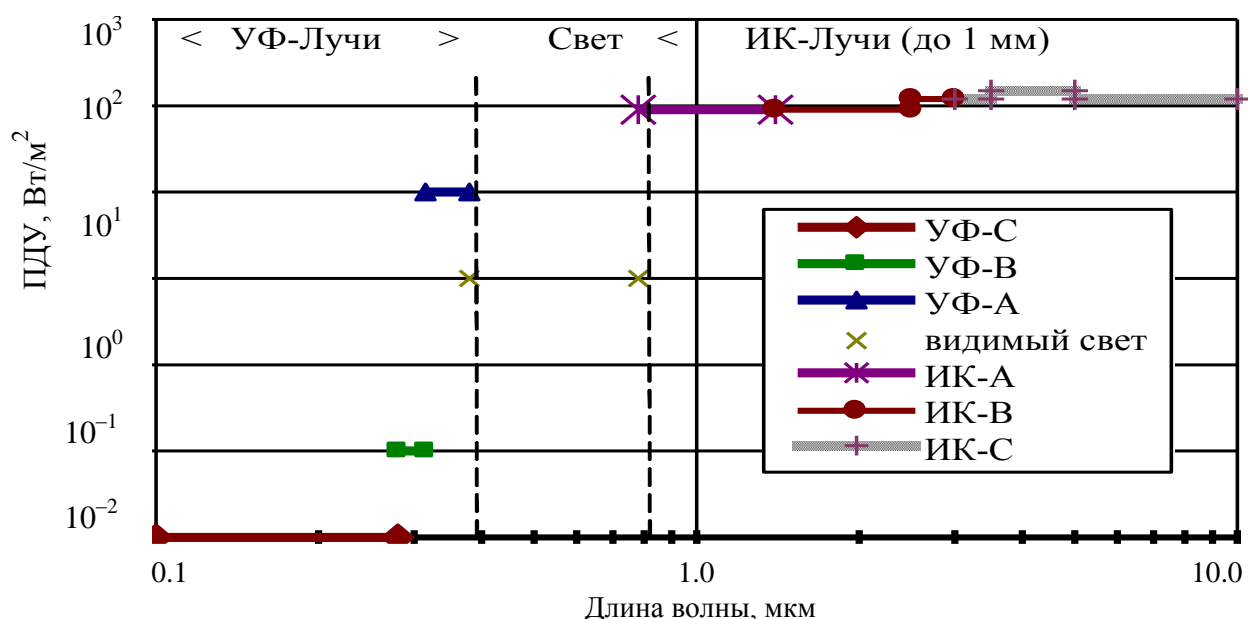


Рис. 3.2. Область оптического излучения и ПДУ для УФ- и ИК-излучений

Видно, что ПДУ для ИК-излучения значительно больше ПДУ плотности потока энергии ЭМП частотой 300 МГц...300 ГГц ( $0.25 \text{ Вт/м}^2$  для 8-часового рабочего дня или для максимально возможного значения  $10 \text{ Вт/м}^2$ ), установленных в России, и в два раза больше ПДУ, рекомендуемых ICNIRP. В то же время ПДУ УФ-излучения, особенно УФ-В и УФ-С, значительно меньше.

Согласно ГОСТ 12.1.005–88 и СанПиН 2.2.4.548–96 плотность теплового потока от нагретых поверхностей технологического оборудования и осветительных приборов не должна превышать 35; 70 и  $100 \text{ Вт/м}^2$  – при облучении, соответственно, более 50; от 25 до 50 и не более 25 % поверхности тела. От открытых источников (нагретые металл и стекло, открытое пламя) интенсивность теплового облучения не должна превышать  $140 \text{ Вт/м}^2$  при облучении не более 25 % поверхности тела и с *обязательным использованием средств индивидуальной защиты*, в том числе средств защиты лица и глаз.

**Нормирование лазерного излучения.** В нашей стране разработан и утвержден ряд нормативных документов, устанавливающих единую систему обеспечения лазерной безопасности и обеспечивающих безопасную эксплуатацию лазерных изделий. Согласно ГОСТ Р 50723—94, ГОСТ 12.1.040-83 и СН 5804-91, с позиций безопасности лазерного излучения для персонала и для населения нормируется облучённость (отношение мощности излучения, падающего на ограниченный участок поверхности, к площади этого участка)  $E_e$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , и энергетическая экспозиция (произведение облучённости на длительность облучения)  $ЭЭ_d$ ,  $\text{Дж/м}^2$ , усреднённые по ограничивающей апертуре (облучаемой поверхности). Наряду с энергетической экспозицией и облучённостью нормируемыми параметрами являются также энергия  $W$  и мощность  $P$  излучения, прошедшие через ограничивающие апертуры определённых размеров.

ПДУ лазерного излучения устанавливают для двух условий – однократного и хронического облучений, а также для трёх диапазонов длин волн. ПДУ *однократного воздействия* устанавливаются с допущением незначительной вероятности возникновения обратимых отклонений в организме работающего, а при хроническом воздействии – по критерию безвредности. *Предельные* характеристики устанавливаются отдельно для случаев однократного и хронического воздействий, для воздействия на глаза и кожу.

В отечественной нормативной литературе даны несколько вариантов классификации лазерных изделий. С позиции обеспечения лазерной безопасности их классифицируют по основным физико-техническим параметрам и степени опасности генерируемого излучения.

В соответствии с ГОСТ 12.1.040-83 и СН 5804-91 лазерные изделия по степени опасности генерируемого ими излучения подразделяются на четыре класса (табл. 3.3). При этом класс опасности лазерного изделия определяется классом опасности используемого в нем лазера.

Таблица 3.3

Класс	Лазеры
1	Выходное излучение их не представляет опасности для глаз и кожи
2	Выходное излучение их представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отражённым излучением
3	Выходное излучение их представляет опасность при облучении глаз прямым и зеркально отражённым излучениями, а также диффузно-отражённым излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности и (или) при облучении кожи прямым и зеркально отражённым излучениями
4	Выходное излучение их представляет опасность при облучении кожи диффузно-отражённым излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности

При определении *класса опасности* лазерного излучения учитываются три спектральных диапазона (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Класс опасности лазерного излучения	Диапазон		
	I	II	III
	$180 < \lambda \leq 380$	$380 < \lambda \leq 1400$	$1400 < \lambda \leq 10^5$
1	+	+	+
2	+	+	+
3	–	+	–
4	+	+	+

Согласно ГОСТ Р 50723–94, соответствующему международному стандарту МЭК 825–1, лазерные изделия в зависимости от генерируемого излучения делятся на те же четыре класса опасности (табл. 3.5) с несколько другими формулировками, но по сути не противоречащими ранее приведённым (правда, методики классификации в нормативных документах также различны, что может приводить к неоднозначности результата). Для каждого класса лазерного изделия установлены максимально допустимые уровни излучения – *допустимые пределы излучения* (ДПИ).

Таблица 3.5

Класс	Характеристика лазерных изделий (ЛИ)
1	ЛИ, безопасные в предполагаемых условиях эксплуатации
2	ЛИ, генерирующие видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм. Защита глаз обеспечивается естественными реакциями защиты глаз от воздействия непрерывного излучения включая рефлекс мигания. Мощность лазеров класса 2 ограничена 1 мВт (длительность излучения $\geq 0.25$ с)
3А	ЛИ, безопасные для наблюдения незащищённым глазом. Для ЛИ, генерирующих излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, защита обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания. Для других длин волн опасность для незащищённого глаза не больше, чем для класса 1. Мощность видимого излучения непрерывных лазеров подкласса 3А не должна превышать 5 мВт (т. е. пятикратного значения ДПИ для класса 2), а облучённость — $25 \text{ Вт/м}^2$ . Непосредственное наблюдение пучка, испускаемого ЛИ класса 3А с помощью оптических инструментов (например, бинокль, телескоп, микроскоп), может быть опасным
3В	Непосредственно наблюдение таких ЛИ всегда опасно. Видимое рассеянное излучение безопасно при соблюдении определённых условий: минимальное расстояние для наблюдения между глазом и экраном 13 см, максимальное время наблюдения 10 с. Непрерывная мощность таких лазеров не может превышать 0.5 Вт, а энергетическая экспозиция — $100 \text{ кДж/м}^2$
4	ЛИ, создающие опасное не только прямое, но и рассеянное излучения. Они могут вызвать поражение кожи, а также создать опасность пожара. При их использовании следует соблюдать особую осторожность

Характерные лимиты экспозиции для нескольких стандартных типов лазеров, принятые Международной комиссией по защите от неионизирующего излучения (ICNIRP) в 1995 году, представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Лазер	Основная длина (длины) волны	Лимит экспозиции
Фторид аргона	193 нм	$3.0 \text{ мДж/см}^2$ свыше 8 ч
Хлорид ксенона	308 нм	$40 \text{ мДж/см}^2$ свыше 8 ч
Ионы аргона	488, 514.5 нм	$3.2 \text{ мВт/см}^2$ для 0.1 с
Пары меди	510, 578 нм	$2.5 \text{ мВт/см}^2$ для 0.25 с
Гелиево-неоновый	632.8 нм	$1.8 \text{ мВт/см}^2$ для 10 с
Пары золота	628 нм	$1.0 \text{ мВт/см}^2$ для 10 с
Ионы криптона	568, 647 нм	$1.0 \text{ мВт/см}^2$ для 10 с
Неодимий - YAG	1.064 нм 1.334 нм	$5.0 \text{ мкДж/см}^2$ для 1 нс до 50 мкс Нет для $\tau < 1$ нс, $5 \text{ мДж/см}^2$ для 10 с
Диоксид углерода	10...6 мм	$100 \text{ мВт/см}^2$ для 10 с
Оксид углерода	Примерно 5 мм	До 8 час, ограниченная зона $10 \text{ мВт/см}^2$ при $\tau > 10$ с для большой части тела



Фактически, все лазерные лучи превышают допустимые лимиты экспозиции, поэтому в реальной практике при определении мер безопасности они обычно не используются. Вместо этого применяется схема классификации лазеров, которая основана на лимитах, применяемых на практике.

Стандарты лазерной безопасности большинства стран уже приведены в соответствие со стандартами Международной комиссии по электротехнике (IEC). Стандарт IEC 825-1 (1993) применяется к производителям. Классификация лазерной опасности, приведённая ранее, должна быть указана на ярлыке коммерческих (промышленных) лазерных устройств. Ярлык с предупреждением, соответствующим классу лазера, должен присутствовать на всех устройствах классов 2...4.

В соответствии с ГОСТ Р 50723–94, СН 5804-91 регламентируют ПДУ для каждого режима работы лазера и его спектрального диапазона. Для примера в табл. 3.7 приведены ПДУ однократного воздействия на глаза и кожу коллимированного (с квазипараллельными лучами) или рассеянного лазерного излучения для лазерных изделий класса 3А.

Таблица 3.7

Длина волны $\lambda$ , нм	Длительность воздействия $\tau$ , с	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}}$ , Дж·м <sup>-2</sup> ;	$E_{\text{епду}}$ , Вт·м <sup>-2</sup>
$180 < \lambda \leq 302.5$	$\tau < 10^{-9}$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} = 2.5 \cdot 10^7 \sqrt[3]{\tau^2}$	$E_{\text{епду}} = 3 \cdot 10^{10}$
$302.5 < \lambda \leq 315$	$10^{-9} \leq \tau \leq 10^{-15} \cdot 10^{0.8(\lambda-295)}$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} = 5.6 \cdot 10^3 \sqrt[4]{\tau}$	—
$302.5 < \lambda \leq 315$	$10^{-15} \cdot 10^{0.8(\lambda-295)} < \tau \leq 3 \cdot 10^4$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} = 10^{0.2(\lambda-295)}$	—
$315 < \lambda \leq 380$	$10^{-9} < \tau \leq 10$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} = 5.6 \cdot 10^3 \sqrt[4]{\tau}$	$E_{\text{епду}} = 0.8 \cdot 10^{0.2(\lambda-295)/\tau}$
$315 < \lambda \leq 380$	$10 < \tau \leq 10^3$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} = 10^4$	—
$315 < \lambda \leq 380$	$10^4 < \tau \leq 3 \cdot 10^4$	—	$E_{\text{епду}} = 10$

Примечание. Во всех случаях  $W_{\text{пду}} = \mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лпду}} \cdot 10^{-6}$ ,  $P_{\text{пду}} = E_{\text{епду}} \cdot 10^{-6}$ .

ПДУ лазерного излучения устанавливают для двух условий – однократного и хронического облучений (“систематически повторяющееся воздействие, которому подвергаются люди, профессионально связанные с лазерным излучением”). ПДУ при этом определяют в качестве:

- уровней лазерного излучения, при которых “существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме”;

- уровней излучения, которые “при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводят к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья”.

ПДУ хронического воздействия рассчитывают уменьшением в 5-10 раз ПДУ однократного воздействия.

### **3.3. Контрольные вопросы и задачи**

На чём основаны принципы нормирования ЭМП?

Для каких частот нормируется напряжённость электрического поля?

Какова допустимая ППЭ при работе с источником ЭМП частотой 800 МГц в производственных условиях, если время работы в день составляет 2 ч?

Измеренное значение ППЭ у СВЧ-печи на месте работы домохозяйки составило  $0.2 \text{ Вт/м}^2$ . Какое время она может работать у этой печи, если частота ЭМП составляет 2.45 ГГц?

### **3.4. Выводы**

Нормирование неионизирующих излучений до 300 ГГц в России несколько отличается от нормирования, рекомендованного Международной комиссией по защите от неионизирующих излучений ICNIRP. В некоторых случаях оно более жёсткое, а в некоторых – более мягкое. Отличаются и подходы в нормировании: к примеру в России не используются показатель удельной поглощённой электромагнитной мощности или плотность наведённого тока, которые очень трудно определить или измерить. В отличие от международных норм в российской нормативной базе встречаются “окна”, в которых нельзя найти ПДУ по тем или иным составляющим ЭМП.

## **4. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

### **4.1. Классификация источников электромагнитных полей**

Все источники ЭМП, в зоне действия которых может оказаться человек, можно разделить на источники:

- естественного происхождения;
- искусственного происхождения.

К *естественным* источникам электромагнитных полей относятся Солнце, источники галактических электромагнитных излучений и сама Земля. Солнце является основным естественным источником электромагнитных

полей светового, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Оно так же, как и галактические объекты, является источником ионизирующих излучений. Земля обладает собственным электромагнитным полем определённой структуры. Можно сказать, что Земля является источником медленно меняющегося электромагнитного поля. Частотный спектр колебаний ЭМП Земли лежит в диапазоне приблизительно от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  Гц.

К искусственным (техногенным) источникам ЭМП можно отнести любые устройства (или их части), изготовленные человеком, в которых в том или ином виде используется электрическая энергия.

Источниками ЭМП искусственного происхождения являются:

- электрические системы передач электроэнергии;
- электрическое оборудование, применяемое в различных промышленных технологиях;
- электротермическое и электротехнологическое оборудование;
- радио- и телевизионные системы (включая радиолокационные станции), системы переносной и стационарной радиосвязи, сотовые телефоны и т. д.;
- персональные ЭВМ;
- лазеры;
- микроволновые печи и др.

По частотам, или частотному диапазону их можно условно разделить на источники:

- постоянного электрического или магнитного поля;
- электрического и магнитного полей:
  - промышленной частоты (50 или 60 Гц),
  - средней частоты (от 200 до 10 000 Гц),
  - высокой частоты (от 10 кГц до нескольких мегагерц и от нескольких мегагерц до 300 ГГц);
- оптического диапазона частот (инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения);
- рентгеновского излучения;
- гамма-излучения.

По характеру излучаемого ЭМП источники можно подразделить на источники:

- *преднамеренного* излучения ЭМП в окружающее пространство для передачи информации или связи с другими системами (радио- и телевизионные станции, системы беспроводного доступа и др.);
- *непреднамеренного* излучения, в которых электромагнитное поле выделяется в окружающее пространство как вредный сопутствующий фактор.

Источниками преднамеренного электромагнитного излучения являются устройства, которые специально излучают электромагнитную энергию в окружающее пространство (в частности, радио и телевизионные антенны, радиолокационные станции, радиотелефоны, радары и т. д). Источниками непреднамеренного электромагнитного излучения являются любые устройства, содержащие электрические цепи, так как всякий электрический контур, в котором протекает электрический ток, создает электромагнитное поле.

По энергии излучения на биологические структуры источники ЭМП можно подразделить на источники, создающие ЭМП:

- сверхслабые, не приводящие к изменению структур атомов и молекул, т. е. не вызывающие их возбуждение, ионизацию и диссоциацию;
- слабые, вызывающие их возбуждение, ионизацию и диссоциацию;
- сильные, приводящие к нагреванию и частичному разрушению тканей;
- сверхсильные, приводящие к разрушению и испарению тканей.

По характеру или по месту использования можно выделить источники бытового, общепромышленного применения и наружные системы. *Бытовыми* источниками являются микроволновые печи и другое нагревательное оборудование, персональные ЭВМ, системы сотовой связи, электрооборудование домашнего пользования и др. *Общепромышленные* источники ЭМП разнообразны по своему назначению и технологиям, в котором они используются. К *наружным системам*, создающим внешние ЭМП, относятся: линии электропередач среднего и высокого напряжений, трансформаторные подстанции, системы питания электрического транспорта, радиолокационные станции и др.

По видам создаваемых ЭМП источники разделяются на источники преимущественного магнитного поля, источники преимущественного электрического поля и источники высокочастотного ЭМП, характеризующиеся плотностью потока энергии.

Наиболее сильные магнитные поля создаются на постоянном токе и на промышленной и повышенных частотах дросселями, сильноточными элементами электроустановок и линий передач для общего пользования и на-

земного транспорта (в пределах города до 1500...1800 А/м), промышленным электротехнологическим оборудованием – индукционными нагревательными и плавильными печами на частоте от 50 Гц до сотен килогерц (сотни тысяч ампер на метр) и т. д.

Электрические поля с большими значениями напряжённости наблюдаются вблизи высоковольтных трансформаторов и трансформаторных подстанций 50 Гц (до 8...10 кВ/м), линий электропередач (до 1 кВ/м под нависшими проводами 110...330 кВ), высоковольтных и высокочастотных (до 41 МГц) генераторов и технологических установок (тысячи вольт на метр).

Источниками ЭМП различных частотных диапазонов являются радио- и телевизионные станции, средства проводной и беспроводной телефонной связи, ЭВМ (по  $E$  до 50 В/м, в некоторых случаях до 1800 В/м (10...150 кГц) и по  $H$  до 5 А/м при частотах 10 кГц...350 МГц), линии электропередач, радиолокационные станции и радиорелейные линии связи, промышленное, научное и медицинское оборудование, электроприборы “домашнего” пользования (микроволновые печи, аудио- и видеоаппаратура) и другие устройства.

В промышленности источниками ЭМП являются электрические установки, работающие на переменном токе частотой от 10 до  $10^6$  Гц; приборы автоматики; электрические установки частотой 50 (60) Гц; устройства для сварки, очистки от электрошлака, для нагрева (печи, индукционные нагреватели) и перемешивания как постоянного тока и тока промышленной частоты, так и тока средней и высоких частот; установки высокочастотного нагрева (сушка древесины, склеивание и нагрев пластмасс, вулканизация резины, термическая обработки пищевых продуктов, стерилизация, пастеризация, вторичный разогрев пищевых продуктов и др.). ЭМП диапазона ультра-, сверх- и крайневысоких частот (микроволны) используются в радиолокации, радиоастрономии, радиоспектроскопии, геодезии, дефектоскопии, физиотерапии, в бытовых микроволновых печах и сотовых системах связи.

Радиочастотная электромагнитная энергия и микроволновое излучение используются в различных устройствах в промышленности, торговле, медицине и исследованиях, а также дома. В частотном диапазоне от 3 Гц до 300 ГГц имеются такие виды его применения, как радио- и телевидение, коммуникации (дальняя телефонная связь, сотовый телефон, радиосвязь), радары, диэлектрические нагреватели, индукционные нагреватели, коммутированные источники энергии и компьютерные мониторы.

Искусственные излучатели обладают высокой когерентностью (частотной и фазовой стабильностями или значительной концентрацией энергии в узких областях спектра) и поляризацией. К примеру, радиопередачи на длинных, средних и коротких волнах ведутся с помощью вертикально поляризованных волн, а телевидение и радиовещание на ультракоротких волнах с частотной модуляцией – с помощью горизонтально поляризованных волн.

ИК-Излучение (*термическое излучение*, или *лучистое тепло*) испускается любым нагретым объектом (горячими двигателями, расплавленным металлом и другими источниками, связанными с литейным производством, термически обработанными поверхностями, лампами накаливания, системами выработки лучистого тепла). Оно также возникает при работе разнообразного электрооборудования, например, электрических моторов, генераторов, трансформаторов и разного электронного оборудования.

Многие промышленные технологии требуют применения источников, испускающих видимое и инфракрасное излучения высоких уровней. Кроме ламп источниками видимого излучения и ИК-излучения являются пламя, газовые горелки, ацетиленовые горелки, расплавленный металл и накаливаемые добела металлические заготовки. Подобные источники встречаются в литейных и металлопрокатных цехах, а также на многих других производствах тяжелой промышленности.

Большинство источников света испускает также и некоторое ультрафиолетовое излучение. УФ присутствует с солнечном свете и в ультрафиолетовых источниках, применяемых в промышленности, науке и медицине. Обычно УФ невидим и может обнаруживаться только по свечению материалов, которые флуоресцируют при освещении их УФ.

УФ-С (очень коротковолновое ультрафиолетовое излучение) в солнечном свете поглощается атмосферой и не достигает поверхности Земли. Получение его возможно только от искусственных источников, таких, как бактерицидные лампы, испускающие большинство своей энергии на длине волны 254 нм, которая очень эффективна для уничтожения бактерий и вирусов на поверхности и в воздухе. Длинноволновый вид – УФ-А можно найти в большинстве источников света.

## **4.2. Характеристика естественных источников ЭМП**

В среднем, поверхностный заряд Земли отрицателен, хотя верхние слои атмосферы несут в себе положительный заряд. Результирующее статическое

электрическое поле около поверхности Земли имеет напряжённость приблизительно 130 В/м. Это поле уменьшается по мере увеличения высоты, и его значение составляет приблизительно 100 В/м на высоте над уровнем моря 100 м, 45 В/м – на высоте 1 км и менее 1 В/м – на высоте 20 км.

