

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра медицинской и биологической физики

В. А. БАННЫЙ

**ОЦЕНКА УРОВНЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА
И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ
ОТ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие
для студентов 1 курса всех факультетов
медицинских вузов**

**Гомель
ГомГМУ
2015**

УДК 537.87:538.868:620.22(072)

ББК 22.3+30.3я73

Б 23

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры физики Гомельского государственного
технического университета им. П. О. Сухого

И. И. Злотников;

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики,
заместитель декана физического факультета

Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины

А. Л. Самофалов

Банний, В. А.

Б 23 Оценка уровня электромагнитного фона и способы защиты от СВЧ-излучения: учеб.-метод. пособие для студентов 1 курса всех факультетов медицинских вузов / В. А. Банний. — Гомель: ГомГМУ, 2015. — 64 с.
ISBN 978-985-506-702-4

В учебно-методическом пособии представлены сведения о физических характеристиках электромагнитных полей и излучений и их источниках. Рассмотрены механизмы биологического действия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона и предельно допустимые уровни воздействия на человека. Описаны организационные и инженерно-технические мероприятия и средства защиты от электромагнитных излучений. Показано, что радиопоглощающие материалы и электромагнитные экраны являются эффективным средством решения проблем электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности. Пособие содержит цикл лабораторных работ, разработанных в рамках данной тематики, и задачи с решениями.

Предназначено для студентов 1 курса всех факультетов медицинских вузов.

Утверждено и рекомендовано к изданию научно-методическим советом учреждения образования «Гомельский государственный медицинский университет» 29 декабря 2014 г., протокол № 8.

УДК 537.87:538.868:620.22(072)

ББК 22.3+30.3я73

ISBN 978-985-506-702-4

© Учреждение образования
«Гомельский государственный
медицинский университет», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Список условных обозначений</i>	5
<i>Введение</i>	6
<i>Глава 1. Электромагнитные поля и излучения</i>	7
1.1. Электромагнитное излучение	8
1.2. Электромагнитные волны	8
1.3. Электромагнитное поле	11
1.4. Физические характеристики электромагнитного излучения и единицы измерения	12
<i>Глава 2. Источники электромагнитного излучения</i>	13
2.1. Микроволны в медицине	14
2.2. Микроволновые печи.....	15
2.3. Сотовая связь	15
2.4. Теле- и радиостанции.....	16
2.5. Персональный компьютер.....	16
2.6. Радары.....	17
2.7. Системы спутниковой связи	18
<i>Глава 3. Воздействие электромагнитного излучения на биологические объекты</i>	20
3.1. Механизм биологического действия электромагнитного излучения	20
3.2. Предельно допустимые уровни воздействия сверхвысокочастотной излучения на персонал	22
3.3. Последствия влияния электромагнитного излучения на организм человека	23
3.4. Последствия интенсивных сверхвысоких частот облучений человека.....	24
3.5. Клинико-физиологические последствия хронического влияния на организм человека электромагнитного излучения малой интенсивности	25
<i>Глава 4. Лечебно-профилактические мероприятия по защите от электромагнитного излучения</i>	29
4.1. Диагностика и классификация	29
4.2. Профилактика и лечение	32

Глава 5. Организационные и инженерно-технические методы и средства защиты от электромагнитного излучения.....	34
5.1. Организационные мероприятия защиты от электромагнитного излучения.....	34
5.2. Инженерно-технические методы и средства защиты от электромагнитного излучения.....	34
5.3. Радиопоглощающие материалы и радиопоглощающие покрытия	36
5.4. Электромагнитные экраны	38
5.5. Физические механизмы взаимодействия сверхвысоких частот-излучения с радиопоглощающим материалом и электромагнитным экраном	39
5.6. Параметры и методы оценки функциональных свойств радиопоглощающим материалом и электромагнитным экраном	41
Физический практикум	42
1. Лабораторная работа «Оценка уровня электромагнитного фона»	42
2. Лабораторная работа «Определение мощности источника сверхвысокочастотного излучения по измеренным значениям давления пара жидкости»	45
3. Лабораторная работа «Измерение радиофизических характеристик материалов в сверхвысокочастотном диапазоне»	47
4. Лабораторная работа «Оценка эффективности электромагнитных экранов в сверхвысокочастотном диапазоне»	55
Задачи и решения	58
Литература	61

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭМИ	— электромагнитное излучение
ЭМВ	— электромагнитная волна
ЭМП	— электромагнитное поле
СВЧ	— сверхвысокачастотный (диапазон, излучение)
РЧ	— радиочастота
МЭК	— Международный электротехнический комитет
ППЭ	— плотность потока энергии
УПМ	— удельная поглощенная мощность
ПДУ	— предельно допустимый уровень
ЭЭ	— энергетическая экспозиция
РЛС	— радиолокационная станция
БС	— базовые станции
МРТ	— мобильные радиотелефоны
ПРЦ	— передающие радиоцентры
АФС	— антенно-фидерные системы
РТЩ	— радиотехнические передающие центры
РПМ	— радиопоглощающий материал
РПП	— радиопоглощающее покрытие
ЭМЭ	— электромагнитный экран
Э _{ЭКР}	— эффективность экранирования
КСВ _н	— коэффициент стоячей волны по напряжению
ССБТ	— система стандартов безопасности труда
СанПиН	— санитарные правила и нормы
ЦНС	— центральная нервная система
АД	— артериальное давление
СОЭ	— скорость оседания эритроцитов

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс вызвал бурное развитие радиоэлектроники и техники. Созданы системы сотовой и спутниковой связи, навигация, радиолокация, радиоастрономия, различные бытовые приборы, медицинская аппаратура и т. п. В большинстве этих технических систем используется электромагнитное излучение (ЭМИ) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона различной интенсивности, охватывающее диапазон частот от 3 до 30 ГГц (по радиотехнической шкале). ЭМИ используются также в вооруженных силах.