Измерения магнитной и электрической составляющих поля в атмосфере показали, что электрическое поле Земли (атмосферное) всюду и всегда, за исключением временно существующих областей возмущения (области дождя, гроз и т. п.) направлено нормально к земной поверхности (Земля имеет отрицательный потенциал). Напряжённость этого поля меняется в пределах 0...1000 В/м в зависимости от места и от времени, так как структура электрического поля искажается рельефом местности и зависит от указанных выше периодических вариаций ЭМП Земли. Под грозовыми облаками и по мере их приближения происходят большие изменения поля на уровне Земли, поскольку нижняя часть облака обычно заряжена отрицательно, в то время как верхняя его часть содержит положительный заряд. Кроме того, между облаком и Землей существует свободное пространство. По мере приближения облака поле на уровне Земли может сначала увеличиваться, а затем уменьшаться. При этом Земля становится заряженной положительно. Во время данного процесса можно наблюдать поля от 100 В/м до 3 кВ/м. Полное изменение полей происходит очень быстро, в течение одной минуты, и большая напряжённость поля может сохраняться на протяжении всей грозы. Обычные облака, так же, как и грозовые, содержат электрические заряды и поэтому сильно влияют на электрическое поле на уровне Земли. Большие (до 200 %) отклонения от значения поля при ясной погоде могут появляться в случае тумана, дождя и естественно возникающих крупных и мелких ионов. Изменения электрического поля во время дневного цикла могут ожидать даже при абсолютно ясной погоде. За эти суточные вариации, возможно, несут ответственность довольно регулярные изменения локальной ионизации, температуры или влажности, возникающие вследствие этого изменения в электрической проводимости атмосферы около Земли, а также механический перенос заряда локальным движением воздуха.

Источники ЭМП, создаваемые в атмосфере Земли, называют “атмосферами”. Наиболее сильные электрические поля возникают под грозовыми облаками, где напряжённость электрического поля может достигать нескольких киловольт на метр.

Естественное магнитное поле является суммой внутреннего поля, связанного с действием Земли как постоянного магнита, и внешнего поля, генерируемого в окружающей среде такими факторами, как солнечная активность или атмосферные помехи. Внутреннее магнитное поле Земли возникает из-за электрического тока, протекающего по верхнему слою земного ядра. Существуют значительные локальные различия в напряжённости этого поля, среднее значение которой изменяется от  $\sim 28$  А/м на экваторе (что соответствует плотности магнитного потока около 35 мТл в немагнитном материале типа воздуха) до  $\sim 56$  А/м на геомагнитных полюсах (70 мТл в воздухе).

Магнитное поле Земли также подвержено периодическим колебаниям с периодами от нескольких часов до нескольких месяцев. Существуют и возмущения магнитного поля Земли (геомагнитные возмущения) – это магнитные бури, при которых напряжённость магнитного поля увеличивается в несколько раз в течение нескольких дней, а также локальные возмущения магнитного поля с меньшей амплитудой и продолжительностью до нескольких часов. Магнитные бури обусловлены солнечной активностью, а локальные возмущения в основном зависят от метеоусловий. При возникновении молнии, например напряжённость магнитного поля вблизи канала разряда, может достигать  $\sim 10^5$  А/м.

На магнитное поле Земли сильно влияет Солнце. Излучаемые им высокочастотные электромагнитные поля относятся к слабым и носят фоновый или шумовой характер. При появлении вспышек на Солнце возникают шумовые бури, во время которых мощность излучения возрастает в сотни и тысячи раз и картина магнитного поля становится ещё более сложной. Проявление изменения ЭМП Земли можно наблюдать в северных широтах за счёт возникновения одного из чудесных эффектов природы – северного сияния. Солнечный спектр оптических излучений распространяется от озонового слоя стратосферы, заканчивающегося на длине волны примерно 290...295 нм в ультрафиолетовом диапазоне, до (по крайней мере) 5000 нм в ИК-диапазоне. В летние месяцы солнечная радиация может достичь уровня  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

Наибольшему профессиональному облучению ультрафиолетовым излучением подвергаются рабочие на открытом воздухе под действием солнечного света.



## 4.3. Характеристика искусственных источников ЭМП

### 4.3.1. Источники статических электрических и магнитных полей

Искусственными источниками постоянного магнитного и электрического (электростатического) полей являются устройства (или технологические процессы), в результате работы которых происходит накопление электростатических зарядов, или искусственно созданные материалы с ярко выраженными ферромагнитными свойствами (магниты). Электростатические поля возникают вблизи экранов мониторов и других заряженных поверхностей в результате работы оборудования или при проведении различных технологических процессов, связанных с накоплением и переносом электрических зарядов.

Источниками электростатического поля являются:

- высоковольтное оборудование (например, телевизоры и мониторы);
- поверхности машин, оборудования и т. д., накапливающие потенциал за счёт трения;
- линии передачи постоянного тока;
- оборудование, используемое в таких отраслях промышленности, как химическая, текстильная, авиационная, бумажная, резиновая и транспортная.

Уровни созданных человеком в офисах и домах напряжённостей электростатических полей колеблются в диапазоне от 1 до 20 кВ/м.

Искусственные статические магнитные поля на много порядков сильнее полей естественного происхождения. Для воздушной линии постоянного тока напряжением 500 кВ плотность магнитного потока на уровне земли составляет примерно 20 мТл. Для подземной линии передач, проходящей на глубине 1.4 м и несущей максимальный ток силой 1 кА, максимальная плотность магнитного потока на уровне земли составляет менее 10 мТл.

Основные технологии, в которых используются сильные статические магнитные поля: реакторы термоядерного синтеза и сверхпроводящие системы хранения магнитной энергии (краевые поля до 50 мТл в зонах, доступных персоналу), сверхпроводящие спектрометры (около 1 Тл в местах, доступных для операторов), блоки разделения изотопов (кратковременно до 50 мТл, обычно – менее 1 мТл), производство алюминия (до 100 мТл), электролитические процессы (10...50 мТл), производство магнитов (у рабочего 2...5 мТл на руках, 300...500 мТл на уровне грудной клетки и головы), получение изо-

бражения методом ядерного магнитного резонанса и спектроскопия (неэкранированный 1-Т магнит создаёт 0.5 мТл на расстоянии 10 м, а неэкранированный 2-Т магнит создаёт такую же экспозицию на расстоянии 13 м).

Одним из примеров источника статического магнитного поля в отечественной промышленности являлась дуговая сталеплавильная печь постоянного тока, которая была объектом исследования по параметрам индукции  $B$  внешнего магнитного поля и механических сил  $F$ , вызывающих отклонение дуги от вертикального положения (изображение расчётной схемы приведено на рис. 4.1).

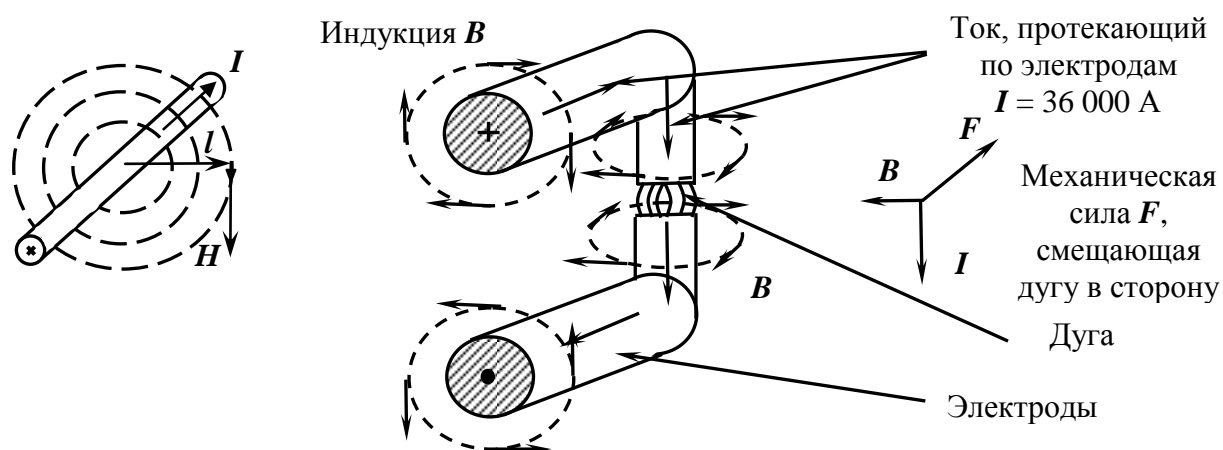


Рис. 4.1. Магнитное поле от системы проводников с током в дуговой печи

Другим примером промышленного технологического процесса, в котором используется постоянный электрический ток, создающий статическое магнитное поле, является процесс электролиза цветных металлов (совокупность процессов электрохимического окисления – восстановления на электродах, погружённых в электролит, при прохождении по нему электрического тока). Процесс заключается в том, что через специальные ванны с раствором или расплавом пропускается постоянный электрический ток большой силы (до 50...150 кА), при этом на положительном электроде – аноде происходит реакция окисления, а на отрицательном электроде – катоде – реакция восстановления. Условная схема расчёта напряжённости магнитного поля от двух линий с током для одного из возможных мест нахождения человека – между этими линиями приведена на рис. 4.2.

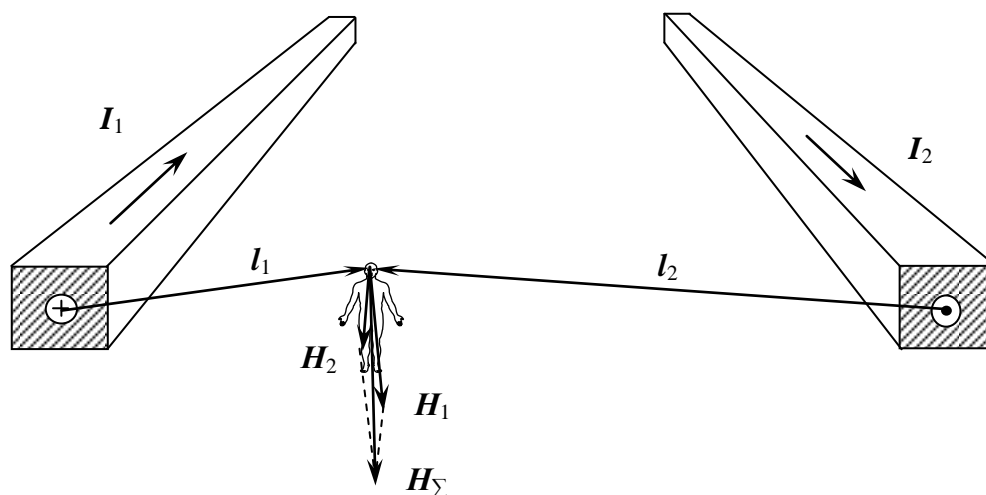


Рис. 4.2. Магнитное поле от системы двух проводников с током

Абсолютное значение напряжённости магнитного поля от одиночного токопроводящей линии с силой тока  $I$  на расстоянии от его оси  $l$  равно

$$H = \frac{I}{2\pi l}.$$

Направление вектора  $H$  определяется мнемоническим *правилом буравчика*, т. е., при ввинчивании буравчика по направлению тока направление вращения его рукоятки в правую сторону будет совпадать с направлением магнитного поля.

Общее значение напряжённости магнитного поля от двух электродов с током равно сумме двух составляющих

$$H = H_1 + H_2.$$

Таким образом, в зоне, находящейся между двумя параллельными электродами точно на оси, электромагнитные поля будут арифметически складываться, а за пределами этой зоны, но тоже на оси – вычитаться. Для нескольких линий с токами принцип расчёта сохраняется, однако геометрически должны складываться все напряжённости магнитного поля.

#### 4.3.2. Источники переменных электрических и магнитных полей низкой и промышленной частот

**Системы передачи электроэнергии.** Бóльшая часть пространства находится в зоне действия линий передач и распределения электрической энергии. В это пространство попадают производственные, жилые и общественные здания, загородные зоны (огородные, дачные и другие участки),

автомобильные и железные дороги, территории населённых пунктов и городов (появилось даже понятие “электромагнитный смог”, характеризующее неблагоприятную электромагнитную обстановку в зонах жизни и деятельности человека).

Передача электроэнергии с помощью воздушных линий электропередач осуществляется по трёхфазным или однофазным схемам. Кабельные линии прокладываются в земле, кабельных каналах в полу, по стенам зданий или в стенах помещений.

Главными искусственными источниками электрических и магнитных полей частотой 50/60 Гц являются источники, участвующие в выработке и распределении электроэнергии, а также любое оборудование, использующее электрический ток. Во многих странах большинство этого оборудования работает на промышленной частоте 50 Гц, а в Северной Америке – на частоте 60 Гц. Некоторые системы электропоездов работают на частоте 16.67 Гц.

Индукция магнитного поля от проходящих сверху линий передач обычно относительно низка по сравнению с промышленными устройствами, в которых используются токи высокого напряжения. Работники электропредприятия, работающие на подстанции или обслуживающие действующие линии передач, образуют особую группу, подвергающуюся воздействию более мощных полей (5 мТл и, в некоторых случаях, выше).

В отсутствие ферромагнитных материалов линии магнитных полей равной напряжённости образуют вокруг проводника окружности. Если не принимать во внимание геометрию проводника, максимальная плотность индукции определяется только силой тока. Магнитное поле под высоковольтной линией передач направлено в основном поперёк осей линии. Максимальная индукция на уровне земли может быть под центральной линией или под наружными проводниками в зависимости от фазовых отношений между проводниками. Максимальная индукция магнитного поля на уровне земли для стандартного двойного контура 500 кВ системы воздушных высоковольтных линий передач составляет примерно 35 мТл на килоампер передаваемого тока. Стандартные значения индукции до 0.05 мТл наблюдаются на рабочих местах вблизи воздушных линий передач, на подстанциях и электростанциях, работающих на частотах 16.66; 50 или 60 Гц.

В ряде случаев несмотря на достаточную сложность точных расчётов параметров магнитных полей от технических систем для приближённой

оценки можно использовать простые выражения. Так для трёхфазных линий электропередач суммарное значение напряжённости магнитного поля в рассматриваемой точке можно определить сложением соответствующих векторов с учётом сдвига фаз  $120^\circ$  в каждом проводе. В трёхжильном кабеле, где токи одинаковы, на расстоянии, значительно большем размеров проводников, суммарное значение магнитного поля практически равно нулю.

На рис. 4.3 показаны кривые распределения индукции магнитного поля от расстояния до центра прокладки трёхфазной линии электропередачи на высоте расположения головы человека (от земли 1.5 м) от протекающего тока силой 1000 А частотой 50 Гц для воздушной линии с высотой подвеса проводов 6 м и от кабелей, проложенных в земле на глубине 1 м.

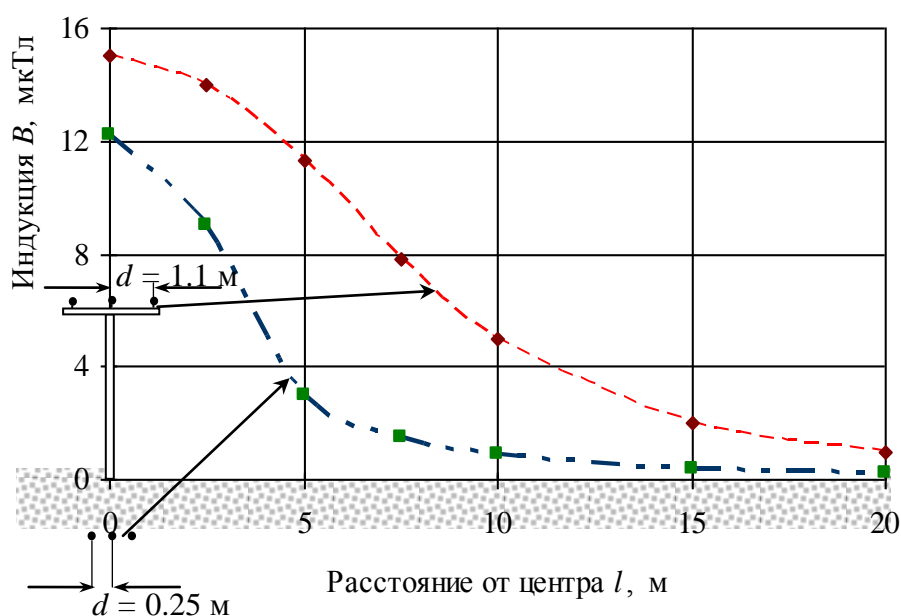


Рис. 4.3. Распределение индукции магнитного поля на высоте 1 м от поверхности земли от расстояния до опоры линии электропередачи (подземного кабеля)

Для системы из трёх проводников, расположенных в линию (в одной плоскости), по которым протекают токи, сдвинутые на  $120^\circ$ , напряжённость прямо пропорциональна расстоянию между проводниками  $d$ , току  $I$  и обратно пропорциональна расстоянию до точки наблюдения  $l$ . На достаточном удалении от системы она может быть определена по следующей формуле:

$$H = \frac{\sqrt{3}d}{\pi l^2} I.$$

Многие проблемы с ЭМС для человека и техники создают токи, протекающие по одиночному проводнику, или токи дисбаланса в многожильных силовых кабелях системы электропитания (рис. 4.4). При этом может наблюдаться низкочастотное дрожание изображения мониторов, зависание ПЭВМ или периферийных устройств, искажение информации в ОЗУ и на магнитном диске, самопроизвольное перемещение курсора, сбой в работе устройств от наведённых токов и др. Сложная электромагнитная обстановка обычно вызвана близким расположением коротких участков силовых цепей (проводов высокого напряжения, силовых кабелей и т. д.), а также систем со значительными потоками рассеяния, заземляющих проводов систем безопасности, токопроводов и линий передачи высокого и низкого напряжений. Примерами указанной электромагнитной обстановки могут служить зоны промышленных предприятий и электростанций, залы управления высоковольтных электрических подстанций, предприятий тяжёлой промышленности.

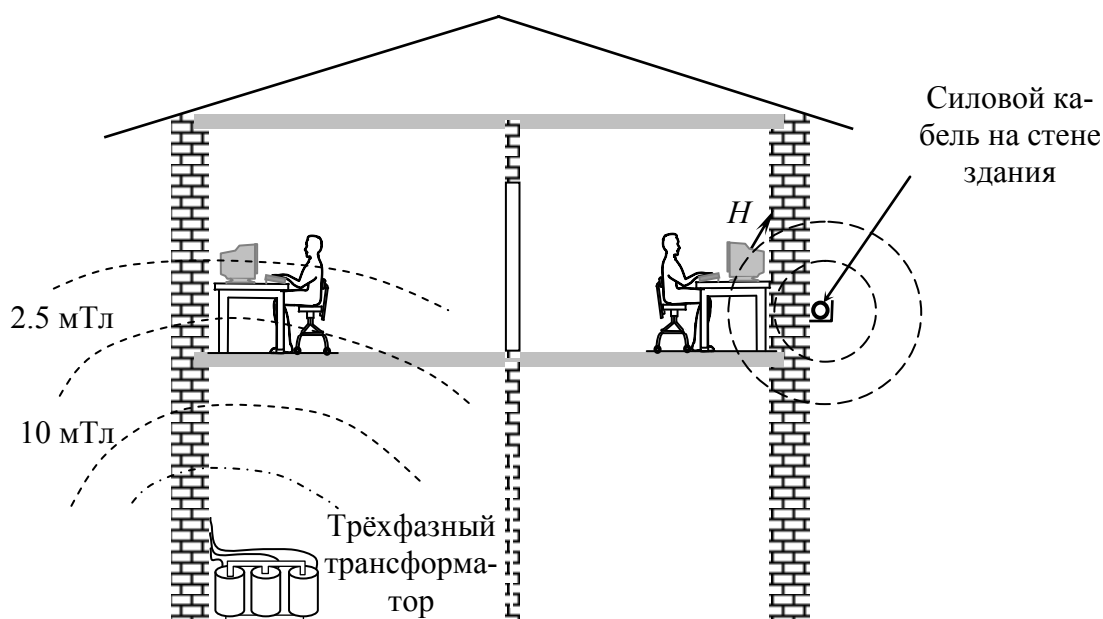


Рис. 4.4. Проблемы влияния магнитного поля на работу ЭВМ

Расчёт напряжённости магнитного поля от одиночного тока  $I$  на расстоянии  $l$  проводится так же, как и для постоянного тока  $H = I/(2\pi l)$ . К примеру, ток  $I = 5$  А на расстоянии 1 м создаёт  $H = 0.8$  А/м или индукцию 1 мкТл, которая в большинстве случаев вызывает дрожание изображения мониторов на базе электронно-лучевой трубки.

Имеются примеры, когда уравнивающие токи достигают десятков ампер, а индукция магнитного поля на месте установки ПЭВМ превышает 2000 нТл, выходя за максимальные пределы приборов для измерения параметров магнитного поля при контроле электромагнитной обстановки на рабочих местах пользователей персональных компьютеров. Те же самые проблемы наблюдаются в помещениях, вблизи которых имеются трёхфазные силовые трансформаторы с системой кабелей, наводящие сильные магнитные поля как в самом помещении, так и на конкретных местах расположения офисной техники.

Высоковольтные линии передач и подстанции создают сильнейшие электрические поля, воздействию которых могут постоянно подвергаться работающие. Высота проводника, его геометрическая конфигурация, боковое удаление от линии и напряжение на линии передач являются наиболее важными факторами, которые необходимо учитывать при определении максимальной напряжённости электрического поля на уровне земли. При боковом расстоянии, приблизительно равном удвоенной высоте линии, напряжённость электрического поля по мере удаления уменьшается почти линейно. Внутри зданий, расположенных вблизи высоковольтных линий, напряжённость электрического поля обычно ниже, чем у невозмущенных полей (примерно в 100 000 раз), в зависимости от конфигурации здания и конструктивных материалов, из которых оно построено.

Примерные зависимости напряжённости собственного (неискажённого присутствием человека) электрического поля вблизи линий электропередач высокого напряжения приведены на рис. 4.5. Они показывают сложную зависимость от расстояния в зоне 20...70 м. По мере удаления от этой зоны  $E$  плавно уменьшается. Расчёт напряжённости электрического поля в таких системах достаточно сложен. В большинстве случаев для прогнозирования электромагнитной обстановки и определения санитарно-защитных зон ограничиваются замерами электроизмерительными приборами. Как видно из рис. 4.5, значение  $E > 5$  кВ/м зафиксировано на расстояниях менее 20 м для напряжения 380 кВ и менее 65 м при напряжении 1300 кВ. Зона с напряжённостью электрического поля, меньшей 1 кВ/м, может находиться на расстоянии, большем 35...100 м в зависимости от напряжения линии электропередачи.

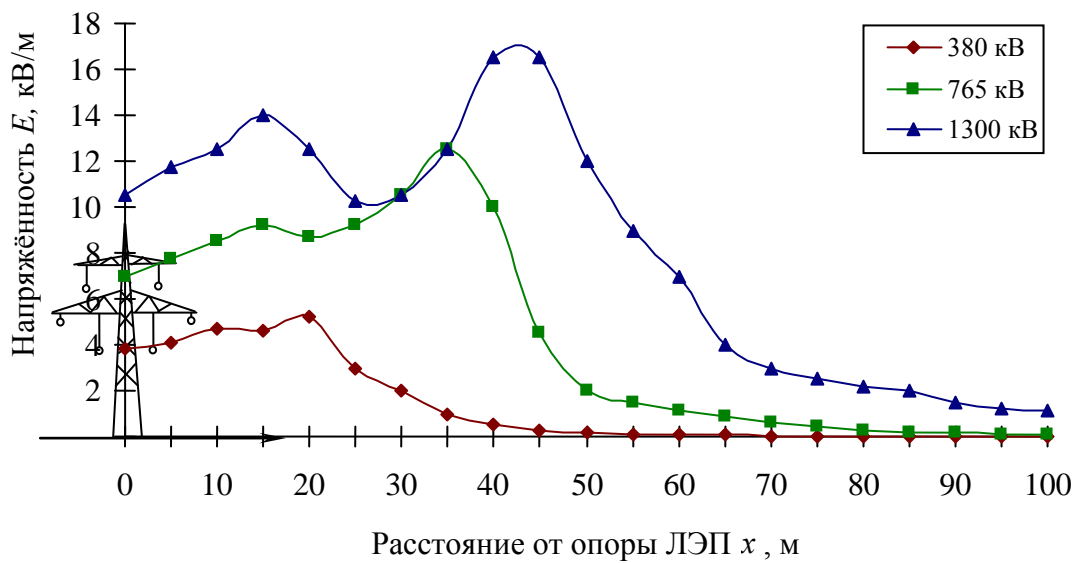


Рис. 4.5. Распределение напряжённости электрического поля на высоте 1.5 м от поверхности земли от расстояния до опоры линии электропередач различного напряжения

Необходимо отметить, что человек или любое другое тело (к примеру электрический экран для защиты от электрического поля, соединённый с землёй) своим присутствием могут сильно изменять первоначально равномерную картину напряжённости электрического поля и потенциалов (рис. 4.6).

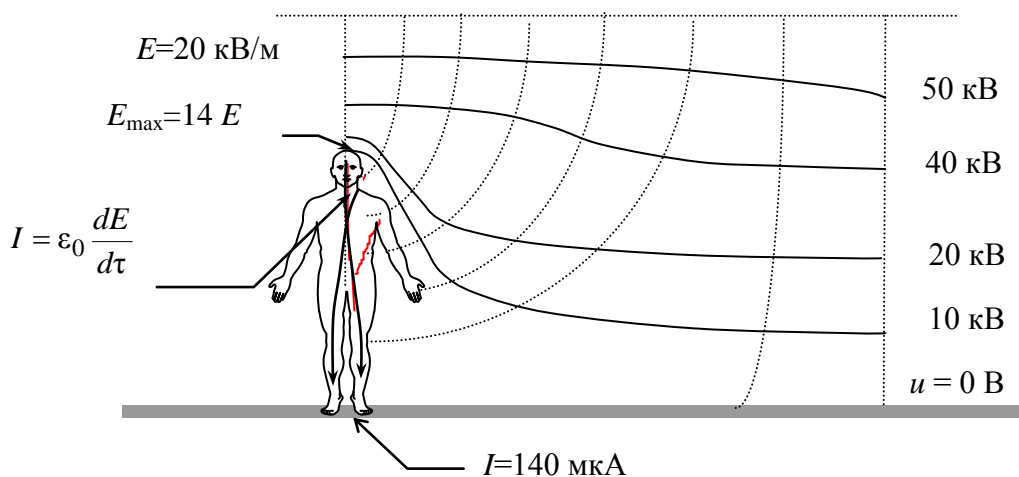


Рис. 4.6. Искривление напряжённости электрического поля при наличии человека и появление токов, протекающих по его телу в землю



Силловые линии электрического поля концентрируются в области головы, при этом максимальное значение  $E$  может достигать  $(10...14)E$  неискажённого поля. В результате из-за наличия разности потенциалов по человеку протекает чувствительный электрический ток, определяемый выражением

$$I = \varepsilon_0 \frac{dE}{d\tau}.$$

Таким образом, часто, особенно в сырую погоду, некоторые люди, находящиеся под высоковольтными линиями передач, ощущают лёгкое покалывание от электрического тока (ощутимый ток на частоте 50 Гц составляет 0.5...1.5 мА).

**Электротехнологическое оборудование.** Электротехнологическое оборудование на производстве характеризуется, как правило, большой силой тока и может быть источником сильных магнитных полей. В табл. 4.1 приведены некоторые данные по индукции магнитного поля, зафиксированной на определённых расстояниях до ряда электротехнологических систем.

Таблица 4.1

Источник	Индукция $B$ , мТл	Расстояние $l$ , м
Сварочная дуга (0...50 Гц)	0.1...5.8	0...0.8
Индукционные нагреватели (50 Гц ...10 кГц)	0.9...65	0.1...1
Ковшовая печь на 50 Гц	0.2...8	0.5...1
Дуговая печь на 50 Гц	До 1	2
Индукционный перемешиватель на 10 Гц	0.2...0.3	2
Электрошлаковая сварка на 50 Гц	0.5...1.7	0.2...0.9

Индукция магнитного поля на операторских постах многих электротехнологических установок в зависимости от используемой частоты и расстояния может составлять 0.7 мкТл...6 мТл, иногда до 10 мТл на расстоянии до 1 м – к примеру для ряда промышленного и сварочного оборудования (50 Гц, 15...106 кА) и ковшовых печей (50 Гц, 13...15 кА). Установки индукционного нагрева, работающие на промышленной частоте, могут создавать в местах работы операторов поле с индукцией до 2.5 мТл. К таким установкам относятся индукционные нагреватели слябов, цилиндрических заготовок большого диаметра из меди, латуни, алюминия и др. Источником сильных магнитных полей являются индукционные тигельные и каналные печи.

### 4.3.3. Источники ЭМП средней и высокой частот

**Индукционные нагревательные и плавильные установки.** Наиболее острые проблемы, связанные с воздействием ЭМП на человека, имеются у индукционных нагревательных систем средней и высокой частот. По данным, приведённым в энциклопедии Международной организации труда, индукция магнитного поля вокруг индукционных нагревателей, работающих на средних частотах, может составлять от 25 до 130 мкТл и более. Около высокочастотных индукционных печей и промышленных электролитических камер плотность магнитного потока достигает 50 мТл. Локальной экспозиции подвергаются преимущественно руки операторов (достаточно часто индукция в районе рук может достигать 25 мТл). Напряжённость электрического поля около индукционного нагревателя обычно мала.

Любое индукционное нагревательное оборудование состоит из катушки, создающей электромагнитное поле, источника питания (сетевого трансформатора при питании частотой сети 50 Гц, машинного генератора или тиристорного преобразователя на средних частотах, лампового или транзисторного генератора на высоких частотах) и контура с компенсирующими конденсаторами, подводящими шинами и в некоторых случаях – с согласующим трансформатором.

Назначение индукционной катушки – создать переменное магнитное поле в пространстве между этой катушкой и заготовкой, в результате чего возникает вихревой ток и заготовка нагревается. С внешней стороны и в торцевых зонах катушки на пути замыкания магнитного потока существует внешнее ЭМП, которое менее интенсивно из-за большей площади распространения. Оно не является полезным и является своеобразной электромагнитной помехой, с которой приходится бороться как с позиции электромагнитной совместимости, так и с позиции электромагнитной гигиены.

Электромагнитное окружение, в котором приходится работать персоналу, выполняющему технологические операции или наблюдающему за работой индукционного оборудования, представляет собой зону несформировавшейся электромагнитной волны (зону индукции), которая простирается от установки самое меньшее на расстояние 40 м.

Характер зон вредного влияния в основном определяется индукционной системой и используемым источником питания этой системы. Для относительно простых индукторов (кольцо, цилиндр, прямоугольная рамка), пи-

таемых однофазным напряжением, зоны вблизи них также являются простыми и, как правило, имеют вид шара или эллипсоида вращения. Для примера на рис. 4.7 приведены виды напряжённостей магнитных полей, создаваемых некоторыми исследованными индукционными системами, в которых зона вредного влияния находится от индуктора на расстоянии 0.5...1.5 м.

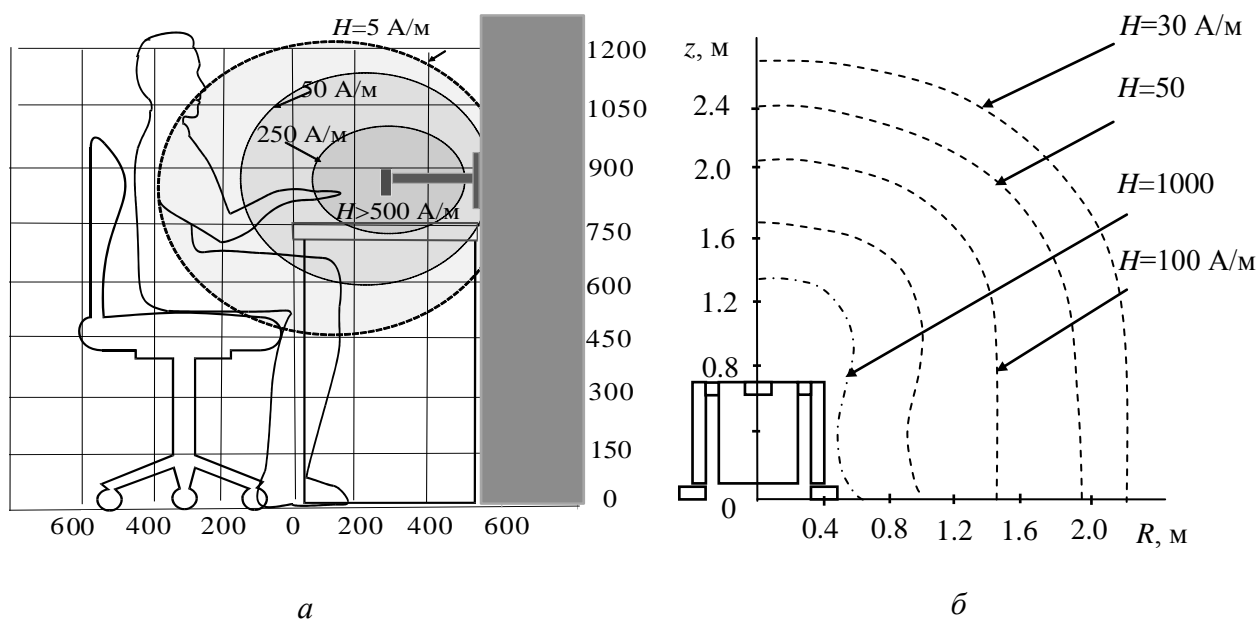


Рис. 4.7. Линии равной напряжённости магнитного поля:

$a$  – у индукционного нагревателя 66 кГц,  $b$  – у сталеплавильной печи 2.4 кГц

В случае, когда линии равной напряжённости внешнего магнитного поля имеют форму, близкую к шару, можно приблизительно оценить вредность воздействия ЭМП в любом месте нахождения человека, рассчитав  $H$  в точке с координатой  $z$  на оси соленоида, имеющего число витков  $n$ , длину  $L$ , радиус  $R_1$ , с помощью следующей приближённой формулы:

$$H = \frac{nI}{2L} \left\{ \frac{-z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(z - L/2)^2 + R_1^2}} + \frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(z + L/2)^2 + R_1^2}} \right\}.$$

Эта формула справедлива для незагруженного индуктора без внешнего магнитопровода. Исследования показали, что наличие загрузки внутри него не сильно влияет на внешнее магнитное поле при условии, что ток остаётся тем же самым.

При использовании для нагрева индукционных систем сложной формы или секционированных нагревателей, питаемых от различных источников, картина внешнего магнитного поля может значительно меняться. В этом случае можно получить, например вид зоны, напоминающей по форме гантель, или другую сложную и не поддающуюся описанию геометрическую фигуру. Большое значение на распределение ЭМП оказывает и сам источник питания, создающий электрическое поле достаточно большой напряжённости.

На рис. 4.8 показан один из “электромагнитных портретов” зоны вредного влияния ЭМП, создаваемой при работе промышленной высокочастотной установки ВЧГ1–60/0.066 для закалки стальных заготовок (частота тока составляет 66 кГц, мощность – 60 кВт). Подобные портреты желательно иметь для любого оборудования, являющегося источником паразитного ЭМП, хотя в практике проектирования это, как правило, не используется.

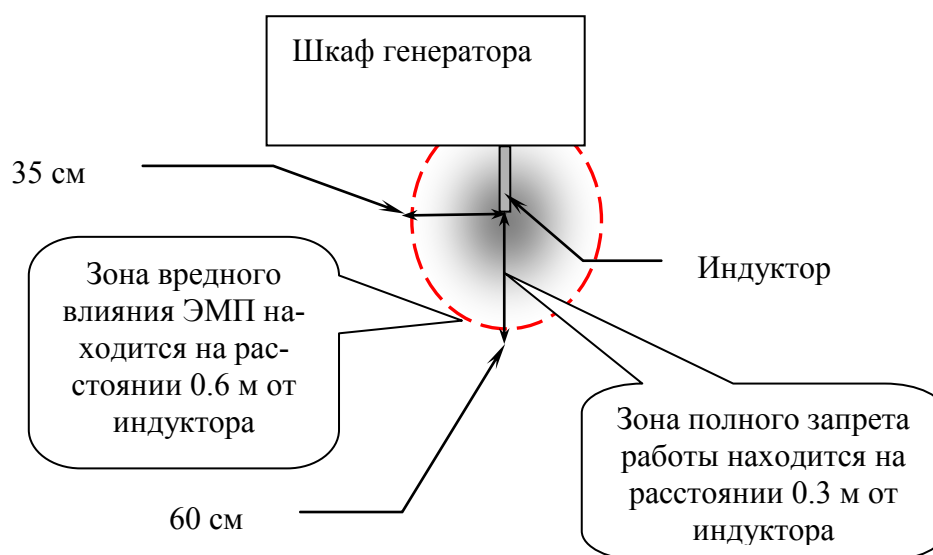


Рис. 4.8. Электромагнитный портрет зоны вредного влияния ЭМП

Для большинства ручных технологических операций, связанных с закалкой, напайкой на режущий инструмент новых резцов, наплавкой твёрдых сплавов на поверхность заготовок и т. д. рабочее место должно находиться за пределами 0.6 м от индукционной катушки, что обычно и бывает. Однако зона полного запрета находится на расстоянии ближе 0.3 м, и в этой зоне при проведении работы довольно продолжительное время могут находиться руки оператора, удерживающего заготовку, которые, как и она, нагреваются.

Исследования показали, что у большинства высокочастотных индукционных нагревателей расстояние, ближе которого обслуживающий персонал не должен находиться даже ограниченное время, составляет 0.5 м. Если же рабочий поправляет заготовку в индукторе, то напряжённость магнитного поля значительно превосходит тепловой порог. Это означает, что человек чувствует тепло не только за счёт контакта с нагретой заготовкой, но и за счёт энергии электромагнитного поля. Причиной тому является, с одной стороны близость к индуктору, где поле само по себе большое, с другой – концентрация магнитных силовых линий у ферромагнитной части заготовки, находящейся вне индуктора, которая не нагревается до точки Кюри.

**Установки диэлектрического нагрева.** Высокочастотная энергия от 3 до 50 МГц (в основном, на частотах 13.56, 27.12, 40.68 и 81.36 МГц) используется в промышленности для разнообразных процессов нагрева. Мощность диэлектрических установок составляет от 2.5 до 160 кВт. Спектр применения этой энергии включает в себя уплотнение и выдавливание пластика; сушку клея, древесины и порошкообразных материалов; обработку ткани и текстиля; деревообработку и производство таких разнообразных изделий, как тен-ты, плавательные бассейны, прокладки водяных матрацев, обувь, дорожные багажные бирки; разогрев эпоксидных смол и компаундов и многие другие процессы.

*Принцип диэлектрического нагрева* основан на том, что между двумя обкладками конденсатора, на которые подаётся достаточно высокое напряжение, помещаются материалы, обладающие непроводящими свойствами. Благодаря большому значению напряжённости электрического поля происходит их нагрев за счёт механизмов переменной поляризации.

Основной вклад во внешнее ЭМП вносит не напряжённость магнитного поля (токи в таких системах не являются определяющими), а напряжённость электрического поля за пределами рабочего конденсатора.

На рабочих местах высокочастотных диэлектрических установок для технологий сварки галантерейных изделий и игрушек значения напряжённости электрического поля могут достигать от 3 до 350 В/м, а при сварке больших линейных размеров или при открытых защитных экранах – до 1500 В/м. Как правило, наибольшая интенсивность электрического поля отмечается в средней и верхней частях туловища человека.

**Радиотехнические и телевизионные системы.** ЭМ-Волны диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ (микроволны) используются в радиолокации, радиоастрономии, радиоспектроскопии, геодезии, дефектоскопии, физиотерапии, в бытовых микроволновых печах и сотовых системах связи. Аппараты сверхвысокочастотного диапазона применяются в микроволновой терапии.

Измерения показывают, что во многих случаях рассеивание электрических и магнитных полей вблизи этих радиочастотных приборов высоко.

Облучение также может быть значительным вблизи корпусов передатчиков, у которых разбиты внутренние защёлки и открыты дверцы.

Системы подвижной или сотовой радиосвязи в настоящее время получили широкое распространение и по темпам развития значительно опережают другие виды телекоммуникаций. Важной отличительной особенностью данных беспроводных систем является возможность весьма эффективного использования выделяемого для их работы радиочастотного спектра. Благодаря этому можно обеспечить связью значительное число абонентов, что имеет большое значение для крупных городов и районов с высокой плотностью населения. В работе таких систем используется следующий принцип: территория города (района) делится на небольшие зоны (соты) с радиусом действия 0.5...2.0 км, в центре каждой зоны располагается базовая станция, обслуживающая в данной соте мобильные станции, например автомобильные и ручные радиотелефоны. Вид одной из таких станций с секторными антеннами типа ALXC-900/1800-65-15i/15i-6-D, используемыми для связи в пределах части города, показан на рис. 4.9.

Станции работают в интервале радиочастот от 400 до 1800 МГц, используя аналоговые или цифровые технологии. Максимальная мощность передатчиков базовых станций не превышает, как правило, 100 Вт, коэффициент усиления антенны может составлять, к примеру, 10...16 дБ. Мощность передатчиков автомобильных станций 8...20 Вт, мобильных радиотелефонов 0.125...1 Вт. Телефонные трубки являются небольшими маломощными радиопередатчиками, которые во время работы находятся в непосредственной близости от головы. Часть мощности, излучаемая антенной, поглощается головой. Согласно данным ICNIRP значения SAR могут быть нескольких ватт на килограмм.



Рис. 4.9. Вид антенн базовых станций на крыше жилого дома

Приёмно-передающие радиостанции для промышленного использования могут работать на частотах от 30 до 150 МГц с максимальной мощностью 5...15 Вт. Основными частотами ЭМП радиостанций, работающих в России, типа “Лен”, “Радан-2”, “Моторола Р-040”, “Транспорт 11Р-32Н-1”, локомотивных радиостанций “72 РТМ-А-ЧМ”, стационарных радиостанций “71РТС-2-ЧМ”, генераторов ВЧ и направленных антенн являются 200 кГц, 33.75 МГц, 50 МГц, 154...155 МГц и 300...400 МГц.

Воздействию электромагнитных излучений, создаваемых системами переносной радиосвязи, могут подвергаться лица профессиональных групп, работа которых связана с источниками ЭМП (персонал базовых станций, связисты, диспетчеры, работники ГИБДД, пожарной охраны, такси и др.), население, проживающее в непосредственной близости от базовых станций, пользователи радиотелефонов.

Режим облучения различных контингентов лиц имеет некоторые особенности: лица, профессионально связанные с источниками ЭМИ, подвергаются воздействию облучения в течение рабочего дня; население, проживающее в непосредственной близости от базовых станций, – до 24 часов в сутки; пользователи радиотелефонов – только во время телефонных разговоров. При этом облучение ЭМИ непрерывного режима генерации носит характер сравнительно кратковременных сеансов, разделённых продолжительными паузами (общее время, как правило, не более одного часа в день).

Цифровая радиосвязь характеризуется возможностью множественного доступа или мультимножественного доступа, что подразумевает одновременную передачу информации через одно устройство многими пользователями в общем канале. При этом разделение общего канала может производиться по частоте (FDMA – Frequency Division Multiple Access), времени (TDMA – Time Division Multiple Access) или форме сигнала – коду (CDMA – Code Division Multiple Access).

При *частотном разделении* спектр используемых частот разделяется на участки для разных пользователей. Этот метод может быть использован в аналоговой связи; на нём основаны все аналоговые стандарты сотовой связи: NMT, AMPS, TACS и др. Недостатки таких систем очевидны: плохая помехозащищённость и связанное с ней невысокое качество передачи речи, неэффективное использование частотного диапазона, слабая защищённость от прослушивания и т. д. Самым распространённым аналоговым стандартом в мире остается AMPS.

В случае мультимножественного доступа с *временным разделением* каналов многочисленные абоненты передают свои сообщения на одной и той же радиочастоте, но в разное время, что позволяет увеличить объём речевого трафика и получить ряд других преимуществ, характерных для цифровых систем связи. На этом методе основаны такие узкополосные цифровые стандарты сотовой связи, как GSM и его разновидность DCS, а также D-AMPS.

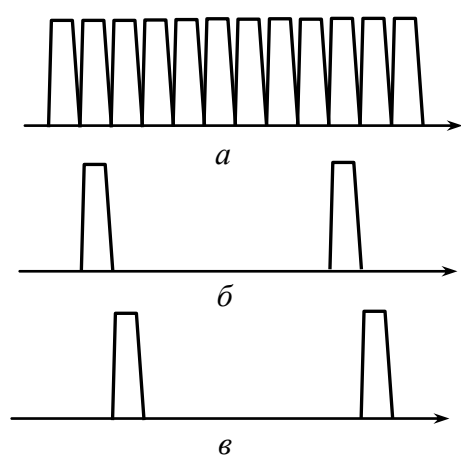


Рис. 4.10. Частотные диаграммы: *а* – базовой станции; *б* – сотового телефона № 1; *в* – сотового телефона № 2

Передачу информации по стандарту GSM осуществляют импульсами по восемь импульсов в блоке (рис. 4.10).

Каждый абонент использует только один из них – остальные принадлежат другим абонентам, которые в этот момент на данной частоте могут вести телефонные разговоры. Частота пульсации мобильного телефона составляет примерно 217 Гц. Если номинальная мощность сотового аппарата равна 2 Вт, то средняя мощность будет равна 0.25 Вт. Блоки импульсов между мобильным телефоном и базовой станцией группируются в мультиблоки, состоящие из 26 повторений.