Антропогенная деятельность человека привела к значительному росту уровня электромагнитного загрязнения: к естественному фоновому ЭМИ добавились новые источники. Воздействие ЭМИ на организм человека может быть различным и определяется мощностью ЭМИ. До настоящего времени не полностью изучено влияние СВЧ-излучения нетепловой интенсивности на биологические объекты. В мировой литературе накоплены многочисленные данные о возможном неблагоприятном влиянии ЭМИ радиочастотного диапазона на живой организм. Эти излучения являются мощным физическим раздражителем, который может привести к развитию функциональных и органических нарушений со стороны нервной, эндокринной, сердечно-сосудистой, иммунной, кроветворной и других систем организма. ЭМИ могут усугублять уже имеющиеся хронические заболевания или служить фактором, способствующим возникновению заболеваний другой этиологии. Даже слабые ЭМИ способны вызывать такие болезни как: болезни Паркинсона и Альцгеймера, амнезия, раковые заболевания, заболевания центральной нервной системы, иммунной и эндокринной систем, опухоль мозга, ухудшение зрения, импотенцию и повысить склонность к самоубийству. Особенно опасны ЭМИ для детей и беременных женщин, а главная сложность проблемы заключается в том, что воздействие оказывается не только на сегодняшних людей, но и на здоровье и интеллект будущих поколений.

При высокой мощности проявляется тепловое воздействие ЭМИ СВЧ-диапазона, которое может приводить к летальному исходу. Следует отметить, что мы живем в эпоху терроризма, когда электромагнитным импульсом можно вывести из строя любую электронную систему управления, в том числе систему управления атомной электростанции. Радиопоглощающие материалы (РПМ) и электромагнитные экраны (ЭМЭ) на их основе являются эффективным средством защиты биологических объектов от негативного влияния СВЧ-излучения, защиты стратегических объектов, а также позволяют обеспечить всевозрастающие требования электромагнитной экологии. Также РПМ относятся к материалам двойного назначения и могут применяться в военной сфере для маски-

ровки объектов от радиолокационного обнаружения и распознавания. Существует широкая номенклатура РПМ, изготовленных по различным технологиям и на основе разнообразных связующих и типов функционального наполнителя. Для каждой конкретной задачи выбирается РПМ с требуемыми характеристиками: радиофизическими, физико-механическими, эксплуатационными.

Таким образом, для правильной организации деятельности по снижению воздействия ЭМИ на биологические объекты и получения достоверной информации о существующей ситуации необходимо проводить измерения уровня электромагнитного фона. Применение современных РПМ и ЭМЭ, помимо проводимых профилактических и организационно-технических мероприятий, позволит снизить до приемлемого уровня электромагнитное воздействие на объекты и обеспечить требования электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучение — процесс испускания волн или частиц источниками в окружающую среду. Излучение подразделяют на три основных вида: электромагнитное, радиоактивное и звуковое (звук). Основы классической электромагнитной теории излучения заложены в середине XIX в. английскими физиками М. Фарадеем и Дж. Максвеллом. Классическая теория (электродинамика) объяснила многие закономерности процессов излучения, но не могла удовлетворительно описать тепловое излучение, спектры атомов и молекул. Эти и ряд других проблем удалось решить в рамках квантовой теории излучения, основоположником которой считают немецкого физика М. Планка. Он впервые показал (1902 г.), что атомные системы испускают электромагнитные волны (ЭМВ) не непрерывно, а порциями (квантами). Теоретические основы квантовой теории излучения заложили немецкий физик А. Эйнштейн, датский физик Н. Бор и французский физик Л. де Бройль.

ЭМИ занимают одно из ведущих мест по своей значимости среди других факторов окружающей среды. Общий электромагнитный фон состоит из источников естественного (электрические и магнитные поля Земли, космических тел, радиоизлучения Солнца) и искусственного (антропогенного) происхождения (телевизионные и радиостанции, линии электропередач, электробытовая техника, медицинская аппаратура и другие) излучений. Уровень естественного электромагнитного фона в некоторых случаях бывает на несколько порядков ниже уровней ЭМИ, создаваемых антропогенными источниками. ЭМИ космического, околоземного и биосферного пространств играют важную роль в организации жизненных процессов на Земле.

1.1. Электромагнитное излучение

ЭМИ представляет собой взаимосвязанные колебания электрического E и магнитного H полей, составляющих единое электромагнитное поле (ЭМП). Распространение электромагнитных колебаний происходит в виде ЭМВ. В вакууме электромагнитные колебания распространяются со скоростью света $c = 3 \times 10^8$ м/с. Теория Максвелла позволила установить, что радиоволны, свет, рентгеновское и гамма-излучение представляют собой ЭМВ с различной длиной волны λ . Совокупность ЭМВ условно разделена на диапазоны так, что между соседними диапазонами нет резких границ (таблица 1).

В области классификации частот ЭМИ следует отметить строго ограниченный диапазон — от 0 Гц (статические поля) до 300 ГГц. На сегодняшний день находят применение три шкалы частот:

- *радиотехническая*, изложенная в Регламенте радиосвязи;
- *медицинская*, приведенная в документах Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ);
- *электротехническая*, предложенная МЭК, которая является наиболее распространенной.