Следовательно, второй частотой, генерируемой сотовым телефоном, является частота 8.35 Гц. Кроме этого, некоторые виды мобильных аппаратов, работающих в энергосберегающем режиме (DTX), способны генерировать частоту 2 Гц. Низкие частоты совпадают с частотами биоэлектрической активности головного мозга человека (альфа-, бета-, гамма- и дельта-ритмами), и ЭМП может нарушать его нормальную работу. Могут ухудшиться процессы запоминания информации и контроль движения.

Некоторые источники высокочастотного ЭМП являются ненаправленными (рис. 4.11, а), в которых ППМ (ППЭ) может быть рассчитана делением излучаемой мощности  $P$  на площадь шара:  $\text{ППМ} = P/(4\pi l^2)$ . Другие источники являются направленными (рис. 4.11, б).

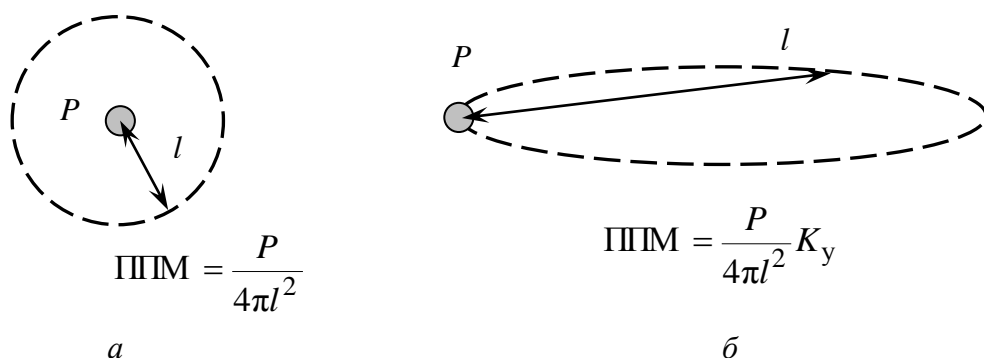


Рис. 4.11. Плотность потока мощности от источников ЭМП высокой частоты: *а* – ненаправленного; *б* – направленного

Для приближённого расчёта максимальной плотности потока мощности направленного источника, как правило, необходимо знать следующие параметры, выражаемые в децибелах: мощность  $P_{\text{и}}$ , дБм, и  $K_y$ , дБи, которые определяются выражениями

$$P_{\text{и}} = 10 \lg \frac{P}{P_{\text{эт}}}, \quad K_y = 10 \lg \frac{P_{\text{из}}}{P},$$

где  $P$  – мощность источника излучения;  $P_{\text{эт}} = 10^{-3}$  Вт;  $P_{\text{из}}$  – эквивалентная мощность направленного источника в рассматриваемом направлении, приведённая к мощности изотропного источника.

Для определения максимальной мощности, излучаемой направленным источником, необходимо сложить  $P_{\text{и}}$  и  $K_y$ , а полученное значение в децибелах перевести в ватты.

В общем случае при расчёте ППМ от радиопередающей антенны кроме коэффициента усиления используется и другой параметр – коэффициент ослабления  $F$ , учитывающий изменение поля в точке приёма за счёт сложения прямого и отражённого радиолучей:

$$\text{ППМ} = \frac{PK_y}{2\pi l^2} F^2.$$

Коэффициент  $F$  принимает значения от 0 до 2 и является периодической функцией до некоторого расстояния от источника, равного учетверённому произведению высот подвеса антенны и точки наблюдения, делённому на длину волны, а далее монотонно убывающей. Он зависит от коэффициента отражения радиоволн от земли, длины волны, высоты расположения от земли антенны и точки приёма, а также от других параметров.

Источниками мощного электромагнитного излучения являются радиорелейные системы прямой видимости, тропосферные радиорелейные системы и спутниковые системы радиовещания, системы телевидения и радиосвязи диапазона частот 700 МГц...30 ГГц, имеющие рупорно-параболические, двухзеркальные с эллиптическим переизлучателем, перископические, параболические или другие антенны. Один из примеров расположения главного луча радиолокационной станции наземного базирования приведён на рис. 4.12.

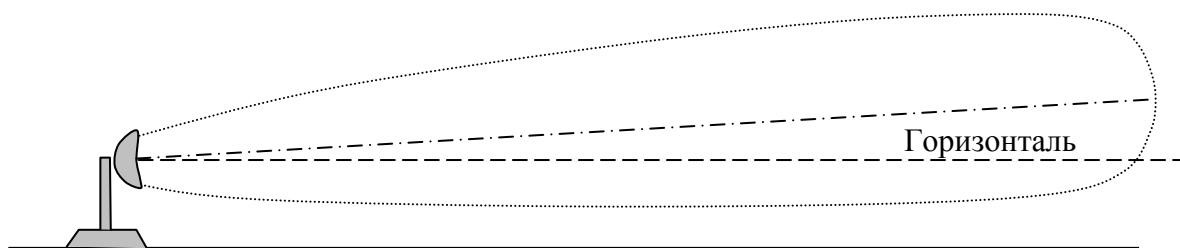


Рис. 4.12. Схема распространения луча ЭМП радиолокационной станции

Для расчёта ППМ таких систем, например для оценки границ санитарно-защитной зоны или расстояний, на которых может быть обеспечена ЭМС, требуются более сложные методики, приводимые в методических указаниях, к примеру МУК 4.3.043-96 “Определение плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц...30 ГГц”, или в других.

**Персональные ЭВМ.** Основным источником ЭМП радиочастотного диапазона мониторов на основе электронно-лучевой трубки (рис. 4.13) является трансформатор системы горизонтального отклонения луча, работающий на частоте 15...53 кГц и дающий пилообразную форму магнитного поля; блок модуляции луча – 10 МГц, система вертикального отклонения и модуляции луча ЭЛТ (пилообразная форма сигнала) частотой 50...100 Гц (рис. 4.14).

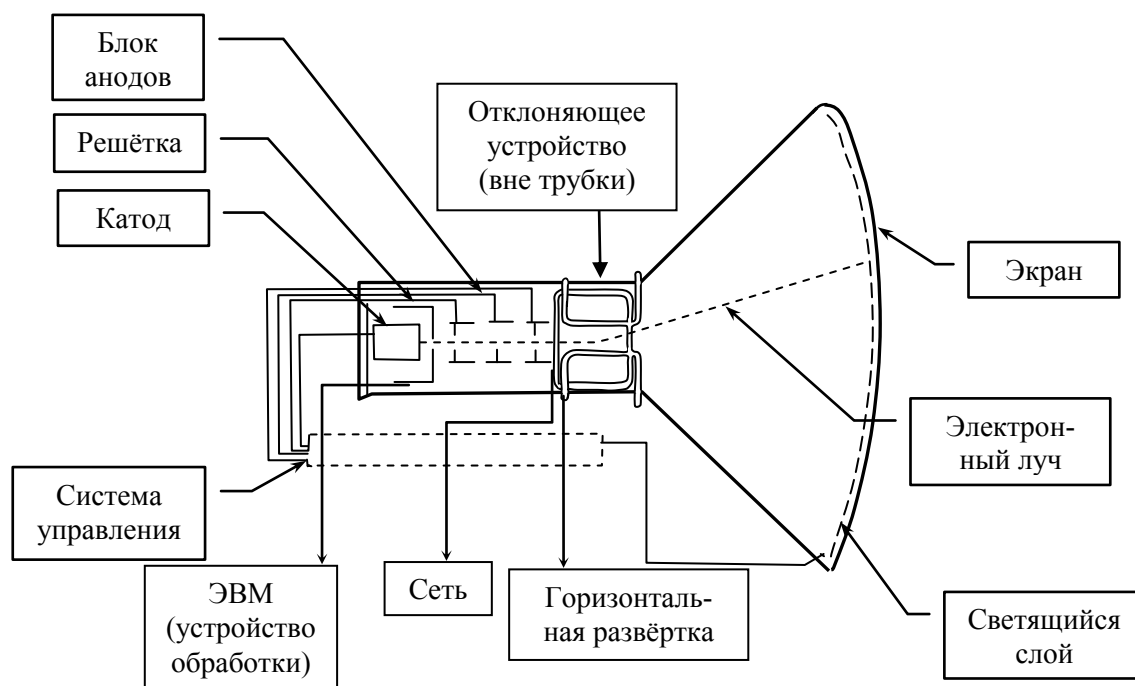


Рис. 4.13. Схема монитора на базе электронно-лучевой трубки

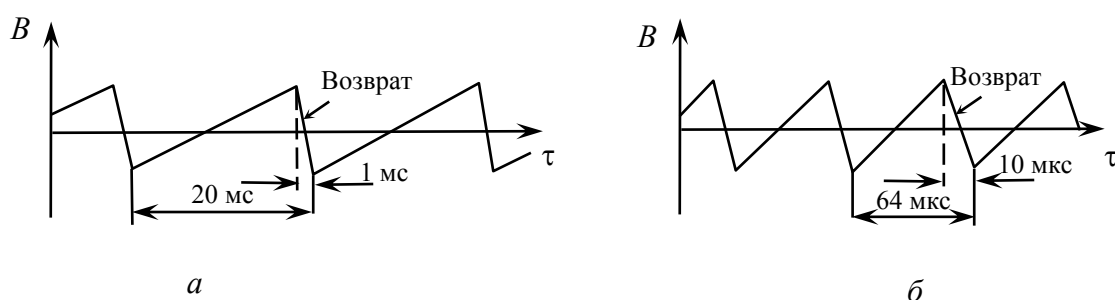


Рис. 4.14. Упрощенное схематическое изображение магнитного поля монитора  
*а* – вертикальная развертка, *б* – горизонтальная развертка

Обследование ряда мониторов показало, что значения напряженностей ЭП и МП составляют, соответственно, 12...150 В/м и 0.1...5 А/м на расстоянии 10 см экрана монитора или 1.6 В/м и 0.08...0.6 А/м на расстоянии 50 см,

где обычно находится пользователь ЭВМ. У задней и боковых стенок корпуса монитора ЭМП может быть несколько выше. Это объясняется тем, что источник высокого напряжения (строчный трансформатор) помещается в задней или в боковой части терминала, а стенки корпуса не экранируют излучения.

Среди пользователей ПЭВМ бытует мнение, что ПЭВМ с жидкокристаллическими мониторами обладают пренебрежимо малыми уровнями электромагнитных излучений по сравнению с использованием дисплеев на ЭЛТ.

Действительно, ПЭВМ с жидкокристаллическими экранами не создают вокруг себя электростатических полей. Но уровни излучаемых переменных электрических и переменных магнитных полей в радиочастотных диапазонах при этом могут даже превышать аналогичные излучения ПЭВМ с мониторами на ЭЛТ.

В ЖК-мониторах отсутствует магнитное поле управления электронным лучом, отсутствует рентгеновское излучение, и нет проблем с электростатическим зарядом на стеклянной поверхности экрана. Однако на пользователей компьютеров оказывают действие электрические и магнитные поля с частотами 5 Гц...400 кГц, которые имеют другие источники и другие характеристики, чем дисплеи на ЭЛТ.

Электрические и магнитные поля создаются такими узлами монитора, как блоки питания, трансформаторы, инверторы напряжения для подсветки экрана и т. д. В ЖК-мониторах эти источники помещены в слабоэкранированном объёме подставки дисплея или у задней стенки тонкого дисплея. Расстояние между источниками поля и пользователем таким образом оказывается меньше по сравнению с ЭЛТ при том же самом визуальном расстоянии.

В результате использования новых технологий для связи отдельных ЭВМ и периферийного оборудования стали применять системы, имеющие беспроводную точку доступа, с которой может связываться контроллер, к примеру Wi-Fi, работающий на частотах 2.4 или 5.1...5.8 ГГц со скоростью передачи 11...54 Мбит/с (рис. 4.15). Мощность излучения антенн составляет от 10 до 100 мВт. Максимальная мощность может достигать 400 мВт и более. Антенны являются направленными и при неблагоприятных условиях (например, при работе с переносным компьютером на коленях, в котором имеется такой адаптер для связи) могут представлять серьёзную опасность для пользователя ЭВМ.

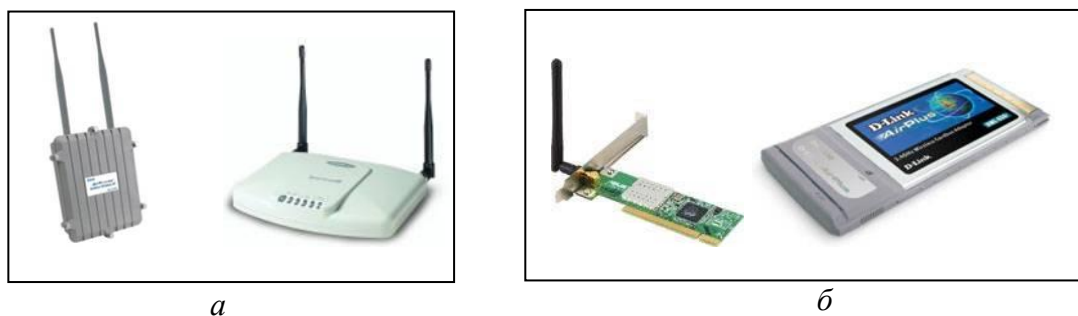


Рис. 4.15. Беспроводная связь: *а* – точки доступа; *б* – сетевые карты

Кроме неионизирующего излучения монитор на базе электронно-лучевой трубки является источником рентгеновского излучения. Изображение на экране монитора возникает в результате свечения люминофора под действием пучка электронов, которые при торможении генерируют рентгеновское излучение. Энергия фотонов ограничена значениями 10...25 кэВ (мягкие рентгеновские лучи). Вследствие ограниченной энергии этих лучей они эффективно поглощаются стеклянным экраном. Исследования, проведённые в разных странах, в том числе и в лабораторных условиях по специальным методам, показали, что уровни рентгеновского излучения современных мониторов малы и практически не представляют опасности для человека.

**Прочие источники ЭМП.** В медицинской практике пациенты, страдающие от переломов костей, которые плохо вылечиваются или срастаются, проходили лечение пульсирующими магнитными полями. Также проводились исследования по их применению для увеличения скорости заживления ран и регенерации тканей. Для стимуляции роста костей используются различные приборы, создающие импульсы магнитного поля. Типичным примером является прибор, генерирующий среднюю плотность магнитного потока, равную 0.3 мТл (максимальную – около 2.5 мТл) и индуцирующий максимальную напряжённость электрического поля в костях в диапазоне 0.075...0.175 В/м. Около поверхности подвергавшейся воздействию конечности прибор генерирует максимальную плотность магнитного потока порядка 1 мТл, создавая в ткани максимальную плотность ионного потока, равную  $\sim 10...100 \text{ мА/м}^2$ .

Одним из наиболее ранних видов практического использования радиочастотной энергии была коротковолновая диатермия. Для этого использовались незранированные электроды с полями высокого рассеяния.

В последнее время радиочастотные поля применяются в сочетании со статическими магнитными полями для получения магнитно-резонансных изображений. Поскольку используемая радиочастотная энергия мала, а поля почти полностью заключены внутри загораживающего пациента сооружения, то экспозиция операторов незначительна.

Одним из наиболее известных бытовых приборов является микроволновая, или сверхвысокочастотная печь, создающая как в рабочей зоне, так и за пределами самой печи электромагнитное поле частотой 2.45 ГГц. Мощность, потребляемая бытовой СВЧ-печью от сети, составляет около 800 Вт. Плотность потока внешнего электромагнитного излучения СВЧ-печи вблизи неплотностей дверцы может достигать  $1.2 \text{ Вт/м}^2$  и более.

#### 4.4. Электромагнитные поля оптического диапазона

Искусственными источниками ЭМП оптического диапазона частот являются осветительные приборы, нагревательные системы и нагретые с их помощью изделия, плазменный разряд, электрическая дуга сварочных установок, лазеры и др. Наиболее важными искусственными источниками воздействия оптического излучения на человека являются следующие:

- *сварка и резка.* Источник сильного ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений, исходящих от дуги;
- *литейное производство и металлургические отрасли.* Наиболее значительным источником видимого и инфракрасного облучений является поверхность расплавленного и горячего металла, плотность потока мощности от которых достигает  $0.5 \dots 1.2 \text{ кВт/м}^2$ ;
- *дуговые лампы.* Дают интенсивное излучение коротковолнового видимого (голубого) света, а также ультрафиолетовых и инфракрасных лучей;
- *инфракрасные лампы.* Испускают лучи преимущественно в диапазоне ИК-А и обычно используются для термической обработки, сушки красок и других аналогичных операций;
- *медицинское лечение.* Инфракрасные лампы применяются в физической медицине для разнообразных диагностических и терапевтических целей. Их суммарное воздействие на пациента значительно различается в зависимости от типа лечения;
- *общее освещение.* Флуоресцентные (люминесцентные) лампы испускают очень небольшое инфракрасное излучение и обычно недостаточно ярки

для того, чтобы создать потенциальную опасность для глаз. Вольфрамовые и вольфрамово-галогенные лампы накаливания испускают большую долю своего излучения в инфракрасном диапазоне. Кроме того, голубой свет, испускаемый вольфрамово-галогенными лампами, может создать опасность для сетчатки, если человек смотрит на нить накаливания;

- *оптические прожекторы и другие приборы.* Сильные источники света используются в качестве поисковых огней, софитов и других светолучевых коллимационных приборов. Их прямой луч может создавать опасность для сетчатки при очень близких расстояниях нахождения человека от источника.

Эмиссия инфракрасного излучения в наиболее важных источниках может быть определена использованием физического закона об излучении абсолютно чёрного тела. Плотность теплового потока  $q$  зависит от температуры излучающего тела, площади излучающей поверхности и расстояния:

$$q = 0.78S[(T/100)^4 - 110]/l^2.$$

Длина волны максимальной эмиссии описывается в соответствии с законом Вiena

$$\lambda_{\max} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}.$$

Наиболее значительными искусственными источниками ультрафиолетового излучения, оказывающими воздействие на людей, являются:

- *дуга промышленной сварки.* УФ может вызывать острые поражения глаз и кожи после трёх – десяти минут экспозиции при нахождении наблюдателя на близком расстоянии в несколько метров;

- *промышленные/рабочие УФ-лампы.* Многие промышленные процессы, такие как фотохимическая фиксация чернил, красок и пластиков, включают в себя использование ламп, которые испускают мощное излучение в ультрафиолетовом диапазоне;

- *“чёрный свет.”* Специальные лампы, испускающие энергию преимущественно в ультрафиолетовом диапазоне. Они обычно используются как адеструктивный метод испытания флуоресцентных порошков, для определения подлинности банкнот и документов и для специальных эффектов в рекламе и на дискотеках;

- *медицинское лечение.* Ультрафиолетовые лампы УФ-А применяются в медицине для разнообразных диагностических и терапевтических целей;

- *бактерицидные УФ-лампы.* Ультрафиолетовое излучение с длиной волны в диапазоне 250...265 нм является наиболее эффективным для стерилизации и дезинфекции, поскольку такая длина волны соответствует максимуму спектра поглощения РНК. Гермицидные, бактерицидные или просто ультрафиолетовые лампы применяются в больницах для борьбы с туберкулезной инфекцией, в кабинетах микробиологической безопасности для инактивации воздушно-капельных и поверхностных микроорганизмов;

- *косметический загар.* Кушетки для загара находятся в заведениях, где клиенты могут загорать под специальными лампами для загара, излучающими преимущественно в УФ-А-диапазоне, но испускающими также и небольшое количество УФ-В-лучей. Регулярное пользование кушеткой для загара может существенно повлиять на ежегодную экспозицию кожи человека ультрафиолетовому излучению;

- *общее освещение.* Люминесцентные лампы испускают небольшие количества УФ-излучения. Вольфрамово-галогенные лампы чаще всего применяются дома и на рабочем месте для разнообразного освещения и демонстрационных целей. Неэкранированные галогенные лампы могут излучать УФ и на близком расстоянии вызвать острое поражение глаз;

- *лазерное излучение.* Представляет собой вид электромагнитного излучения, генерируемого в оптическом диапазоне длин волн 0.1...1000 мкм. Отличие его от других видов излучения заключается в монохроматичности, когерентности и высокой степени направленности. Благодаря малой расходимости луча лазера плотность потока мощности может достигать очень больших значений –  $10^{16} \dots 10^{17}$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Лазер** (Laser – Lighting amplification by stimulated emission of radiation). Устройство, предназначенное для выработки и усиления электромагнитной энергии оптического диапазона частот с использованием процесса управляемой индукционной эмиссии. Он работает на принципе индуцированного излучения, получаемого при оптической накачке (к примеру, воздействием импульсов света) термически неравновесной (активной) среды, в качестве которой служат диэлектрические кристаллы, стекло, газы, полупроводники и плазма. Отдельные атомы таких материалов при падении на них фотона обладают свойствами перехода с верхнего энергетического уровня на нижний уровень с испусканием двух фотонов, индуцированных с теми же частотой, фазой, поляризацией и направлением распространения.



Лазеры широко применяются в научных исследованиях (физика, химия, биология и др.), в медицине (хирургия, офтальмология и др.), а также в технике (связь, локация, измерительная техника, голография), при проведении различных исследований вещества, термообработке, сварке, резке, при изготовлении отверстий малого диаметра и др. Значения плотности потока мощности для различных сфер применения составляют:  $10^7 \dots 5 \cdot 10^9$  – связь, локация, голография, измерительная техника, термообработка, пайка, сварка и т. д.;  $5 \cdot 10^9 \dots 8 \cdot 10^9$  – подчистка слоёв при производстве микросхем, испарение тонких плёнок;  $8 \cdot 10^9 \dots 7 \cdot 10^{11}$  – прошивка отверстий, резка и раскрой материалов  $10^{12} \dots 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> – решение специальных задач

Лазеры принято классифицировать по назначению (технологические, исследовательские, специального назначения, в том числе военные), по конструктивному исполнению (стационарные, передвижные, открытые, закрытые, с естественным охлаждением, с принудительным охлаждением водой, воздухом, специальной жидкостью), по методу накачки (химическим возбуждением, пропусканием высокочастотного, импульсного и постоянного токов, импульсным светом, постоянным светом), по активному рабочему телу (газодинамические, твёрдотельные, полупроводниковые жидкостные, газовые), по мощности излучения (сверхмощные, мощные, средней мощности, маломощные), по режиму работы (импульсные, непрерывные) и по длине генерируемой световой волны.

По степеням опасности лазеры могут подразделяться на следующие классы (при нормировании используются и другие виды классификации):

- 0 – безопасные (выходное излучение не представляет опасности для биологической ткани при остром и хроническом воздействиях);
- 1 – малоопасные (воздействия прямого и зеркально отражённого излучений только на глаза);
- 2 – средней опасности (воздействия на глаза прямого, зеркально и диффузно отражённого излучений, а также прямого и зеркально отражённого излучений на кожу);
- 3 – опасные (воздействия на глаза, кожу прямого, зеркально и диффузно отражённого излучений и наличие других опасностей);
- 4 – высокой опасности (опасности, характерные для лазеров 2 – 3 классов, а также ионизирующее излучение с уровнем, превышающим установленные допустимые пределы).