По электротехнической шкале классификация ЭМИ выглядит следующим образом:

- низкочастотные (НЧ) — от 0 до 60 Гц;
- среднечастотные (СЧ) — от 60 Гц до 10 кГц;
- высокочастотные (ВЧ) — от 10 кГц до 300 МГц;
- СВЧ — от 300 МГц до 300 ГГц (по радиотехнической шкале под СВЧ-диапазоном понимают полосу частот от 3 до 30 ГГц).

По энергетическому спектру ЭМИ разделяется на следующие группы, первоначально разделенные в теории электромагнитной совместимости: синусоидальные (монохроматические); модулированные; импульсные; флуктуационные (шумовые).

1.2. Электромагнитные волны

Согласно представлениям классической электродинамики, ЭМВ возбуждаются электрическими зарядами, движущимися с ускорением. Механизм возбуждения и законы распространения ЭМВ описывают уравнения Максвелла — фундаментальные уравнения электродинамики. Если в какой-то области пространства существуют электрические заряды и токи, то их изменение со временем приводит к излучению ЭМВ. Простейшей излучающей системой является электрический диполь, электрический момент которого изменяется с течением времени. Такой «колеблющийся» диполь называют осциллятором. Осцилляторами широко пользуются в физике для моделирования и расчета полей излучения.

ЭМВ представляют собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды (рисунок 1).

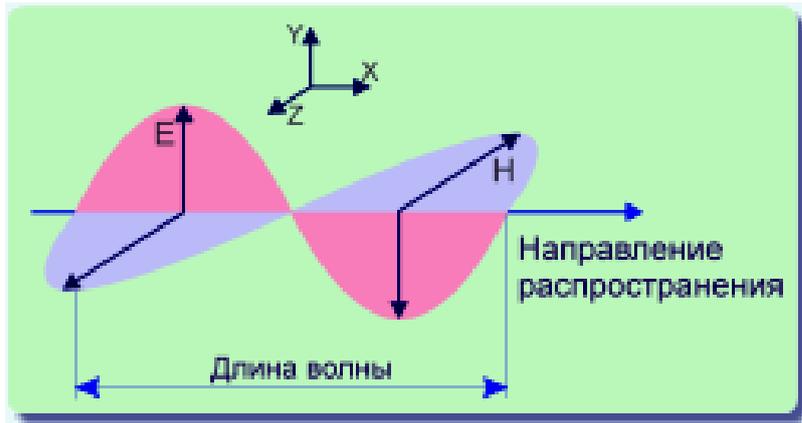


Рисунок 1 — Распространение электромагнитных волн в пространстве

Существование ЭМВ предсказано М. Фарадеем в 1832 г., а Дж. Максвелл, в 1865 г. теоретически показал, что электромагнитные колебания не остаются локализованными в пространстве, а распространяются во все стороны от источника. Теория Дж. Максвелла позволила единым образом подойти к описанию радиоволн, оптического излучения, рентгеновского излучения, гамма-излучения. Оказалось, что все эти виды излучения — ЭМВ с различной длиной волны λ , т. е. родственны по своей природе. Каждое из них имеет свое определенное место в единой шкале ЭМВ (рисунок 1).

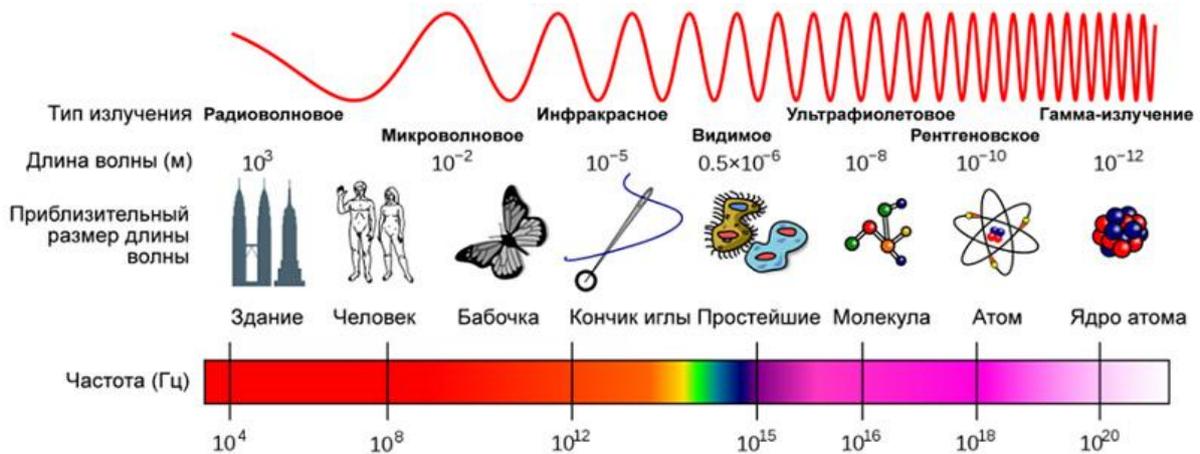


Рисунок 2 — Шкала электромагнитных волн

Распространяясь в средах, ЭМВ, как и всякие другие волны, могут испытывать преломление и отражение на границе раздела сред, дисперсию, поглощение, интерференцию; при распространении в неоднородных средах наблюдаются дифракция волн, рассеяние волн и другие явления.