Области применения лазеров и некоторые их характеристики приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Рабочее вещество	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность, Вт	Частота следования импульсов,	Длительность импульсов	Область использования
Эксимерные лазеры	<0.40	Импульсный	10	$1 \dots 10^4$	10 нс	Фотофизика, фотохимия, спектроскопия
Аргон	0.48	Непрерывный	$1 \dots 30$	–	–	Испарение
	0.51	Импульсный	$1 \dots 25$ (средняя)	$1 \dots 10^3$	$5 \dots 100$ мкс	То же
Гелий – неон	0.63	Непрерывный	$(1 \dots 30) \cdot 10^{-3}$	–	–	Юстировка, контроль, нивелирование
Рубин	0.69	Импульсный	$1 \dots 20$ (средняя)	1	$0.3 \dots 6$ мс	Сварка, сверление
		С модуляцией добротности	$10^5$ (пиковая)		$0.3 \dots 2$ мс	То же
			$10^9$ (пиковая)		$5 \dots 50$ мкс	Испарение
Стекло с неодимом	1.06	Импульсный	$1 \dots 30$ (средняя)	1	$0.5 \dots 10$ мс	Сварка, сверление
		С модуляцией добротности	$10^6$ (пиковая)	0.0005	$0.5 \dots 1$ мс	Сверление, резание
			$10^9$ (пиковая)	0.0033	$10 \dots 60$ мкс	Испарение
Иттриево – алюминиевый гранат	1.06	Непрерывный	$1 \dots 100$	–	–	Испарение, сварка
		Импульсный	$1 \dots 100$ (средняя)	$1 \dots 10^3$	$0.01 \dots 5$ мс	Сварка, сверление
		С модуляцией добротности	$(5 \dots 500) \times 10^6$	$10^3 \dots 10^4$	$15 \dots 300$ мкс	Испарение
Диоксид углерода	1.06	Непрерывный	$10 \dots 10^4$	–	–	Резание, сварка термообработка
		Импульсный	$1 \dots 250$	$10 \dots 10^3$	$50 \dots 150$ мс	Легирование, сверление, сварка
		С модуляцией добротности	$10^4$ (пиковая)	$200 \dots 500$	$30 \dots 300$ мкс	Испарение, сварка

Если при прямом лазерном облучении невооружённого глаза (рис. 4.16) на поверхность роговицы радиусом  $r_{\text{пр}}$  приходится энергия  $W$ , то энергетическая экспозиция  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}} = W/(\pi r_{\text{пр}}^2)$ .

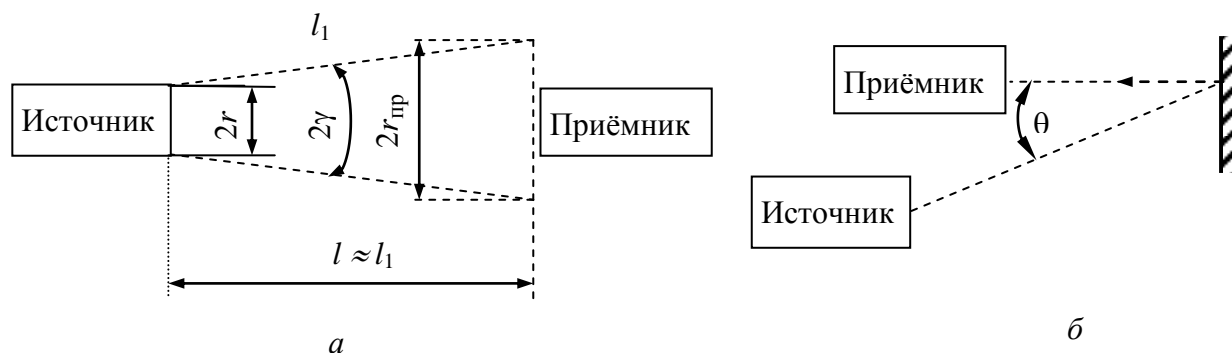


Рис. 4.16. Схема воздействия на роговицу глаза лазерного излучения:  
а – прямое; б – диффузное

Как видно из рис. 4.16, а, ввиду малости угла  $\gamma$  расстояние до расчётной точки  $l_1 = (r_{\text{пр}} - r)/\gamma$ . Поэтому опасное расстояние

$$l = \left( \sqrt{\frac{W}{\pi \mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лПДУ}}}} - r \right) / \gamma,$$

где  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{лПДУ}}$  – ПДУ энергетической экспозиции для роговицы глаза.

Класс опасности лазера при прямом излучении определяют в зависимости от длины волны излучения (используя паспортные данные на лазер, вычисляя безразмерный параметр  $G$  и сравнивая его по номограммам):

- Для УФ-диапазона спектра ( $0.2 \text{ мкм} \leq \lambda < 0.4 \text{ мкм}$ ) по рис. 4.17, а и формуле

$$G = W_{\Sigma} / (\pi r^2 \cdot \mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}\Sigma}),$$

где  $W_{\Sigma}$  – энергия, генерируемая лазером за рабочий день;  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}\Sigma}$  – суммарная энергетическая экспозиция, определяемая из табл. 4.3.

Таблица 4.3

$\lambda$ , мкм	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}\Sigma}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\lambda$ , мкм	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}\Sigma}$ , Дж/м <sup>2</sup>
0.2...0.21	$10^{-4}$	>0.29...0.3	$10^{-1}$
>0.21...0.215	$10^{-3}$	>0.3...0.37	$10^0$
>0.215...0.29	$10^{-2}$	>0.37...0.4	$2 \cdot 10^1$

- Для видимого диапазона спектра ( $0.4 \leq \lambda < 0.75$  мкм) по рис. 4.17, б и формуле

$$G_k = W_0 / (\pi r^2 \cdot \text{ЭЭ}_{\text{Л}_k} k_1),$$

где  $W_0$  – энергия за время однократного воздействия;  $\text{ЭЭ}_{\text{Л}_k}$  – значения ЭЭ для различных длин волн и длительностей одиночного импульса;  $k_1$  – коэффициент, зависящий от длительности серии  $\tau_{\text{сер}}$  и частоты повторения импульсов  $f_{\text{пов}}$  и определяемый из справочника (к примеру,  $k_1 = 1$  при любом  $\tau_{\text{сер}}$  и  $f_{\text{пов}} < 2$  Гц,  $k_1 = 2.6 \cdot 10^{-4}$  при  $\tau_{\text{сер}} = 2.6 \cdot 10^{-4}$  с и  $500 < f_{\text{пов}} < 1000$  Гц и т. д.).

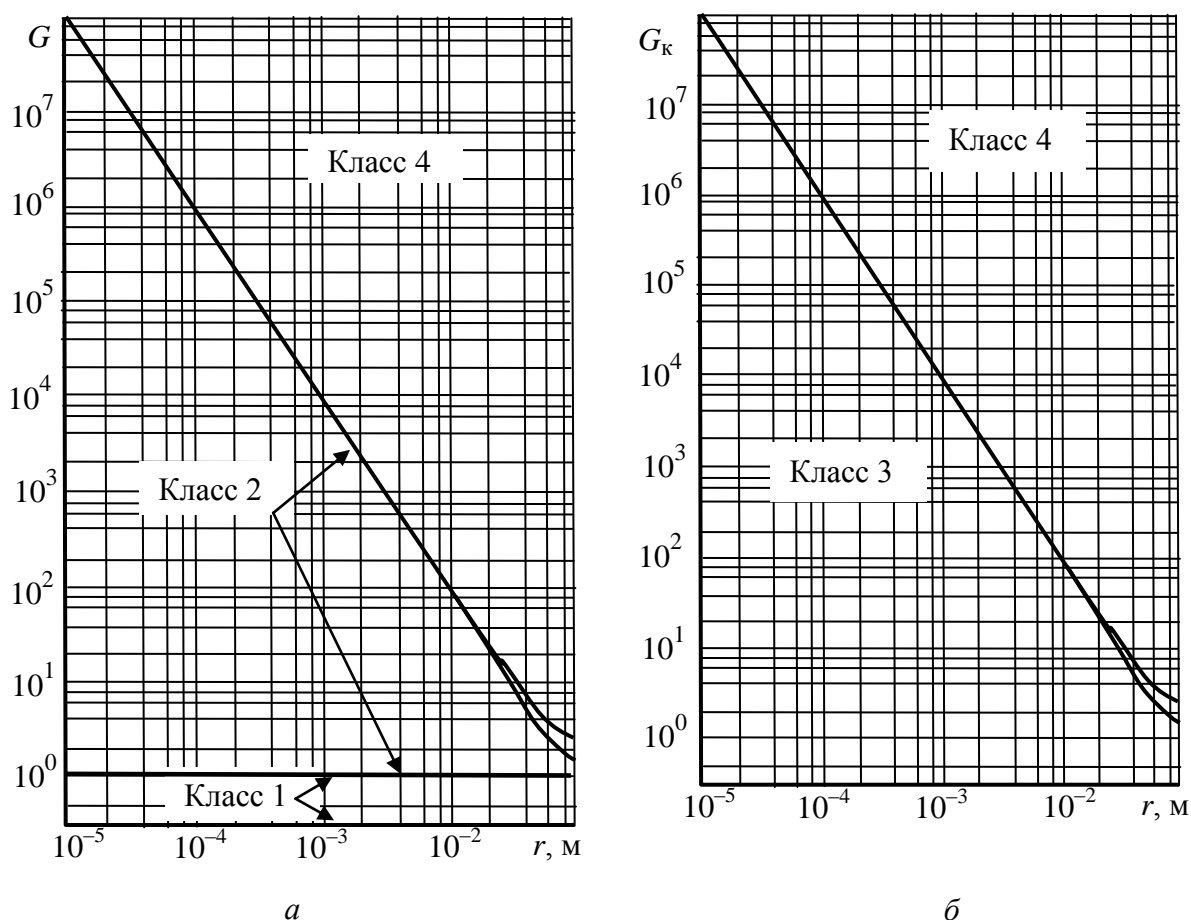


Рис. 4.17. Зависимости значения параметра  $G$  для лазеров классов опасности 1 и 2 (а), и минимального значения  $G_k$  для лазеров класса опасности 4 (б) от радиуса апертуры

Если лазер не относится к 4 классу, то последующие классы определяют (с учётом первичных и вторичных биологических эффектов вычислением безразмерных параметров и сравнением их с рис. 4.18) по формулам:

$$G_{\text{П}} = W_0 / (\pi r^2 \cdot \text{ЭЭ}_{\text{Л}_1} k_2); \quad G_{\text{В}} = W_0 n / (\pi r^2 \cdot \text{ЭЭ}_{\text{Л}_2}),$$

где  $n$  – количество воздействий излучения на глаз за рабочий день;  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{л_1}$  – ПДУ энергетической экспозиции, зависящей от длительности импульса  $\tau_{и}$  и длины волны  $\lambda$ ;  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{л_2}$  – значения ЭЭ для различных длин волн в зависимости от длительности одиночного импульса излучения;  $k_2$  – поправочный коэффициент, определяемый из справочника (к примеру,  $k_2 = 1$  при любом  $\tau_{сер}$  и  $f_{пов} < 2$  Гц,  $k_2 = 2.5 \cdot 10^{-4}$  при  $\tau_{сер} = 3 \cdot 10^4$  с и  $500 < f_{пов} < 1000$  Гц и т. д.).

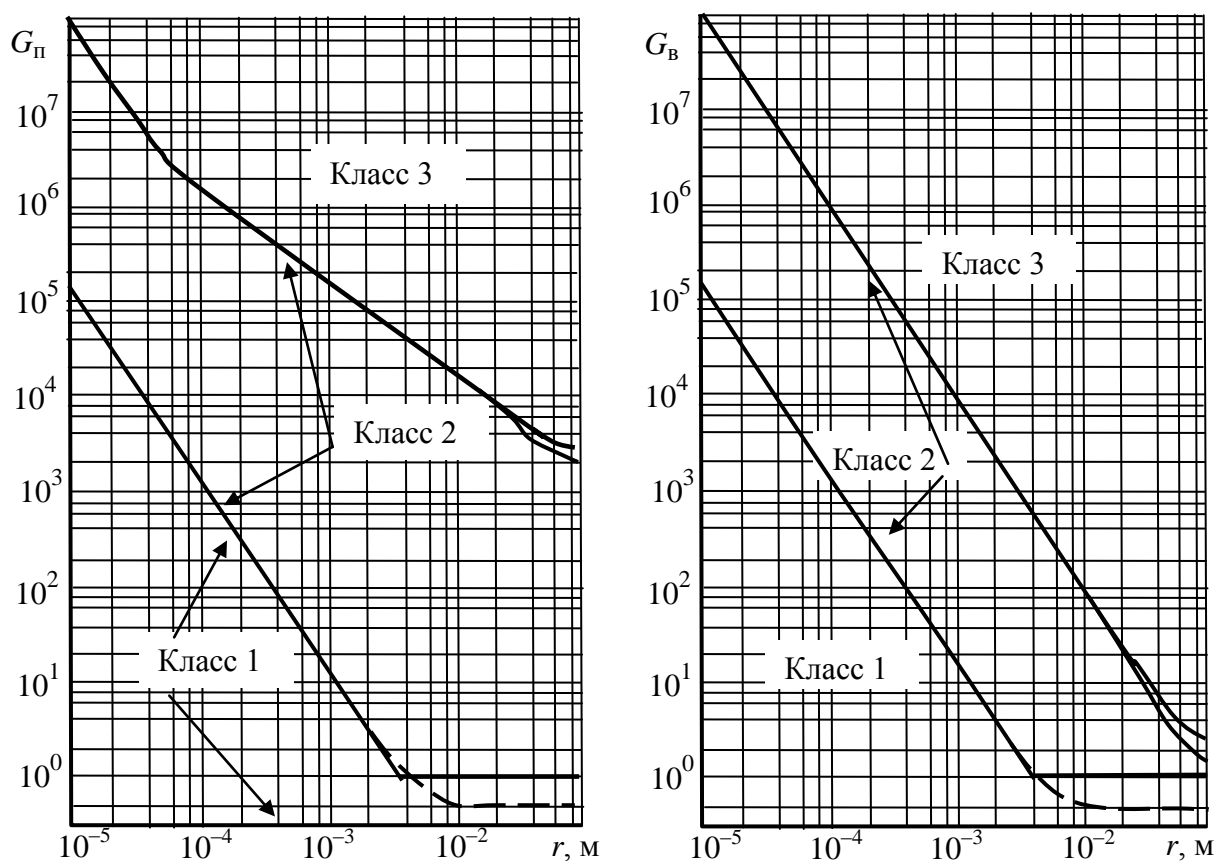


Рис. 4.18. Зависимости максимальных значений параметров первичных  $G_{п}$  и вторичных биологических эффектов  $G_{в}$  для лазеров классов 1, 2 и 3 опасности от радиуса апертуры

Для примера значения  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{л_1}$  приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

$\tau_{и}, \text{с}$	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{л_1}, \text{Дж/м}^2, \text{ на роговице глаза при } \lambda, \text{мкм}$						
	>0.40... 0.42	>0.42... 0.45	>0.45... 0.90	>0.90... 1.10	>1.10... 1.20	>1.20... 1.30	>1.30... 1.40
$10^{-9}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$5.1 \cdot 10^{-1}$
0.25	6.5	4.0	2.3	2.8	6.5	$2.0 \cdot 10^1$	$6.5 \cdot 10^2$
$3 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^2$	$7.4 \cdot 10^1$	$4.2 \cdot 10^1$	$5.3 \cdot 10^1$	$1.2 \cdot 10^2$	$3.7 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^3$

Значения  $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}_2}$  приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

$\lambda$ , мкм	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}_2}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\lambda$ , мкм	$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}_2}$ , Дж/м <sup>2</sup>
>0.40...0.44	$2.8 \cdot 10^{-1}$	>0.67...0.71	$3.2 \cdot 10^{-1}$
>0.44...0.48	$4.6 \cdot 10^{-2}$	>0.71...0.73	6.2
>0.48...0.62	$6.5 \cdot 10^{-3}$	>0.73...0.75	26
>0.62...0.67	$2.4 \cdot 10^{-2}$		

Воздействие отражённым излучением оценивается по величине *лазерно-опасной зоны* (ЛОЗ). Границы этой зоны можно определить по результатам расчёта плотности потока излучения (облучённости) в различных точках пространства вокруг лазерных установок. Зеркально отражённое лазерное излучение оценивается аналогично прямому излучению с той лишь разницей, что расстояние от источника здесь равно сумме расстояний от лазера до преграды и от глаза человека до преграды, отражающей излучение.

При облучении излучением, диффузно отражённым от площадки, которая характеризуется углом  $\theta$  (см. рис. 4.16, б) и коэффициентом отражения (альбедо)  $K_{\text{отр}}$ , опасное расстояние

$$l_{\text{оп}} = \sqrt{\frac{K_{\text{отр}} \varepsilon \cos \theta}{\pi \mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{л}}}}.$$

Параметр  $G$  вычисляют в зависимости от длины волны излучения. Для источника с равномерным распределением энергетической светимости и при  $G \gg 1$  формула примет вид

$$l_{\text{оп}}(\theta) = r \sqrt{G \cos \theta}.$$

Например, при расчёте границы лазерно-опасной зоны при воздействии излучения ближнего ИК-диапазона спектра на глаз с радиусом зрачка  $r_3$  вводят безразмерный параметр  $G_0$ :

$$G_0 = \frac{r_3^2}{0.16} G_{\text{п}}.$$

Радиус зрачка глаза зависит от фоновой освещённости роговицы глаза  $E_{\text{ф}}$ .

$E_{\text{ф}}$ , лк	$10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	8	100	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
$r_3$ , см	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1

При значении безразмерного параметра  $G_0 \geq 4 \cdot 10^6$  границу опасной зоны вычисляют по формуле

$$l_{\text{оп}}(\theta) = r \sqrt{G_0 \cos \theta}.$$

При  $G_0 \leq 4 \cdot 10^6$  границу ЛОЗ рассчитывают по формуле

$$l_{\text{оп}}(\theta) = 5 \cdot 10^{-4} r G_0 \sqrt{\cos \theta}.$$

Расчётный метод оценки границ лазерно-опасной зоны является ориентировочным (коэффициент отражения излучения и закон отражения точно не известны, а дополнительное отражение излучения от различных предметов не учитывается) и должен быть дополнен экспериментальным методом (оценка по результатам измерений).

#### **4.5. Человек как источник электромагнитных полей**

Основную роль в жизнедеятельности человека играют *биопотенциалы* – разности потенциалов между различными участками тканей. В живых клетках самого тела человека постоянно происходят электрические процессы переноса через мембраны ионов различных знаков. Мембрана, обладающая полупроводниковыми свойствами, разделяет положительные и отрицательные ионы по обе стороны, в результате чего создаётся разность потенциалов в несколько милливольт. Благодаря таким элементарным источникам электрического поля на клеточном уровне в организме протекают микроамперные электрические токи (*биотоки*), создавая необходимые условия для жизни и деятельности человека. Мышечные клетки сокращаются, заставляя сердце транспортировать кровь, перемещаться в пространстве, уходить от опасности, связанной с воздействием негативных факторов, информация о которых приходит от рецепторов также с помощью токов. Поддержание разности потенциалов мембраны как основы поддержания упорядоченности структуры живой материи является необходимым условием жизни человека, а отсутствие разности потенциалов означает биологическую смерть.

Механизмы появления биопотенциалов могут быть различными: диффузная разность потенциалов возникает из-за различной подвижности ионов в различных жидкостях, контактная разность потенциалов – благодаря процессам на границе разнородных тканей, фазовая разность потенциалов – из-за неодинаковой растворимости различных типов ионов и т. д. В связи с тем, что в организме человека протекают едва ли не все процессы, известные

в природе, вокруг тела человека можно зарегистрировать постоянное электрическое и магнитное поля, электромагнитные излучения практически всех длин волн, акустическое излучение и т. д.

На рис. 4.19 приведены приблизительные эквипотенциальные кривые, которые формируются вокруг тела человека при работе сердца.

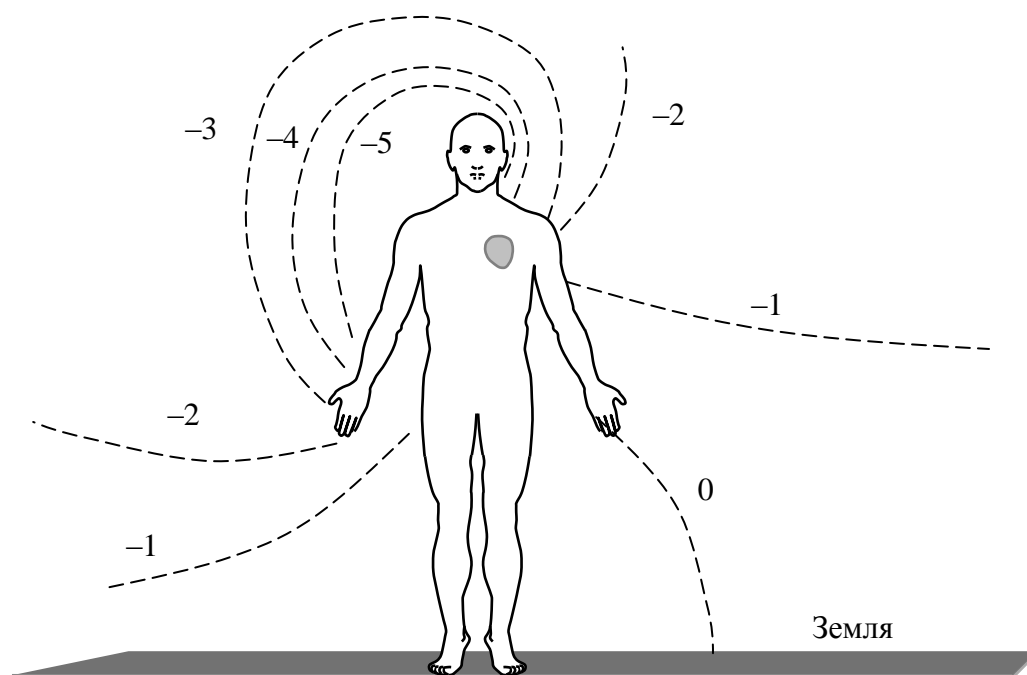


Рис. 4.19. Примерное распределение потенциалов электрического поля  $u$ , мВ, на поверхности кожи и в воздухе, возникающее от биоэлектрической активности сердца в момент R-зубца электрокардиограммы

Вследствие работы сердца, мозга, а также движения заряженных элементов крови и т. д., формируются электромагнитные поля инфранизкой частоты. Сердце человека генерирует электрические колебания с частотами от 30 до 700 Гц, а мозг – с частотами 200...500 Гц.