ЭМВ различных диапазонов длин волн характеризуются различными способами возбуждения и регистрации, по-разному взаимодействуют с веществом. Процессы излучения и поглощения ЭМВ от самых длинных до инфракрасного излучения достаточно полно описываются соотношениями классической электродинамики. В диапазонах более коротких длин волн, в особенности в диапазонах рентгеновских и γ -лучей, доминируют процессы, имеющие

квантовую природу, и могут быть описаны только в рамках квантовой электродинамики на основе представления о дискретности этих процессов.

Основными параметрами ЭМИ являются длина волны (λ) и частота (ν), которая связана с длиной волны обратной зависимостью:

$$\nu = c / \lambda,$$

где c — скорость света.

Частоты колебаний ЭМИ измеряются в герцах (Гц): 1 килогерц (кГц) = 10^3 Гц, 1 мегагерц (МГц) = 10^6 Гц, 1 гигагерц (ГГц) = 10^9 Гц. На практике при оценке электромагнитной обстановки очень часто приходится учитывать отдельно или частоту колебаний, или длину волны. Классификация ЭМИ (диапазоны радиоволн) приведена в таблице 1.

ЭМВ широко используются в радиосвязи, радиолокации, телевидении, медицине, биологии, физике, астрономии и др. областях науки и техники.

Таблица 1 — Диапазоны радиоволн

Частота	Наименование частот		Длина волны в вакууме	Наименование волн	
	международное	принятое в гигиенической практике		международное	принятое в гигиенической практике
3 Гц и менее	Нет	ИЗ (инфразвуковые)	10 ⁸ м и более	Нет	Нет
3–30 Гц	КНЧ (крайне низкие)			Декамега-метровые	Нет
30–300 Гц	СНЧ (сверхнизкие)	ЗЧ (звуковые)	10–1 Мм	Мегамет-ровые	Нет
0,3–3 кГц	ИНЧ (инфранизкие)		1000–100 км	Гектокило-метровые	Нет
3–30 кГц	ОНЧ (очень низкие)		100–10 км	Декакило-метровые	Нет
30–300 кГц	НЧ (низкие)		10–1 км	Километ-ровые	ДВ (длинные)
300–3000 кГц	СЧ (средние)	ВЧ (высокие)	1000–100 м	Гектомет-ровые	СВ (средние)
3–30 МГц	ВЧ (высокие)		100–10 м	Декамет-ровые	КВ (короткие)
30–300 МГц	ОВЧ (очень высокие)	УВЧ (ультра-высокие)	10–1 м	Метровые	УКВ (ультра-короткие)
300–3000 МГц	УВЧ (ультра-высокие)	СВЧ	10–1 дм	Децимет-ровые	МКВ (микро-волны)
3–30 ГГц	СВЧ		10–1 см	Сантимет-ровые	
30–300 ГГц	КВЧ (крайне-высокие)		10–1 мм	Миллимет-ровые	
300–3000 ГГц	Гипервысокие		1–0,1 мм	Децимилли-метровые	

1.3. Электромагнитное поле

ЭМП — это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. ЭМП представляет собой взаимосвязанные переменные электрическое поле и магнитное поле. Взаимная связь электрического E и магнитного H полей заключается в том, что всякое изменение одного из них приводит к появлению другого: переменное электрическое поле, порождаемое ускоренно движущимися зарядами (источником), возбуждает в смежных областях пространства переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, возбуждает в прилегающих к нему областях пространства переменное электрическое поле и т. д. Таким образом, ЭМП распространяется от точки к точке пространства в виде ЭМВ, бегущих от источника. Благодаря конечности скорости распространения ЭМП может существовать автономно от породившего его источника и не исчезает с устранением источника (например, радиоволны не исчезают с прекращением тока в излучившей их антенне).

ЭМП в вакууме описывается напряженностью электрического поля E и магнитной индукцией B . ЭМП в среде характеризуется дополнительно двумя вспомогательными величинами: напряженностью магнитного поля H и электрической индукцией D . Связь компонентов ЭМП с зарядами и токами описывается уравнениями Максвелла.

Электрическое поле представляет собой частную форму проявления ЭМП. В своем проявлении это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на внесенный в него электрический заряд с силой, не зависящей от скорости заряда. Источниками электрического поля могут быть электрические заряды (движущиеся и неподвижные) и изменяющиеся во времени магнитные поля.

Магнитное поле представляет собой частную форму ЭМП. В своем проявлении — это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на движущиеся электрические заряды (в т.ч. на проводники с током), а также на магнитные тела независимо от состояния их движения. Источниками магнитного поля могут быть движущиеся электрические заряды (проводники с током), намагниченные тела и изменяющиеся во времени электрические поля. Основная количественная характеристика магнитного поля — магнитная индукция B , которая определяет силу, действующую в данной точке поля в вакууме на движущийся электрический заряд и на тела, имеющие магнитный момент. В материальных средах для магнитного поля вводится дополнительная характеристика — напряженность магнитного поля H , которая связана с магнитной индукцией соотношением:

$$H = B/\mu,$$

где μ — магнитная проницаемость среды.

Характеризуя зоны воздействия ЭМП, во всех исследованиях, как правило, рассматривают монохроматические излучения. Обозначая длину волны λ , на расстоянии от источника r выделяют три зоны воздействия:

- 1) ближняя (зона индукции): $\lambda/r \gg 1$;
- 2) промежуточная (резонансная): $\lambda/r \approx 1$;
- 3) дальняя (волновая, или квазиоптическая): $\lambda/r \ll 1$.

В «ближней» зоне, или зоне индукции, на расстоянии от источника $r < \lambda$, ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием, обратно пропорционально квадрату расстояния от источника r^2 . В «ближней» зоне излучения ЭМВ еще не сформирована. ЭМП в зоне индукции служит для формирования бегущих составляющих поля, ответственных за излучение (электромагнитной волны). Для характеристики ЭМП в ближней зоне измерения напряженности электрического поля E и напряженности магнитного поля H производятся раздельно.

«Дальняя» зона — это зона сформировавшейся ЭМВ, начинается с расстояния $r > 3\lambda$. В «дальней» зоне интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника r . В «дальней» зоне излучения есть связь между величинами E и H : $E = 377 H$, где 377 — волновое сопротивление вакуума (волновое сопротивление «свободного пространства»), Ом.

В России на частотах от 300 МГц до 300 ГГц (СВЧ-диапазон) измеряется ППЭ, (Вт/м²), или вектор Пойнтинга. ППЭ характеризует количество энергии, переносимой ЭМВ в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны. Чем больше частота излучения ν (соответственно, короче длина волны λ), тем больше энергия кванта излучения. Связь между энергией диэлектрической проницаемости ϵ и частотой ν электромагнитных колебаний определяется как $\epsilon = h \times \nu$, где h — постоянная Планка, равная $6,62 \times 10^{34}$ Вт/см².

Таким образом, ЭМП в дальней (волновой) зоне характеризуется как ЭМИ, или СВЧ-излучение, а его интенсивность определяется как ППЭ в Вт/м² (мВт/см², мкВт/см²).

1.4. Физические характеристики ЭМИ и единицы измерения

ЭМИ не только сопутствуют производственному процессу, а специально генерируются для достижения технологических задач и имеют большие радиусы распространения. СВЧ-излучение (микроволны) по принятой классификации относятся к той части спектра электромагнитных колебаний, длина волны которых колеблется от 1 миллиметра до 1 метра, а частота колебаний, соответственно, от 300 ГГц до 300 МГц — по электротехнической шкале или от 3 до 30 ГГц — по радиотехнической шкале.

ЭМИ может быть непрерывным или прерывистым (импульсным). Последний режим позволяет создавать значительную мощность в каждом отдельном импульсе. При частоте колебаний ниже 300 МГц в качестве ха-

характеристики ЭМП принимается силовая характеристика — напряженность электрического поля E [В/м] или напряженность магнитного поля H [А/м] (или плотностью магнитного потока B [Тл].) При частоте колебаний выше 300 МГц поле оценивается энергетической характеристикой — ППЭ [Вт/м²] (или ее производными — [мВт/см²] или [мкВт/см²]).

Для количественной оценки поглощенной энергии введено понятие удельной поглощенной мощности — УПМ (SAR — specific absorption rate, в американской редакции). Под УПМ понимается количество поглощаемой мощности, приходящейся на единицу массы тела, т. е. это усредненная величина, характеризующая скорость поступления энергии СВЧ-поля в поглощающее тело и представляемая как мощность, отнесенная к объему — [Вт/м³] или [мВт/см³] или массе — [Вт/кг] или [мВт/г]. Установлено, что предельной для терморегуляции человека является УПМ — 4 Вт/кг, а ПДУ — 0,4 Вт/кг.

Проблема метрологической оценки поглощенной человеком электромагнитной мощности (энергии) достаточно сложна. В настоящее время аппаратура для измерений поглощенной электромагнитной мощности человеком, облученным СВЧ-полем в свободном пространстве, пока еще не разработана. Оценку воздействия проводят по измеренной падающей на человека ППЭ и на ее основе методами математических моделей рассчитывают УПМ. Для измерений падающей мощности непрерывных СВЧ-излучений используются измерители типа ПЗ-9 и ПЗ-16 (Россия), которые также обеспечивают возможность оценки средней мощности импульсных излучений.

ГЛАВА 2 ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источниками ЭМИ РЧ и СВЧ являются технические средства и изделия, которые предназначены для применения в различных сферах человеческой деятельности и в основе которых используются физические свойства этих излучений: распространение в пространстве и отражение, нагрев материалов, взаимодействие с веществами и т. п., а также устройства, предназначенные не для излучения электромагнитной энергии в пространство, а для выполнения какой-то иной задачи, но при работе которых протекает электрический ток, создающий паразитное ЭМИ. Свойства ЭМИ РЧ и СВЧ распространяться в пространстве и отражаться от границы двух сред используются в связи (радио- и телестанции, ретрансляторы, радио- и сотовые телефоны), радиолокации (радиолокационные комплексы различного функционального назначения, навигационное оборудование). Способность ЭМИ РЧ и СВЧ нагревать различные материалы используется в различных технологиях по обработке материалов, полупроводников, сварки синтетических материалов, в приготовлении пищевых продуктов (микроволновые печи), в медицине (физиотерапевтическая аппаратура).

2.1. Микроволны в медицине

Микроволновая терапия имеет много общего с воздействием ЭМП УВЧ-диапазона, однако используются электромагнитные колебания частотой от 0,3 до 30 ГГц с длиной волны от 1 до 100 см. Преимущества микроволновой терапии заключаются в локальном воздействии с меньшей проникающей способностью. Микроволновая терапия подразделяется на:

- сантиметровую ($\nu = 2,375$ ГГц или $\lambda = 12,6$ см), глубина проникновения в ткани — 4–5 см;
- дециметровую ($\nu = 0,460$ ГГц или $\lambda = 65,0$ см), глубина проникновения в ткани — 2,6–26,2 см (ткани с высоким содержанием воды); в тканях целатного организма — до 9 см.