Основными источниками ЭМП человека являются отдельные органы человека и наружные части его тела (кожа, волосы), создающие ЭМП частотой от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$  Гц, а также биологически активные процессы, связанные с взаимодействием биообъектов с окружающей средой

Внутренние ЭМП могут изменяться собственным сознанием человека, т. е. в зависимости от эмоционального состояния он способен концентрировать поля в определённой области организма или передавать их другому живому организму, хотя этим пользуется только ограниченный круг людей.



В связи с тем, что любое перемещение зарядов (электронов, ионов) приводит к появлению переменного ЭМП, то любой жизненный процесс, изменение в организме (положительное или отрицательное) дублируются возникновением электромагнитного поля различных частот и интенсивностей.

К примеру, изменение ИК-излучения в сторону большей интенсивности происходит при развитии патологии или травмировании органов и тканей. Многие люди замечают, что домашние животные, в первую очередь, кошки, реагируют на боль человека, пытаясь “помочь” ему, безошибочно находя поражённое место и прислоняясь к нему своим телом.

Основную долю в биологические эффекты вносит электрическая составляющая ЭМП, хотя она достаточно мала, чтобы надёжно фиксировать эти поля за пределами организма, особенно на больших расстояниях. В связи с тем, что естественные магнитные включения в теле человека практически отсутствуют, слабоинтенсивное собственное магнитное поле существенного эффекта оказывать не может.

#### 4.6. Контрольные вопросы и задачи

Чем отличаются техногенные источники от естественных по интенсивности воздействия?

Что является источником ЭМП персональной ЭВМ?

- *Задача 1.* Оценить вредность работы с системами беспроводного доступа к ЭВМ и определить максимальное время работы с ноутбуком, который размещается на коленях и на котором установлен адаптер Wi-Fi для связи с другими устройствами, если его установленная мощность  $P_{\text{и}} = 20$  дБм, коэффициент усиления антенны  $K_y = 5$  дБи, а расстояние до жизненно-важных органов составляет 0.1 м.

Решение. Человек может находиться в зоне максимальной мощности антенны  $P_{\text{и}} + K_y = 25$  дБм (или 0.316 Вт). ППЭ на расстоянии  $l = 0.1$  м от точки наблюдения  $\text{ППЭ} = 2.5 \text{ Вт/м}^2$ , а допустимое время работы исходя из  $\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ ПД}} = 2 (\text{Вт/м}^2) \cdot \text{ч}$  в течение рабочего дня всего 48 мин.

- *Задача 2.* Разработчики мониторов на базе электронно-лучевой трубки гарантируют, что дрожания изображения не будет при индукции внешнего магнитного поля частотой 50 Гц, равной 400 нТл. Определить расстояние от монитора до кабеля, по которому протекает уравнивающий ток 20 А, на котором магнитное поле не будет превышать указанного значения.

- *Задача 3.* Определить класс опасности лазера, если длина волны составляет  $\lambda = 0.69$  мкм, энергия одного импульса  $W = 80$  Дж, длительность одного импульса  $\tau_{\text{и}} = 0.25$  с, частота повторения импульсов  $f_{\text{пов}} < 1$  Гц, радиус излучения пучка  $r = 0.2$  см.

#### 4.7. Выводы

Имеется большое число техногенных источников ЭМП различных частот, которые могут создать проблемы с ЭМС или биоЭМС. Часть из них предназначена для работы на излучение в окружающее пространство, часть – на излучение в определённом объекте или системе. Уровни ЭМП в зоне пребывания человека в некоторых случаях превышают ПДУ. Задачей разработчиков нового оборудования является снижение полезных излучаемых ЭМП (что является некоторым противоречием, поскольку может, например, ухудшить связь или другие полезные характеристики) и доведение паразитных ЭМП до допустимых значений, которые не вызывают проблем со здоровьем человека или с его безопасностью.

Расчёт составляющих ЭМП для многих систем достаточно сложен и требует использования современного программного обеспечения, позволяющего решать уравнения Максвелла, как правило, в трёхмерной постановке. Тем не менее, для относительно простых случаев, особенно для предварительной оценки воздействия ЭМП, можно использовать приближённые методики и простые формулы, которые приведены в рассмотренном разделе.

### 5. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

#### 5.1. Основные принципы защиты от ЭМП

Защита людей от неблагоприятного влияния ЭМП обеспечивается проведением организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Общие организационные мероприятия для защиты от любого вида излучений включают в себя:

- санитарное нормирование параметров облучения (принцип защиты ограничением интенсивности или дозы воздействия опасного или вредного фактора);
- ограничение продолжительности нахождения в зоне облучения (принцип защиты временем);

- предупредительные надписи или знаки (принцип защиты информированием об опасности).

*Организационные* мероприятия при проектировании и эксплуатации оборудования, являющегося источником ЭМП или объектов, оснащённых источниками ЭМП, предполагают:

- выбор рациональных режимов работы оборудования;
- выделение зон воздействия ЭМП (зоны с уровнями ЭМП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала, должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками);
- расположение рабочих мест и маршрутов передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от источников ЭМП, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- выполнение ремонта оборудования, являющегося источником ЭМП, (по возможности) вне зоны влияния ЭМП от других источников;
- соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП.

*Медицинско-профилактические* мероприятия включают:

- предварительные и периодические медицинские осмотры;
- гигиенические и терапевтические мероприятия по лечению пострадавших от электромагнитного воздействия,
- временный или постоянный перевод на другую работу категорий граждан с выраженными формами профессиональной патологии или усугубляющимися в результате электромагнитного воздействия общими заболеваниями, а также женщин в период беременности и кормления;
- недопущение к самостоятельной работе лиц моложе 18 лет.

*Инженерно-технические* мероприятия должны обеспечивать снижение уровней ЭМП на рабочих местах внедрением новых технологий и применением средств коллективной и индивидуальной защиты (когда фактические уровни ЭМП на рабочих местах превышают ПДУ).

Инженерно-технические меры защиты могут включать в себя:

- использование коаксиальных линий передач энергии;
- размещение рабочих мест в зонах ниже предельно допустимых интенсивностей излучений (защита расстоянием);
- использование средств подавления электромагнитных полей в источнике, на пути их распространения (экранирование) и СИЗ (так, согласно

СанПиН 2.2.4.1191–03, руководители организаций для снижения риска вредного влияния ЭМП, создаваемого средствами радиолокации, радионавигации, связи, в том числе подвижной и космической, должны обеспечивать работающих такими средствами);

- устранение паразитных наводок на фидерные линии, электросетевые провода, сети водопровода и отопления, которые могут быть переизлучателями электромагнитной энергии и др.

На рис. 5.1 приведено схематическое изображение принципиальных подходов к защите от электромагнитных полей.



Рис. 5.1. Принципиальные подходы к защите от ЭМП

Выбор того или иного технического средства защиты зависит от особенностей системы, создающей электромагнитное излучение. Эффективность любого мероприятия определяется определёнными показателями, называемыми коэффициентами ослабления, коэффициентами экранирования или коэффициентами защиты.

## 5.2. Особенности защиты от магнитного поля

На основе многочисленных исследований установлено, что снизить интенсивность магнитного поля, создаваемого многими источниками тока низкой, средней и нижнего ряда высоких частот, на пути его распространения до человека достаточно сложно.

В связи с этим много внимания уделяется оптимизации самих электрических систем. К примеру, если в трёхфазных линиях передачи или силовых кабелях уменьшить расстояние между токопроводами, по которым протекают токи, сдвинутые на  $120^\circ$ , внешнее магнитное поле значительно уменьшится. Так, если индукция, измеренная на высоте от земли 1 м и на расстоянии 5 м от места закладки одножильных кабелей при глубине их закладки 1.6 м и расстоянии между соседними кабелями, равном 0.25 м, составляет 1 мкТл, то при расположении их вплотную она уменьшается до 0.4 мкТл. Другой пример оптимального проектирования заключается в том, что для максимального снижения интенсивности внешнего магнитного поля в боковых частях линии проходных кузнечных индукционных нагревателей необходимо следить за тем, чтобы соседние катушки индуктора, которые подключены к разным преобразователям частоты, имели минимальный угол сдвига фаз между собой. На это, как правило, не обращается никакого внимания. Другие электротехнические устройства и системы также могут потребовать конструктивных или схемных усовершенствований, позволяющих снизить внешние магнитные поля.

Если внешнее поле не удаётся уменьшить за счёт конструкции, приходится использовать другие технические средства и методы, которые могут быть разделены на *активные* и *пассивные*.

Пассивные средства защиты являются менее дорогими, чем активные, и к тому же не требуют дополнительного расхода энергии. Одним из таких средств является *экранирование*. В качестве магнитных или электрических экранов могут использоваться немагнитные или ферромагнитные материалы включая металлы, магнитодиэлектрики или ферриты.

Примеры различных видов экранирования высоковольтных подземных кабелей приведены на рис. 5.2. В зависимости от вида экрана и материала можно уменьшить внешнее магнитное поле в 2 – 8 раз. Более эффективным, конечно, является замкнутый экран.

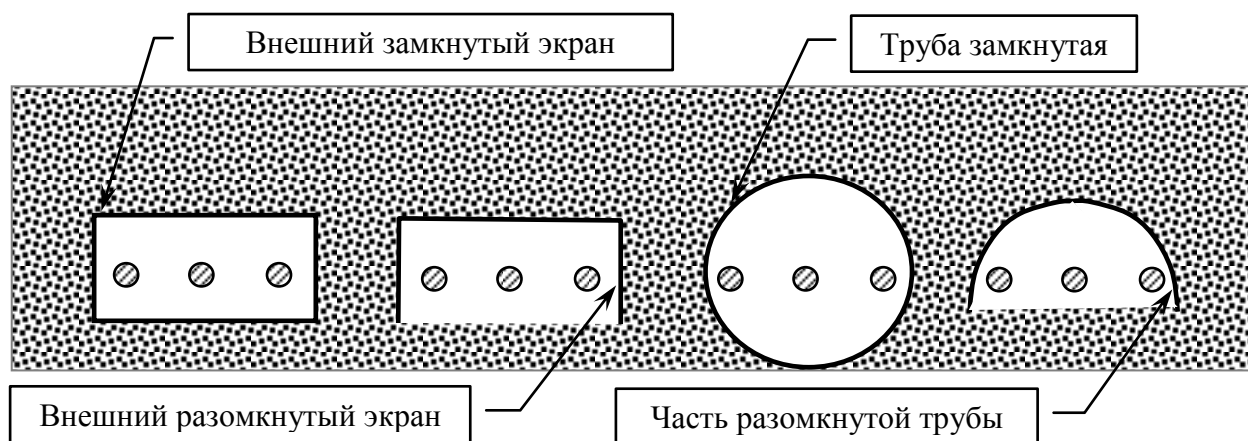


Рис. 5.2. Внешние металлические экраны для подземных высоковольтных кабелей

Принцип снижения напряжённости внешнего магнитного поля от одиночных кабелей, кабелей с уравнительными токами или системы кабелей за счёт экранирования основан на том, что общий магнитный поток в металлическом экране в основном замыкается по металлической оболочке, не выходя наружу. Таким образом, замкнутые конструкции экранов являются более предпочтительными, чем разомкнутые, что и показывают результаты различных исследований. Другой эффект уменьшения внешнего магнитного поля состоит в том, что в протяжённом экране появляется индуцированный ток, противоположно направленный суммарному току кабелей, и если концы экрана имеют электрическое соединение друг с другом напрямую или с помощью заземления, позволяя току протекать по экрану, то магнитные поля основного тока и наведённого компенсируют друг друга.

На эффекте появления наведённого в проводниках тока, компенсирующего внешнее магнитное поле от электрической системы, построены некоторые системы пассивной защиты линий электропередач, кабелей и других устройств, способных создать паразитные магнитные поля. На рис. 5.3 показана схема такого устройства для линий передач электроэнергии. Использование пассивной петли, выполненной с помощью проводников с последовательно включённым конденсатором определённой ёмкости, позволяет, на-

пример, уменьшить индукцию магнитного поля на расстоянии 15 м от опоры линии электропередачи с 12 до 6 мкТл, т. е. в два раза. Аналогичные результаты могут быть получены и для кабельных линий, проложенных в земле.

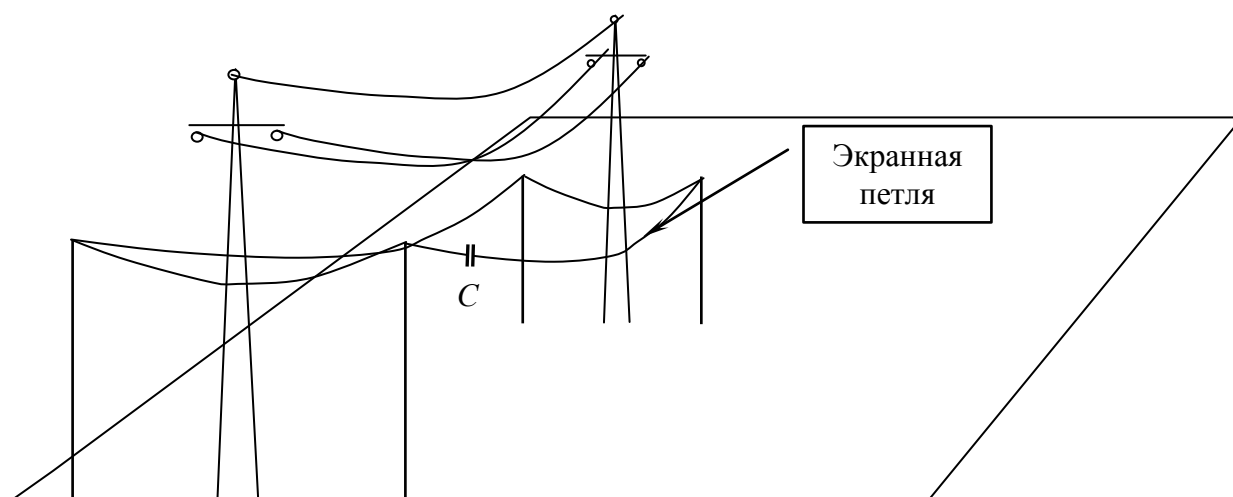


Рис. 5.3. Система локального снижения интенсивности МП в виде петли с конденсатором

Активным средством снижения напряжённости внешнего магнитного поля является создание магнитного поля от тока, противоположного по фазе основному току. Такой ток может протекать по активным петлям, расположенным вблизи систем, создающих МП и аналогичным ранее рассмотренным. В зависимости от дополнительного тока удаётся уменьшить индукцию магнитного поля в 2 – 4 раза. Для кабельных трасс необходимый для этого ток может достигать 150 А. Метод активного подавления магнитного поля требует дополнительного расхода энергии, поэтому может применяться только в ответственных случаях, когда другие методы не дают необходимого результата.

С большими сложностями по защите от внешнего магнитного поля сталкиваются разработчики или потребители среднечастотного и высокочастотного электротермического оборудования. Известны принципы защиты с помощью электромагнитных экранов и методики их расчёта, основанные на представлении источника ЭМП в виде диполя. Тем не менее, замкнутый экран практически никогда не удаётся применить по конструктивным или технологическим соображениям. Открытый с некоторых сторон экран настолько

снижает свою эффективность, что иногда от него просто приходится отказываться или ставить для отвода глаз или успокоения людей, постоянно находящихся вблизи этого оборудования.

Магнитные концентраторы или магнитопроводы являются также пассивными средствами защиты от МП и широко используются в различных электротехнических изделиях для создания почти беспрепятственного пути внешнему магнитному потоку. Тем не менее, магнитопроводы имеют также ограниченную возможность по уменьшению внешнего магнитного поля, особенно для систем индукционного нагрева. На рис. 5.4 показаны кривые напряжённости магнитного поля в одной из индукционных систем без использования магнитопровода и при его наличии.

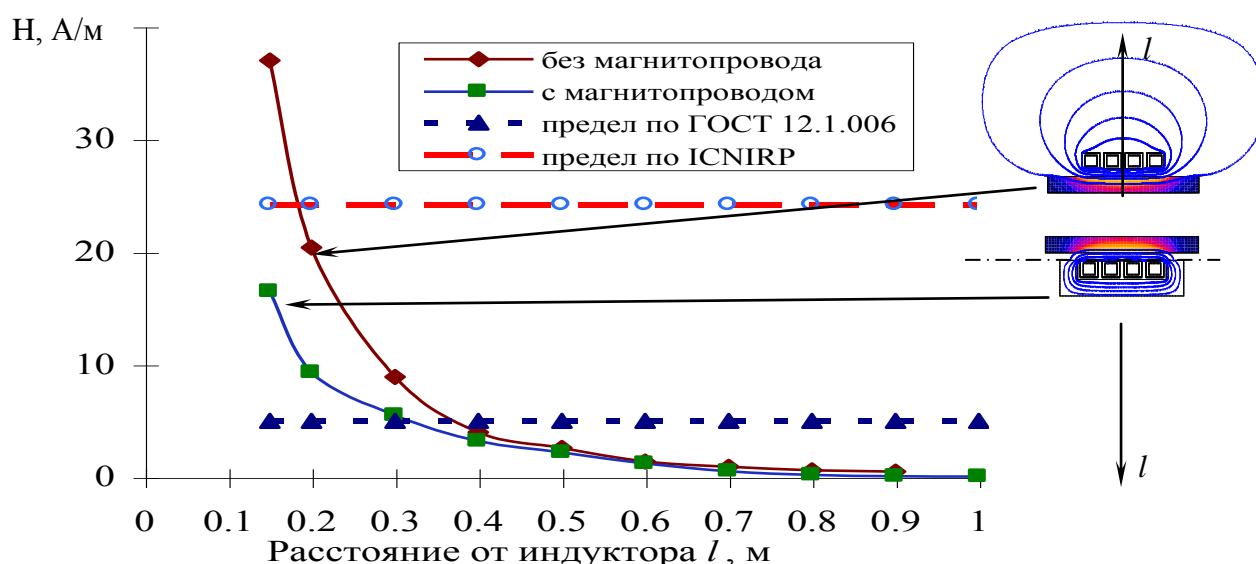


Рис. 5.4. Зависимости напряжённости магнитного поля в горизонтальной плоскости от расстояния до индуктора на высоте его расположения

Зона вредного влияния магнитного поля уменьшается, приближаясь к индуктору приблизительно на расстояние 0.3 м, т. е. сокращается на 0.07 м, что иногда не вполне достаточно. Исследования показывают, что внешний магнитопровод позволяет уменьшить влияние магнитного поля на обслуживающий персонал, который вынужден выполнять ручные работы вблизи индуктора, и одновременно повысить эффективность нагрева заготовок. В зависимости от относительной магнитной проницаемости эффективность составляет от 20 до 70 % по вредным магнитным полям и до 25...120 % по полезным ЭМП.



### **5.3. Защита от электрического поля**

Защита от электрического поля в большинстве случаев является более эффективной, чем от магнитного поля. Одной из причин этого является то, что силовые линии напряжённости электрического поля сильно изменяются при внесении проводящих тел.

К примеру, при работе на земле либо на проводах под напряжением на линии электропередач высокого напряжения для уменьшения напряжённости электрического поля и плотности токов в теле до значений, аналогичных значениям при работе на земле, может использоваться защитная одежда. В то же время защитная одежда не ослабляет воздействия магнитных полей.

Для высоковольтных низко-, средне- и высокочастотных устройств, являющихся в основном источниками электрического поля, хорошим средством защиты являются металлические кожухи и экраны. В связи с тем, что силовые линии напряжённости электрического поля сильно изменяются с внесением в него любого заземлённого проводящего предмета, концентрируясь на этом предмете, проводящий экран может явиться хорошим средством защиты. Эффективность его снижается, если его не заземлять, т. е. искусственно не создавать на нём потенциал, равный нулю (потенциалу земли).

Приэкранные фильтры являлись долгое время эффективным средством пассивной защиты от электрического поля, создаваемого мониторами на базе электронно-лучевой трубки. Эффективность защиты различных марок составляла от 50 до 99 %. В последнее время современные мониторы изготавливают уже с использованием технологий напыления экранов со встроенными системами защиты от статического электричества и от электрического поля, удовлетворяющими требованиям ТСО.

### **5.4. Защита от высокочастотного электромагнитного поля**

Технические защитные мероприятия от действия высокочастотных ЭМП сводятся в основном к применению защитного экранирования, к дистанционному управлению устройствами, излучающими ЭМ-волны, или к применению СИЗ.

Несмотря на некоторые недостатки экранирование источников электромагнитных излучений применяется во многих случаях. Известно, что ЭМП при падении на экран может отражаться (для идеального проводника, т. е. при удельном сопротивлении материала экрана, равном нулю, оно не

проникает в экран, полностью отражаясь), поглощаться с выделением энергии и проходить через экран с несколько изменёнными параметрами. Кроме этого, первичное ЭМП, которое существовало без экрана, тоже значительно изменяется, поскольку в экране за счёт наведённых токов появляется поле реакции.

Для определения полезности экрана введён такой показатель, как *коэффициент экранирования*, который определяется отношением составляющих ЭМП после экранирования ( $F_1$ ) и до экранирования ( $F_0$ ) (может принимать значения от 0 до 1):

$$K_{\text{экр}} = F_1 / F_0.$$

*Эффективность экранирования* является обратной величиной коэффициента экранирования и определяется в относительных единицах по соответствующим составляющим ЭМП:

$$\Theta_{\text{экр}} = H_0 / H_1, \quad \Theta_{\text{экр}} = E_0 / E_1, \quad \Theta_{\text{экр}} = p_0 / p_1.$$

Часто эффективность экранирования (или экранное затухание) выражают в децибелах, определяя их по формулам:

$$\Theta_{\text{экр}} = 20 \lg(H_0 / H_1), \quad \Theta_{\text{экр}} = 20 \lg(E_0 / E_1).$$

Точный аналитический расчёт эффективности экранирования оболочками является достаточно сложным из-за большого числа параметров, электрофизических свойств материалов экранов и других причин, поэтому далее приводятся только частные случаи, которые могут быть использованы для приближённой оценки достаточности того или иного варианта защиты. На рис. 5.5 приведены наиболее распространённые варианты экранов, для которых можно сравнительно просто рассчитать коэффициенты защиты от ЭМП.

В связи с тем, что составляющие ЭМП до и после экрана имеют фазовый сдвиг, эффективность экранирования плоской однородной пластиной толщиной  $d$  (рис. 5.5,  $a$ ) в общем виде является комплексной величиной

$$\Theta_{\text{экр}} = \left\{ (1 + a + j)^2 \exp\left[(1 + j)\frac{d}{\Delta}\right] - (1 - a + j)^2 \exp\left[-(1 + j)\frac{d}{\Delta}\right] \right\} \times \\ \times \left\{ (1 + a - j)^2 \exp\left[(1 - j)\frac{d}{\Delta}\right] - (1 - a - j)^2 \exp\left[-(1 - j)\frac{d}{\Delta}\right] \right\} / [4a(1 - j)],$$

где  $a = \sqrt{\frac{2}{2\pi f r \epsilon_0 \mu}}$ .