Для подведения сантиметровых волн к телу пациента используют излучатель с отражателем. Энергия колебаний частично отражается от поверхности тела, а прошедшая в организм энергия интенсивно поглощается молекулами воды и тканями. В тканях создается тепло (особенно в мышцах), в результате развивается целая система реакций — от расширения местных кровеносных сосудов и ускорения кровотока в них до включения системы терморегуляции. В умеренно тепловых дозировках сантиметровые волны оказывают болеутоляющее и противозудное действие, поэтому его применяют при заболеваниях опорно-двигательного аппарата. Также сантиметровая терапия используется как противовоспалительное средство при заболеваниях ЛОР-органов (фронтит, гайморит), невралгии тройничного нерва.

Механизм действия дециметровых волн не отличается от сантиметровых, но происходит меньшее поглощение энергии в единице объема тканей и большая глубина проникновения энергии. При воздействии образуется тепло, которое убывает по глубине. Дециметровая терапия оказывает стимулирующее действие на нервную систему, кровообращение различных органов и тканей, головного мозга. Под влиянием дециметровых волн проявляется противовоспалительное, десенсибилизирующее, иммуномодулирующее действие. Показания применения дециметровой терапии:

- воздействие на эндокринные органы (надпочечники, щитовидную железу);
- заболевания органов дыхания (ателектаз, рассасывание спаек);
- заболевания почек;
- гинекология (вторичное бесплодие, дисфункции).

При этом малые интенсивности воздействия вызывают физико-химические сдвиги в облученных тканях, а высокие интенсивности в большей степени тепловой эффект.

ЭМИ СВЧ-диапазона также применяются в медицине при:

- селективном облучении раковых и доброкачественных опухолей;
- управлении действием противораковых препаратов;
- диатермии ($\nu = 12, 27, 433, 915$ и 2450 МГц);

— нагревании охлажденной крови до температуры человеческого тела перед переливанием;

— обеззараживании различных медицинских материалов и отходов (тепловая гибель всех микроорганизмов).

2.2. Микроволновые печи

Микроволновая печь (или СВЧ-печь) в своей работе использует для разогрева пищи ЭМИ, также называемое микроволновым излучением или СВЧ-излучением. Рабочая частота СВЧ-излучения микроволновых печей составляет $\sim 2,45$ ГГц. Современные микроволновые печи оборудованы достаточно совершенной защитой, которая не дает ЭМИ вырваться за пределы рабочего объема. Вместе с тем нельзя говорить, что излучение совершенно не проникает вне микроволновой печи. Однако по разным причинам часть ЭМИ проникает наружу, особенно интенсивно, как правило, в районе правого нижнего угла дверцы.

2.3. Сотовая связь

Основными элементами системы сотовой связи являются БС, которые поддерживают радиосвязь с МРТ. БС и МРТ являются источниками ЭМИ УВЧ-диапазона. Некоторые технические характеристики действующих в настоящее время в России и Республике Беларусь стандартов системы сотовой радиосвязи приведены в таблице 2.

БС поддерживают связь с находящимися в их зоне действия МРТ и работают в режиме приема и передачи сигнала. В зависимости от стандарта, БС излучают электромагнитную энергию в диапазоне частот от 463 до 1880 МГц.

МРТ представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона передача ведется в диапазоне частот 453–1785 МГц. Мощность излучения МРТ является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи «МРТ — БС», т. е. чем выше уровень сигнала БС в месте приема, тем меньше мощность излучения МРТ. Максимальная мощность находится в границах 0,125–1 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05–0,2 Вт.

Таблица 2 — Краткие технические характеристики стандартов системы сотовой радиосвязи, действующих в России и Республике Беларусь

Наименование стандарта	Диапазон частот БС	Диапазон частот МРТ	Максимальная мощность БС	Максимальная мощность МРТ	Радиус «соты»
NMT-450 аналоговый	463–467,5 МГц	453–457,5 МГц	100 Вт	1 Вт	1–40 км
AMPS аналоговый	869–894 МГц	824–849 МГц	100 Вт	0,6 Вт	2–20 км
D-AMPS (IS-136) цифровой	869–894 МГц	824–849 МГц	50 Вт	0,2 Вт	0,5–20 км

Окончание таблицы 2

Наименование стандарта	Диапазон частот БС	Диапазон частот МРТ	Максимальная мощность БС	Максимальная мощность МРТ	Радиус «соты»
CDMA цифровой	869–894 МГц	824–849 МГц	100 Вт	0,6 Вт	2–40 км
GSM-900 цифровой	925–965 МГц	890–915 МГц	40 Вт	0,25 Вт	0,5–35 км
GSM-1800 (DCS) цифровой	1805–1880 МГц	1710–1785 МГц	20 Вт	0,125 Вт	0,5–35 км

2.4. Теле- и радиостанции

ПРЦ размещаются в специально отведенных для них зонах и могут занимать довольно большие территории (до 1000 га). По своей структуре они включают в себя одно или несколько технических зданий, где находятся радиопередатчики и антенные поля, на которых располагаются до нескольких десятков АФС. Зону возможного неблагоприятного действия ЭМИ, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части:

- территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС;
- прилегающие к ПРЦ территории, доступ на которые не ограничен и где могут размещаться различные жилые постройки, в этом случае возникает угроза облучения населения, находящегося в этой части зоны.

На территориях размещения передающих радиоцентров, а нередко и за их пределами, наблюдаются высокие уровни ЭМИ низкой, средней и высокой частоты. Детальный анализ электромагнитной обстановки на территориях ПРЦ свидетельствует о ее крайней сложности, связанной с индивидуальным характером интенсивности и распределения ЭМИ для каждого радиоцентра. В связи с этим специальные исследования такого рода проводятся для каждого отдельного ПРЦ.