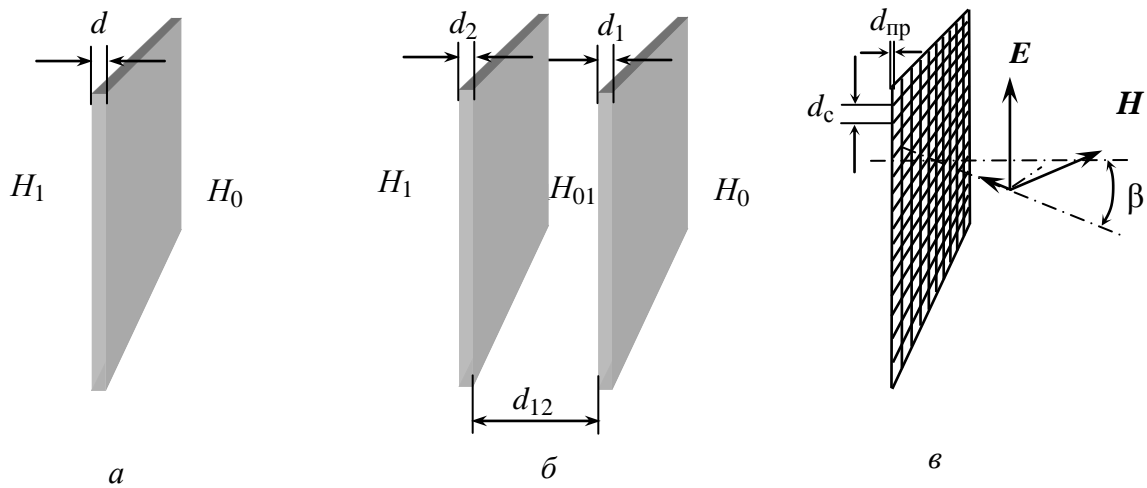


Рис. 5.5. Варианты экранной защиты от ЭМП:  
 а – сплошной одиночный, б – сплошной двойной, в – сетчатый

При больших  $a$  для всех видов экранов, за исключением сверхтонких ( $2d/\Delta \rightarrow 0$ ), справедлива формула

$$\mathcal{E}_{\text{экр}} \approx 0.25a \sqrt{\text{ch} \frac{2d}{\Delta} - \cos \frac{2d}{\Delta}}.$$

При относительно низких частотах получается простая формула:

$$\mathcal{E}_{\text{экр}} \approx \frac{d}{2\rho\sqrt{\epsilon_0}}.$$

Эффективность экранирования двухслойной плоской оболочкой не равна произведению эффективности экранирования двумя однослойными пластинами. В связи с тем, что поток электромагнитной энергии, проникающий через первый слой, переотражается между слоями, сквозь второй слой проникает значительно бóльшая часть потока, чем в том случае, когда после первого отражения поток энергии уже не возвращается к этому слою.

Эффективность экранирования двухслойным экраном (рис. 5.5, б) зависит от толщин пластин, эффективности каждого экрана и при одинаковом размере пластин и расстоянии между пластинами  $d_{12}$  равна

$$\mathcal{E}_{2\text{э}} = \mathcal{E}_{\text{экр}}^2 \left( 1 - q^2 \exp \frac{-j4\pi d_{12}}{\lambda} \right),$$

где  $q = \frac{4k}{(k+1)^2}$  – коэффициент отражения ( $k = \frac{1+j}{\Delta}$  – волновое число).

Толщина металлического листа, обеспечивающего заданное ослабление электромагнитного поля, может быть приближённо определена из выражения

$$d = \frac{K_{\text{экp}}}{15.4 \sqrt{\frac{f \mu \mu_0}{\rho}}}.$$

В практике защиты от высокочастотных ЭМП часто применяются не сплошные экраны, а сетчатые, имеющие некоторые преимущества перед ними. Они являются прозрачными и позволяют наблюдать за процессом или устройством, обладают лучшей теплоотводящей способностью. При падении электромагнитной волны на сетку по её проводам протекает электрический ток, поэтому на эффективность экранирования влияет толщина проволоки или другого материала, из которого они изготовлены, и шага сетки (размеров ячеек или воздушных промежутков). По эффективности экранирования сетчатые экраны уступают сплошным экранам, однако во многих случаях они оказываются достаточными для того, чтобы их успешно применять.

Для приближённых расчётов эффективности можно использовать ранее приведённые формулы для сплошных экранов с эквивалентным удельным сопротивлением или другие формулы, в которых известны параметры сетки.

Коэффициент экранирования сетчатого экрана (рис. 5.5, в) с расстоянием между соседними проволоками  $d_c$  и диаметром проволоки  $d_{\text{пр}}$  может быть определён из следующих выражений:

- при векторе  $\mathbf{E}$  параллельном проволокам сетки одного из направлений

$$K_{\text{экp}} = 10 \lg \frac{4 \left( \frac{d_c \cos \beta}{\lambda} \ln \frac{d_c \cos \beta}{\pi d_{\text{пр}}} \right)^2}{1 + 4 \left( \frac{d_c \cos \beta}{\lambda} \ln \frac{d_c \cos \beta}{\pi d_{\text{пр}}} \right)^2};$$

- при векторе  $\mathbf{E}$  перпендикулярном проволокам сетки одного из направлений, а векторе  $\mathbf{H}$ , остающемся параллельным плоскости сетки:

$$K_{\text{экp}} = 10 \lg \frac{(1 - \cos \beta)^2 + 4 \left( \frac{d_c}{\lambda} \ln \frac{d_c}{\pi d_{\text{пр}}} \right)^2}{1 + 4 \left( \frac{d_c}{\lambda} \ln \frac{d_c}{\pi d_{\text{пр}}} \right)^2}$$

Эти формулы справедливы при следующих условиях:

- отношение шага сетки к длине волны  $d_c / \lambda < 1$ ;
- отношение диаметра проволоки к длине волны  $d_{\text{пр}} / \lambda < 0.08$ ;
- отношение диаметра проволоки к шагу сетки  $d_{\text{пр}} / d_c < 0.2$ ;
- сетка должна находиться в волновой зоне облучения, а длина и ширина плоского экрана должны превышать длину волны более чем в 5 раз;
- угол падения волны должен быть  $\beta \leq 75^\circ$ , так как при больших углах поверхность сетки становится как бы сплошной из-за того, что проволока сетки затеняет просветы, а падающая волна является скользящей и в основном отражается от сетки.

Все возможные источники, которые способны создать значимые с точки зрения ЭМС или биоЭМС внешние электромагнитные поля утечки, как правило, заключают в металлические корпуса, имеющие хорошие экранирующие свойства. Необходимые технологические отверстия для охлаждения, наблюдения и других целей выполняют с помощью сеточных экранов или в виде отрезков стальных труб определённой длины, аналогичных волноводам, в которых также возможно ослаблять ЭМП на основе некоторых закономерностей распространения в них радиоволн.

Другой проблемой, с которой приходится бороться, является проблема переотражения радиоволн от металлических предметов, особенно при наладке радиоэлектронной аппаратуры. В этом случае возникает потребность в использовании специальных радиопоглощающих конструкций и материалов. Как правило, работы по её настройке и испытаниям должны проводиться в специально оборудованном помещении с кирпичными или шлакобетонными стенами с покрытием их известковой или меловой краской, эффективно поглощающими высокочастотные ЭМП. Площадь металлических предметов, отражающих и переотражающих радиоволны, должна быть минимальной.

Снижение мощности излучения в радиотехнике может быть обеспечено с помощью специальных устройств. Оконечные нагрузочные сопротивления,

используемые в качестве эквивалентов согласованных антенн и нагрузок радиоаппаратуры, представляют собой отрезки коаксиальных или волноводных линий, заполненных поглощающими материалами (порошковым железом, графитоцементной смесью, водой). Атенюаторы диапазонов ультравысокой и сверхвысокой частот, позволяющие ослабить мощность излучения до 60...120 дБ, являются отрезками коаксиальных или волноводных линий с помещёнными внутрь них деталями с различными поглощающими покрытиями (поглощающие аттенюаторы) или отрезками круглых волноводов, имеющих диаметр значительно меньший длины волны ЭМП (предельные аттенюаторы).

Средствами защиты от ЭМП, особенно сверхвысокочастотного диапазона, на пути их распространения служат мелкая металлическая сетка, металлизированные ткани, специальные радиозащитные очки и другие поглощающие или отражающие материалы, которые выбираются исходя из частоты, вида ЭМП и необходимого коэффициента экранирования. При необходимости персонала работать в “открытом” электромагнитном поле (снятии диаграммы направленности антенн, определении разрешающей способности и ошибок радиолокационных станций и т. д.) применяются СИЗ, представляющие собой “экраны” из металлизированных материалов. Так, в радиозащитных очках, позволяющих ослабить излучение до 20...30 дБ, используется впрессованная в резиновое обрамление металлическая сетка или наклеенная металлизированная ткань. Комбинезоны, халаты и головные уборы также выполняются из металлизированной ткани.

Коллективные и индивидуальные средства защиты работающих от воздействия ЭМП радиочастотного диапазона в каждом конкретном случае должны применяться с учётом рабочего диапазона частот, характера выполняемых работ, необходимой эффективности защиты.

Источники ЭМП радиочастот или рабочие места должны экранироваться отражающими или поглощающими экранами (стационарными или переносными). *Отражающие* экраны выполняются из металлических листов, сетки, проводящих плёнок, ткани с микропроводом, металлизированных тканей на основе синтетических волокон или любых других материалов, имеющих высокую электропроводность. *Поглощающие* экраны выполняются из специальных материалов, обеспечивающих поглощение энергии ЭМП соответствующей частоты (длины волны).

Индивидуальные средства защиты (защитная одежда) должны изготавливаться из металлизированной (или любой другой ткани с высокой электропроводностью) и иметь санитарно-эпидемиологическое заключение об их пригодности. Защитная одежда включает в себя: комбинезон или полукомбинезон, куртку с капюшоном, халат с капюшоном, жилет, фартук, средство защиты для лица, рукавицы (или перчатки), обувь. Все части защитной одежды должны иметь между собой электрический контакт. Стекла (или сетка), используемые в защитных очках, изготавливаются из любого прозрачного материала, обладающего защитными свойствами. К средствам индивидуальной защиты относятся спецодежда, выполненная из металлизированной ткани (защитные халаты, фартуки, накидки с капюшоном, перчатки), щитки, а также защитные очки (при интенсивности выше  $10 \text{ Вт/м}^2$ ), стёкла которых покрыты слоем полупроводникового оксида олова, или сетчатые очки в виде полумасок из медной либо латунной сетки.

Экранирование источников ЭМП или рабочих мест осуществляется с помощью отражающих либо поглощающих экранов (стационарных или переносных). Эффективность экранирующих устройств определяется электрическими и магнитными свойствами материала экрана, конструкцией экрана, его геометрическими размерами и частотой излучения. Для уменьшения интенсивности ЭМП защитные устройства должны представлять собой электрически и магнитно-замкнутый экран.

В поглощающих экранах используются специальные материалы, обеспечивающие поглощение излучения соответствующей длины волны. В зависимости от излучаемой мощности и взаимного расположения источника и рабочих мест конструктивное решение экрана может быть различным (замкнутая камера, щит, чехол, штора и т. д.).

Средства индивидуальной защиты используются в случаях, когда снижение уровней ЭМП радиочастот с помощью общей защиты технически невозможно. Если защитная одежда изготовлена из материала с использованием металлического провода, она может использоваться только в условиях, исключающих прикосновение к открытым токоведущим частям установок.

При работе внутри экранированных помещений (камер) стены, пол и потолок этих помещений должны быть покрыты радиопоглощающими материалами. В случае направленного излучения допускается применение поглощающих покрытий только на соответствующих участках стен, потолка, пола.

В тех случаях, когда уровни ЭМП на рабочих местах внутри экранированного помещения превышают ПДУ, персонал должен выводиться за пределы камер с организацией дистанционного управления аппаратурой.

### **5.5. Особенности защиты от оптических излучений**

Воздействие видимого и инфракрасного излучений редко бывает опасным. В целом, глаза хорошо адаптированы к самозащите от оптического излучения и физиологически защищены от повреждений, вызываемых такими источниками яркого света, как солнце или лампы сильного накала. Защита осуществляется за счёт зрительной реакции, ограничивающей длительность экспозиции долями секунды ( $\sim 0.25$  с). При значительной интенсивности видимого излучения основной естественной реакцией человека является закрытие или прищуривание глаз, а также изменение диаметра зрачка.

Для снижения воздействия ИК-излучения необходимо принимать меры, включающие в себя правильный инженерный дизайн оптических систем, использование соответствующих защитных очков или лицевых щитков, ограничение доступа в зону такого воздействия только лицами, непосредственно занятыми этой работой, и информирование работников о потенциальных опасностях, связанных с экспозицией сильным источникам видимого и инфракрасного излучений.

Одним из самых распространённых способов борьбы с тепловым излучением является экранирование излучающих поверхностей. Различают экраны трёх типов: непрозрачные, прозрачные и полупрозрачные. Эффективность их установки оценивается долей задержанной энергии в процентах.

К *непрозрачным* экранам относятся металлические (в том числе алюминиевые), альфолевые (алюминиевая фольга), футерованные (пенобетон, пеностекло, керамзит, пемза), асбестовые и др. В *прозрачных* экранах излучение, взаимодействуя с веществом экрана, минует стадию превращения в тепловую энергию и распространяется внутри него по законам геометрической оптики, что и обеспечивает видимость через экран. Это характерно для экранов, выполненных из различных стёкол: силикатного, кварцевого, органического, металлизированного, а также для вододисперсных и плёночных водяных завес (свободных и стекающих по стеклу).

*Полупрозрачные* экраны объединяют в себе свойства прозрачных и непрозрачных экранов. К ним относятся металлические сетки, цепные завесы, экраны из стекла, армированного металлической сеткой, и др.



При использовании искусственных УФ-источников приоритет должен отдаваться, по возможности, таким инженерным мерам, как фильтрация и экранирование. Для уменьшения экспозиции на открытую кожу могут наноситься солнцезащитные экраны (например, кремы). Средства защиты глаз, предназначенные для промышленного использования, включают в себя сварочные маски (обеспечивающие дополнительно защиту как от интенсивного видимого и инфракрасного излучений, так и защиту лица), лицевые щитки, защитные и поглощающие ультрафиолет очки. В целом, средства защиты глаз, применяемые в промышленности, должны плотно прилегать к лицу, обеспечивая, таким образом, отсутствие свободных промежутков, через которые ультрафиолетовое излучение может проникать непосредственно в глаз.

Хотя УФ-А-источники обычно создают небольшой риск, их источники могут либо содержать опасное УФ-В-излучение, либо создавать приводящую к нетрудоспособности проблему ослепления (из-за флуоресценции прозрачного хрусталика глаза). Для защиты от всего ультрафиолетового спектра широко применяются промышленные солнцезащитные очки со стеклянными или с пластиковыми линзами с очень высоким коэффициентом ослабления такого излучения. Если защита должна обеспечиваться от волн длиной до 400 нм, можно использовать легкий желтоватый оттенок.

Почти все материалы для стеклянных и пластиковых линз не пропускают ультрафиолетовое излучение меньше 300 нм и инфракрасное излучение с длиной волны более 3000 нм. Для некоторых лазерных и оптических источников хорошую защиту обеспечивают обычные ударопрочные прозрачные средства защиты глаза (например, прозрачные линзы из поликарбоната эффективно блокируют волны длиной более 3 мкм). Однако абсорбенты типа оксидов металла в стекле или органических красителях в пластике должны добавляться в материалы для изготовления средств защиты от ультрафиолетовых волн длиной 380...400 нм и инфракрасного излучения в диапазоне 780 нм...3 мкм.

### **5.5. Особенности защиты от лазерных излучений**

Защиту от лазерного излучения осуществляют методами и средствами, перечисленными в табл. 5.1.

Технические мероприятия и средства защиты разделяются на коллективные и индивидуальные. *Коллективные* включают в себя:

- средства нормализации внешней среды;

- автоматические системы управления технологическим процессом;
- использование предохранительных устройств, приборов, различных ограждений лазерно-опасной зоны;
- использование телеметрических и телевизионных систем наблюдения.

Таблица 5.1

Средства защиты	Класс опасности лазера				Примечания
	1	2	3	4	
Оградительные устройства (кожухи, экраны и т. д.)	–	–(+)	+	+	Должны снижать уровни опасных и вредных производственных факторов до безопасных значений
Дистанционное управление	–	–	+	+	Применять всюду, где возможно
Устройство сигнализации (ясно воспринимаемый световой или звуковой сигнал)	–	–	+	+	Лазеры видимого диапазона спектра
	–	–(+)	+	+	Для лазеров УФ-диапазона спектра
	–	–	–	+	Для лазеров ИК-диапазона спектра
Маркировка знаком лазерной опасности	–	+	+	+	Лазеры, лазерные установки, зона прохождения луча, граница ЛОЗ
Кодовый замок	–	–	+	+	На дверях помещений, на пульте управления
Защитные очки, снижающие уровень диффузного излучения на роговице глаза до ПДУ	–	+	+	+	При времени воздействия > 0.25 с
	–	–	+	+	Всегда, когда средства коллективной защиты не обеспечивают безопасных условий труда
Защитные запоры оградительного устройства или его частей	–	+	+	+	Необходимы в тех случаях, когда при снятии оградительного устройства или его частей возможно воздействие излучения с уровнями, превышающими ПДУ
Защитная одежда	–	–	–	+	При соответствующей опасности
Юстировочные очки, снижающие уровень коллимированного излучения на роговице глаза до ПДУ	–	+	+	+	Ограниченно – при выполнении юстировки, наладки и ремонтно-профилактических работ

Примечание. Применяются +, не применяются –.

Работы с лазерами следует проводить в отдельных, специально выделенных помещениях или отгороженных частях помещений. Внутренние поверхности помещений, а также находящиеся в них предметы (за исключением специальной аппаратуры) должны иметь матовую поверхность, обеспечи-

вающую максимальное рассеяние излучения. Для окраски внутренних поверхностей помещений целесообразно использовать клеевые краски на основе мела с коэффициентом отражения не более 0.4. Для снижения опасности поражения глаз оператора (для исключения сильного расширения зрачка, через которое излучение может проникнуть в глаз) в помещениях должна быть хорошая освещённость: КЕО должен быть не менее 1.5 %, а общее искусственное освещение должно создавать освещение не менее 150 лк. В помещение или в зону помещения с лазерными установками должен быть ограничен доступ лиц, не имеющих отношения к работе установок.

В технологических процессах должны применяться лазерные установки закрытого типа. Лазеры классов опасности 3 и 4 должны применяться только в установках закрытого типа, в которых зона взаимодействия лазерного излучения с мишенью и луч лазера на всём его протяжении изолированы от работающих специальными системами транспортирования или экранами из материалов, непрозрачных для излучения данной длины волны. Материалы экранов должны быть достаточно огнестойкими и при повышении температуры не выделять вредных веществ.

Лазерная установка должна быть максимально экранирована:

- лазерный луч можно передавать к мишени только по волноводу (световоду) или по ограждённому экранному пространству;
- предметы с твёрдой зеркальной поверхностью (линзы, призмы) на пути луча должны снабжаться блендами;
- для защиты от излучения, отражённого от облучённого объекта, устанавливаются защитные диафрагмы с отверстием, диаметр которого несколько превышает диаметр луча. В этом случае через отверстие проходит только прямое излучение, а отражённое излучение от объекта попадает на экран, который его частично поглощает и рассеивает;
- генератор и лампа накачки должны быть заключены в светонепроницаемую камеру, снабжённую блокировкой, исключающей вспышку лампы при открытом состоянии кожуха;
- устройства для юстировки необходимо оборудовать постоянно смонтированными защитными светофильтрами;
- для основного луча лазера в помещении необходимо выбирать направление в зоны, в которых пребывание людей должно быть исключено.

Для изготовления ограждений (экранов) могут применяться непрозрачные материалы (металлы, гетинакс, текстолит, пластмассы) и прозрачные материалы – “ослабители” (специальные стёкла светофильтров с соответствующей спектральной характеристикой).

В качестве СИЗ применяются специальные противолазерные очки (характеристика стёкол толщиной 3 мм приведена в табл. 5.2), щитки, маски, технологические халаты и перчатки.

Таблица 5.2

Диапазон длин волн излучения, поглощаемого стеклом $\lambda$ , нм	Цвет стекла	Марка стекла
200...350	Жёлтое	ЖС10, ЖС11
200... 450	То же	ЖС17, ЖС18
200...300	Оранжевое	ОС 11, ОС12
200...600	Красное	КС15
500...1200 и более	Сине-зелёное	СЭС22
2700...10600 и более	Бесцветное	БСЗ и др.

Марки оптических стёкол для средств защиты приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Рабочее вещество (тип лазера)	Длина волны $\lambda$ , нм	Марка стёкол							
		ЖС17, ЖС18	ОСП, ОС 12, ОС13, ОЖ	ОС23-1	СКИ	Л17	СЗС 22	СЗС 21	СЗС 25, СЗС 26
Эксимерные лазеры	400	+	+	+	4–	+	–	–	–
Стекло с неодимом	265	+	*4–	+	+	4–	4–	–	–
Азот	337	+	+	+	4–	+	–	–	–
Пары кадмия	410	4–	+	+	+	–	–	–	–
Аргон	480...510	–	+	+	+	–	–	–	–
Стекло с неодимом	530	–	–	+	4–	4–	–	–	–
Пары меди	510...570	–	–		4–	+	–	–	–
Гелий-неон	630	–	–	–	–	4–	+	–	–
Рубин	690	–	–	–	–	+	4–	–	–
Полупроводниковые лазеры	0.84...0.91	–	–	–	–	+	4–	–	–
Стекло с неодимом	1.06	–	–	–	–	4–	+	–	4–

*Примечание.* Применяются +, не применяются –, \*(4–) не применяется для защиты в лазерных установках 4-го класса опасности.

При использовании для защиты светофильтра толщиной  $d$  коэффициент передачи через светофильтр

$$K_{\text{пер}} = e^{-d\delta'} = 10^{-d\delta},$$

где  $\delta'$  и  $\delta = \delta' \cdot \ln 10$  – соответственно, натуральный и десятичный показатели ослабления. В общем случае показатель ослабления светофильтра зависит от толщины и спектра излучения, поэтому при расчёте ослабления пользуются оптической плотностью светофильтра  $D = \lg(1/K_{\text{пер}})$ . Она связана с эффективностью защиты соотношением  $\mathcal{E}_{\text{защ}} = 10 \lg(1/K_{\text{пер}}) = 10D$ . Оптическую плотность  $D$  рассчитывают в зависимости от характеристик излучения.