Широко распространенными источниками ЭМИ в населенных местах в настоящее время являются РТПЦ, излучающие в окружающую среду ультракороткие волны ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. Сравнительный анализ санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки в зоне действия таких объектов показал, что наибольшие уровни облучения людей и окружающей среды наблюдаются в районе размещения РТПЦ «старой постройки» с высотой антенной опоры не более 180 м. Наибольший вклад в суммарную интенсивность воздействия вносят «уголковые» трех- и шестиэтажные антенны ОВЧ.

2.5. Персональный компьютер

Персональный компьютер — источник ЭМИ широкого диапазона частот (таблица 3), в том числе СВЧ. Основными составляющими частями пер-

сонального компьютера являются: системный блок (процессор) и разнообразные устройства ввода/вывода информации: клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер и т. п. Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации (монитор), главным компонентом которого часто является устройство на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Все эти элементы при работе компьютера формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя.

Таблица 3 — Частотные характеристики электромагнитного излучения персонального компьютера

Источник	Диапазон частот
Монитор	50–100 Гц
Статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20–100 кГц
Блок кадровой развертки и синхронизации	48–160 Гц
Блок строчной развертки и синхронизации	15–110 кГц
Ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	0 Гц (электростатика)
Системный блок (процессор)	50 Гц–1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50–100 кГц

2.6. Радары

Радиолокационные станции оснащены, как правило, антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения. Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими электромагнитный сигнал принципиально отличается от излучения других источников. Связано это с тем, что периодическое перемещение антенны в пространстве приводит к пространственной прерывистости облучения. Временная прерывистость облучения обусловлена цикличностью работы радиолокатора на излучение. Время наработки в различных режимах работы радиотехнических средств может исчисляться от нескольких часов до суток. У метеорологических радиолокаторов с временной прерывистостью 30 мин — излучение, 30 мин — пауза, суммарная наработка не превышает 12 ч, в то время как радиолокационные станции аэропортов в большинстве случаев работают круглосуточно. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости обычно составляет несколько градусов, а длительность облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд.

Радары метеорологические могут создавать на удалении 1 км ППЭ $\sim 100 \text{ Вт/м}^2$. Эта величина на 6 порядков превышает величину, которая считается безопасной, но с поправкой, что это очень кратковременное излучение за каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ $\sim 0,5 \text{ Вт/м}^2$ на

расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование устанавливается на всех кораблях, обычно оно имеет мощность передатчика на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров, поэтому в обычном режиме сканирования ППЭ, создаваемое на расстоянии нескольких метров, не превышает 10 Вт/м^2 . Сравнение уровней создаваемых радарными излучениями с другими источниками СВЧ-диапазона приведено на рисунке 3.

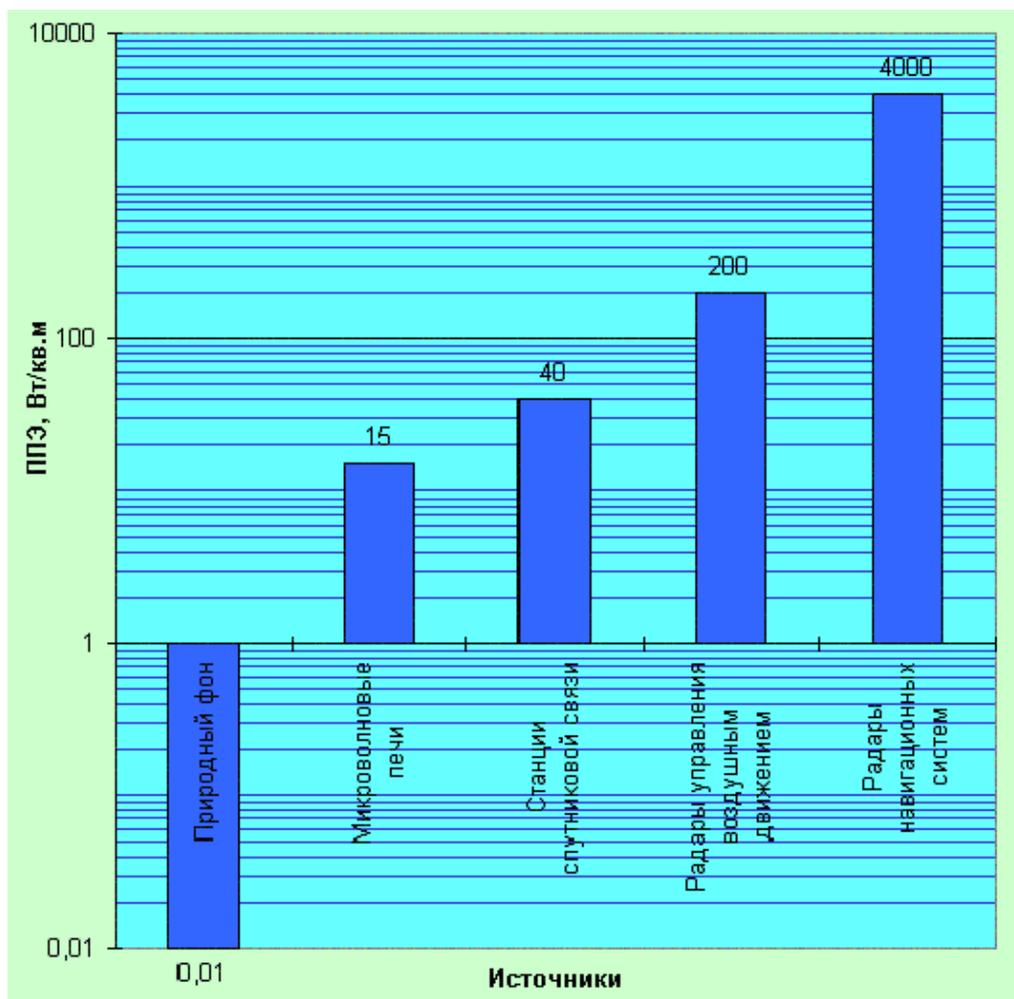


Рисунок 3 — Уровни электромагнитного излучения радаров в сравнении с другими источниками СВЧ-диапазона