### 5.6. Контрольные вопросы и задачи

Каковы основные принципы и средства защиты от магнитного поля?

Что происходит при падении ЭМП на хорошо проводящий экран?

В каких единицах измеряется эффективность экранирования ЭМП?

- *Задача.* Определить эффективность экранирования медного сетчатого экрана с шагом сетки 0.01 м, диаметром проволоки 0.001 м от ЭМП частотой 1 МГц, если векторы напряжённостей электрического и магнитного полей параллельны поверхности экрана, а вектор ППЭ направлен перпендикулярно ему.

### 5.7. Выводы

Защита от ЭМП является одной из основных задач, с которыми сталкиваются как разработчики технических систем, так и потребители. Многие системы требуют оптимизации и конструкции, и режимов работы, знания физических принципов распространения ЭМП в окружающем пространстве.

Особое значение в защите от ЭМП имеют средства, позволяющие уменьшить интенсивность составляющих ЭМП на пути их распространения. Защита строится на принципах отражения электромагнитной волны (использованием хорошо проводящих материалов), её поглощения (использованием полупроводящих и диэлектрических материалов на сверхвысоких частотах, в которых происходит переменная поляризация) или компенсации ЭМП (использования токов встречного направления для магнитного поля индуцированных либо самим источником поля, либо другим активным источником).

## 6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМП

### 6.1. Принципы измерения параметров ЭМП

Параметры ЭМП, которые могут быть измерены, приведены ранее. К сожалению, не существует универсального метода и прибора, позволяющих определить всё многообразие параметров. В зависимости от того, какую характеристику поля нужно определить, необходимо использовать тот или иной принцип преобразования этой величины в электрический ток или его изменение, которые могут быть зафиксированы стрелочными или цифровыми приборами.

На рис. 6.1 приведены основные схемы измерений составляющих электромагнитного поля широкого диапазона частот.

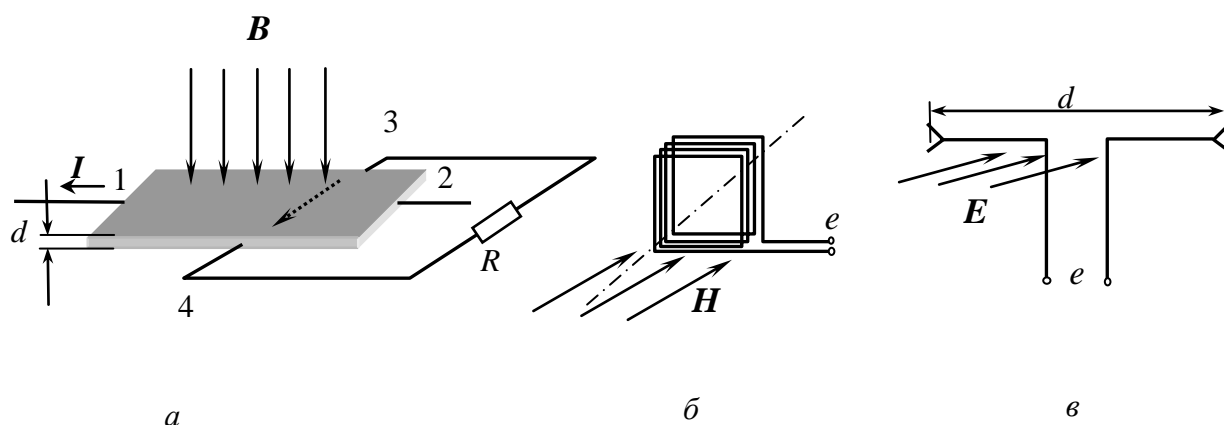


Рис. 6.1. Принципы измерения составляющих ЭМП с использованием:  
*a* – датчика Холла, *б* – измерительной катушки, *в* – антенны-диполя

Значение индукции постоянного магнитного поля достаточно сложно оценить в связи с тем, что оно не наводит в контурах электродвижущую силу, как, например переменное МП. В связи с этим принцип измерения основан на *эффекте Холла* – отклонении под действием магнитного поля движущихся электронов в пластине из соответствующего полупроводникового материала (датчике Холла), через которую протекает электрический ток. Если поместить перпендикулярно магнитному полю тонкую пластинку из полупроводника, длина которой значительно превышает ширину (рис. 6.1, *a*), и пропустить через неё в продольном направлении ток, то между точками 3 и

4, расположенными посередине длинных сторон пластинки, возникнет напряжение, которое зависит от постоянной Холла  $K_X$ , силы тока, индукции магнитного поля и толщины пластины  $d$ :

$$U = \frac{K_X BI}{d}.$$

В последнее время в качестве датчиков для магнитных полей предлагаются другие полупроводниковые приборы, а именно, биполярные и FET-транзисторы. Они предлагают некоторые преимущества по сравнению с зондом Холла: более высокую чувствительность, большее пространственное разрешение и более широкую частотную реакцию.

Основой техники проведения очень точных измерений с использованием ядерного магнитного резонанса является определение резонансной частоты тестового образца в магнитном поле, которое должно быть измерено. Измерительный диапазон этого метода колеблется от 10 мТл до 10 Тл без определённых ограничений. При измерениях поля методом протонного магнитного резонанса точность  $10^{-4}$  легко достигается при помощи простого аппарата, а точность  $10^{-6}$  может быть достигнута при некотором усовершенствовании оборудования. Недостатками данного метода являются его ограниченность полем с малым градиентом и неполная информация о направлении поля.

Принцип действия измерителя электростатического поля заключается в измерении напряжения, создаваемого им на измерительном конденсаторе, включённом в цепь “источник электростатического поля (к примеру, экран телевизора или монитора) – измерительная антенна (металлический диск) – измерительный конденсатор”.

Измерительная пластина изготовлена из металла и имеет достаточно большую площадь поверхности для того, чтобы в пространстве между измерителем и источником поля возникло относительно равномерное электростатическое поле. Напряжённость зависит от эквивалентного статического потенциала поверхности источника поля и расстояния от экрана до измерительной пластины  $d$ :

$$E_э = \frac{\Phi_э}{d} K_э.$$

Коэффициент  $K_э \leq 1$  зависит от размеров измеряемой поверхности.

Переменное магнитное поле способно наводить на концах витка (рамки) или многовитковой катушки (рис. 6.1, б) электродвижущую силу (напря-

жение), которое можно измерить обычным вольтметром. Зная ЭДС  $e$ , число витков  $n_k$ , площадь поперечного сечения  $S_{cp}$ , по которому проходит магнитный поток, круговую частоту источника ЭМП и абсолютную магнитную проницаемость, можно легко вычислить составляющую вектора напряжённости магнитного поля, параллельного оси катушки

$$H = \frac{e}{\omega \mu_0 n_k S_{cp}}.$$

При повороте катушки будет меняться и напряжённость магнитного поля. Результирующая величина должна определяться по трём координатам:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

Принцип измерения напряжённости переменного электрического поля отличается от ранее рассмотренного для измерения переменного магнитного поля. Электрическое поле создаёт ЭДС не в витке, а в антенне-диполе (рис. 6.1, в). Напряжённость зависит от ЭДС или напряжения и длины измерительной антенны  $d$ :

$$E_z = \frac{U}{d} K_{эп}.$$

Коэффициент пропорциональности определяется для каждого конкретного случая.

Датчиком плотности потока мощности также является измерительная антенна, подсоединяемая к аттенюатору, служащему для ослабления мощности с целью увеличения пределов измерения, и к термисторной головке, в которой электромагнитная мощность выделяется и поглощается. Наиболее известными являются рупорные и логарифмические антенны.

## 6.2. Приборы для измерения параметров ЭМП

Имеется большое разнообразие типов и названий электроизмерительных приборов, позволяющих определять среднеквадратичные параметры ЭМП. Производители таких приборов иногда называют их не совсем правильно, поэтому существует некоторая путаница при выборе, какой же тип выбрать, чтобы измерить ту или иную составляющую электромагнитного поля. На взгляд авторов пособия правильнее было бы называть их по тому названию составляющей ЭМП, которая измеряется или контролируется: прибор для измерения индукции (напряжённости) магнитного поля, напряжённости электрического поля, плотности потока мощности и т. д.



Приборы для измерения энергетических параметров электромагнитных полей включают следующие основные элементы: малогабаритную широкополосную антенну; детектор, рассчитанный на работу в большом диапазоне интенсивностей сигналов; усилитель постоянного тока и регистратор. Антенны могут быть изотропными или направленными. Ненаправленные датчики менее удобны из-за того, что необходимо либо находить положение, при котором прибор показывает максимальное значение, либо определять результирующую величину по трём координатам.

На рис. 6.2 показан общий вид некоторых приборов для измерения параметров магнитного поля.

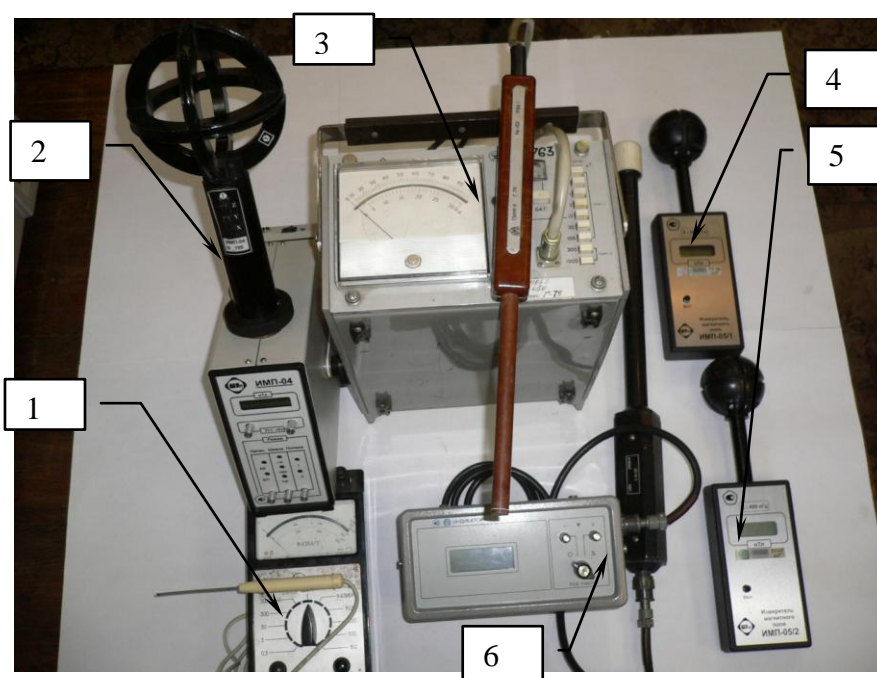


Рис. 6.2. Некоторые приборы для измерения индукции и напряжённости постоянного и переменного магнитного полей

Постоянное магнитное поле может быть измерено, в частности, тесла-амперметром типа Ф4354/1 (1), в котором используется датчик Холла. Параметры магнитного поля, создаваемого на рабочих местах пользователей ЭВМ, могут быть замерены с помощью приборов, названных измерителями магнитного поля, к примеру ИМП-04 (2) с двумя сменными датчиками-антеннами, позволяющими измерять три координатные составляющие индукции, или ИМП-05/1 (4) и ИМП-05/2 (5) со своими датчиками на частотные диапазоны 5...2000 Гц и 2...400 кГц, позволяющими сразу измерить

полную индукцию МП. Микротесламетр Г-79 (3) позволяет измерять индукцию переменного магнитного поля от 20 Гц до 20 кГц, а измеритель напряжённости поля ПЗ-21 (6) – напряжённость магнитного поля в децибелах любого источника МП частотой от 30 кГц до 30 МГц.

На рис. 6.3 показаны общий вид некоторых приборов для измерения параметров электрического поля и прибор для измерения ППЭ.



Рис. 6.3. Вид некоторых приборов для измерения параметров электрического поля и плотности потока мощности (энергии) высокочастотного ЭМП

Прибор для измерения напряжённости электрического поля для ПЭВМ, или измеритель электрического поля ИЭП-05 с дипольной антенной (1) измеряет ЭП в двух частотных диапазонах, так же, как и ИМП-05. Измеритель напряжённости электростатического поля ИЭСП-01 (2) также используется для ПЭВМ. Измеритель напряжённости поля ПЗ-21, указанный ранее, позволяет измерять напряжённость не только магнитного поля, но и электрического поля до частот 300 МГц (при этом изменяется только датчик (3), индикатор же остаётся тем же самым).

Аналогичный индикатор с другим датчиком (4) используется для измерения ППЭ в частотном диапазоне 300 МГц...39 ГГц (прибор типа ПЗ-19 А). Для определения ППЭ допускается также использование средств измерения, предназначенных для определения среднеквадратичного значения напряжённости электрического поля с последующим пересчётом их в ППЭ (ППМ).

### 6.3. Контрольные вопросы

Каков принцип работы датчика при измерении индукции постоянного магнитного поля?

Каков принцип работы датчика при измерении напряжённости переменного магнитного поля?

В чём отличия измерения напряжённости электрического поля и напряжённости электростатического поля?

### 6.4. Выводы

Имеется большое число средств измерения параметров ЭМП и видов электроизмерительных приборов, принципы работы датчиков которых основаны на известных в физике и электротехнике эффектах и законах (эффекте Холла, явлении электромагнитной индукции и других), хотя разрабатываются и более точные и совершенные средства измерения. Выбор типа прибора зависит от вида электромагнитного поля и его параметров (частоты, интенсивности и т. д.).

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Каков механизм воздействия ЭМП на человека?

2. Начиная с какой граничной частоты воздействие электромагнитного излучения на человека нормируется в России по показателю “плотность потока энергии” (ППЭ)?

3. В какой зоне распространения электромагнитной волны, источником которой является сотовый телефон на 900 МГц, может оказаться при разговоре пользователь этого телефона (при условии, что он не пользуется беспроводной гарнитурой)?

4. Сколько времени может разговаривать рабочий от приёмно-передающей радиостанции типа “Motorola P040” ( $f = 154$  МГц,  $P = 5$  Вт), которую он носит в нагрудном кармане и постоянно использует, если экспериментально определённые напряжённости ЭП соответствуют табличным (см. ниже).

$E$ , В/м	72	36	22.5	14.5
Расстояние от антенны, м	0.1	0.2	0.3	0.6

5. Сколько времени человек может находиться под воздействием электромагнитного поля СВЧ-диапазона (например, 2.45 ГГц), работая в производственных условиях, если плотность потока энергии (ППЭ) в месте воздействия составляет  $1000 \text{ мкВт/см}^2$ , или  $10 \text{ Вт/м}^2$ ?

6. Сколько времени человек может находиться под воздействием электромагнитного поля СВЧ-диапазона (например, 2.45 ГГц), в домашних условиях, если плотность потока энергии (ППЭ) в месте воздействия составляет  $1000 \text{ мкВт/см}^2$  ( $10 \text{ Вт/м}^2$ )?

7. В чём нормируются переменные электромагнитные поля при анализе безопасности?

8. Что такое тепловой порог электромагнитного поля, и каким значениям составляющих он соответствует?

9. Какие эффекты электромагнитного поля существуют?

10. Какие проявления эффектов электромагнитного поля выявлены?

11. Какими приборами измеряется магнитное поле?

12. Какими приборами измеряется электрическое поле?

13. Каков механизм отражения электромагнитных полей экранами?

14. Каков механизм поглощения электромагнитных полей диэлектрическими экранами?

15. Вы работаете в производственных условиях с источником ЭМП частотой 900...1800 МГц с ППЭ =  $15 \text{ Вт/м}^2$ . Сколько времени, исходя из требований норм, вы можете с ним работать?

16. Что более вредно – электромагнитные поля СВЧ-диапазона (например, 2.45 ГГц от микроволновой печи), или инфракрасные лучи, используемые для обогрева помещений с помощью электрокамина либо электронагревателя?

17. Отличаются ли нормы на электромагнитные поля от ПЭВМ от норм на бытовые СВЧ-устройства?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотренные в учебном пособии вопросы электромагнитной безопасности касаются любого человека, и знать основные характеристики ЭМП, источников, механизмов воздействия и средств защиты необходимо каждому. Разрабатывается новая техника, совершенствуются технологии, приводя к тому, что электромагнитная среда, окружающая человека, всё более ухудшается, что требует принципиально новых подходов к её защите.

Скорее всего, с накоплением статистических данных о причинах болезней людей будет происходить ужесточение как гигиенического нормирования параметров ЭМП, так и технического нормирования для систем, являю-

щихся источниками электромагнитного поля. Можно ожидать, что в связи с этим может улучшиться электромагнитная обстановка на рабочих местах и в других зонах обитания человека.

Авторы пособия надеются, что полученные в результате изучения проблемных вопросов влияния электромагнитных полей на человека знания способны дать импульс для новых открытий в части обеспечения личной электромагнитной безопасности, а также безопасности окружающих людей.

### **Список рекомендуемой литературы**

Аполлонский С. М. Справочник по расчёту электромагнитных экранов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1988. – 224 с.

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы: Учеб. для вузов. – 7-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1985. – 304 с.

Григорьев Ю. Г.. Электромагнитные поля сотовых телефонов и здоровье детей и подростков (Ситуация, требующая принятия неотложных мер) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2005. Т. 45, № 4. С. 442 – 450.

Захаров С. Г., Каверзнева Т. Т. Влияние электромагнитного излучения на жизнедеятельность человека и способы защиты от него: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1992. – 74 с.

Защита от действия электромагнитных полей и электрического тока в промышленности: Тр. лаб. электробезопасности ЛИОТ. – Л.: 1958.

Краев А. П. Основы геоэлектрики. – Л.: Недра, Ленинградское отд-е, 1965. – 587 с.

Крылов В. А., Юченкова Т. В. Защита от электромагнитных излучений. – М.: Сов. радио, 1972. – 216 с.

Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1988. – 280 с.

Нетушил А. В., Жуховицкий Б. Я., Кудин В. Н., Парини, Е. П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 245 с.

Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

Овчинников И. К. Теория поля. – М.: Недра, 1971. – 312 с.

Определение плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц – 30 ГГц: Метод. указ. МУК 4.3.043–96. – Введ. 02.11.95. – М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1995. – 16 с.

Павлов А. Н. Воздействие электромагнитных полей на жизнедеятельность: Учеб. пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2002. – 224 с.

Рахманов Б. Н., Чистов Е. Д. Безопасность при эксплуатации лазерных установок. – М.: Машиностроение, 1981. – 112 с.

Средства защиты в машиностроении: Расчёт и проектирование: Справочник / С. В. Белов, А. Ф. Козьяков, О. Ф. Партолин и др.; Под ред. С. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

Терлецкий Н. А. О пользе и вреде излучения для жизни (воздействие слабых высокочастотных электромагнитных полей на живые организмы в очерках о механизмах и возможных последствиях). – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 68 с.

Фрактальный подход к регистрации слабого влияния низкочастотных электромагнитных полей на развитие мхов. // Н. В. Коровкин, С. В. Кочетов, Е. Е. Селина и др. // Тр. IV Междунар. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. ЭМС-2001. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2001. – С. 257–261.

Электротехника. Терминология: Справ. пособие. Вып. 3. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 343 с.

Энциклопедия МОТ. Женева. Бюро международной организации труда, сайт МОТ [www.ilo.ru](http://www.ilo.ru), 2003.

Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). ICNIRP Guidelines. Health Physics, April 1998, Vol. 74, Number 4:494-522.

ГОСТ 12.1.006–84\*. ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – Введ. 01.01.1986, с изм. №1. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.

ГОСТ 12.1.040-83. ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения. – Введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 8 с.

ГОСТ Р 50723–94. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – Введ. 01.01.1996. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 37 с.

ГОСТ 12.1.031-81. ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения. – Введ. 01.01.1982. С изм. № 1. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 27 с.

СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Минздрав России, 2003. – 17 с.

СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Минздрав России, 2003. – 11 с.

СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Минздрав России, 2003. – 10 с.

СанПиН 2.1.8/2.2.4.1329-03. Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: ИИЦ Минздрава России, 2003. – 13 с.

СН № 5804–91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров. – М., 1991. – 94 с.

## Оглавление

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.....	7
1.1. Виды и основные параметры ЭМП .....	7
1.2. Частоты и длины волн электромагнитных излучений .....	12
1.3. Взаимодействие ЭМП с физическим веществом .....	12
1.4. Контрольные вопросы .....	17
1.5. Выводы.....	17
2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭМП НА ЧЕЛОВЕКА .....	18
2.1. Характеристики тела человека как физического объекта .....	18
2.2. Механизмы воздействия ЭМП на живой объект .....	20
2.3. Виды и последствия воздействия ЭМП на человека .....	22
2.4. Особенности воздействия на человека оптических излучений .....	32
2.5. Воздействие на человека лазерного излучения.....	35
2.6. Контрольные вопросы .....	38
2.7. Выводы.....	39
3. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	39
3.1. Принципы нормирования ЭМП .....	39
3.2. Состояние нормирования ЭМП .....	42
3.3. Контрольные вопросы и задачи .....	50
3.4. Выводы.....	50
4. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.....	50
4.1. Классификация источников электромагнитных полей .....	50
4.2. Характеристика естественных источников ЭМП .....	54
4.3. Характеристика искусственных источников ЭМП.....	57
4.3.1. Источники статических электрических и магнитных полей .....	57
4.3.2. Источники переменных электрических и магнитных полей низкой и промышленной частот.....	59
4.3.3. Источники ЭМП средней и высокой частот.....	66
4.4. Электромагнитные поля оптического диапазона.....	78
4.5. Человек как источник электромагнитных полей .....	87
4.6. Контрольные вопросы и задачи .....	89
4.7. Выводы.....	90
5. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....	90
5.1. Основные принципы защиты от ЭМП .....	90
5.2. Особенности защиты от магнитного поля .....	93
5.3. Защита от электрического поля .....	97
5.4. Защита от высокочастотного электромагнитного поля.....	97
5.5. Особенности защиты от оптических излучений .....	104
5.5. Особенности защиты от лазерных излучений.....	105
5.6. Контрольные вопросы и задачи .....	109
5.7. Выводы.....	109
6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭМП.....	110
6.1. Принципы измерения параметров ЭМП .....	110
6.2. Приборы для измерения параметров ЭМП.....	112
6.3. Контрольные вопросы .....	115
6.4. Выводы.....	115

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ .....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
Список рекомендуемой литературы .....	117

Буканин Владимир Анатольевич, Ковбасин Алексей Александрович,  
Павлов Владимир Николаевич, Трусов Александр Олегович

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

### Учебное пособие

Редактор И. Б. Синишева

---

Подписано в печать 18.10.2006. Формат 60х84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Гарнитура “Times New Roman.” Печ. л. 7.5. Тираж 740 экз. Заказ 132.

---

Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”  
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5