Возрастание мощности радиолокаторов различного назначения и использование остронаправленных антенн кругового обзора приводит к значительному увеличению интенсивности ЭМИ СВЧ-диапазона и создает на местности зоны большой протяженности с высокой ППЭ. Наиболее неблагоприятные условия отмечаются в жилых районах городов, в черте которых размещаются аэропорты.

2.7. Системы спутниковой связи

Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции на Земле и спутника, находящегося на орбите. Диаграмма направленности

антенны станций спутниковой связи имеет ярко выраженный узконаправленный основной луч — главный лепесток. ППЭ в главном лепестке диаграммы направленности может достигать нескольких сотен $\text{Вт}/\text{м}^2$ вблизи антенны, создавая также значительные уровни излучения на большом удалении. Например, станция мощностью 225 кВт, работающая на частоте 2,38 ГГц, создает на расстоянии 100 км ППЭ равное $2,8 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Однако рассеяние энергии от основного луча очень небольшое и происходит, в основном, в районе размещения антенны. Типичный расчетный график распределения ППЭ на высоте 2 м от поверхности земли в районе размещения антенны спутниковой связи приведен на рисунке 4.

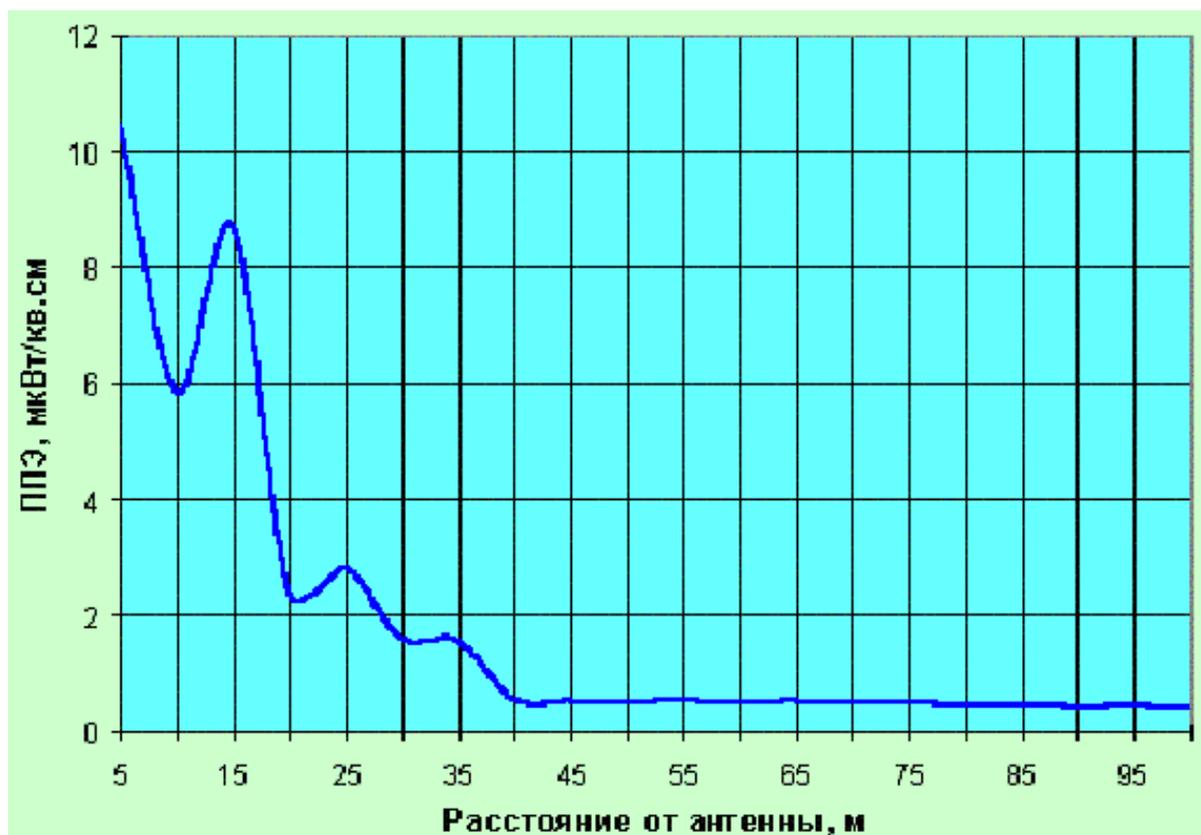


Рисунок 4 — График распределения плотности потока энергии электромагнитного излучения на высоте 2 м от поверхности земли в районе установки антенны спутниковой связи

Существуют две основные опасные возможности облучения человека:
— нахождение непосредственно в районе размещения антенны;
— нахождение вблизи оси главного луча на всем его протяжении.

ГЛАВА 3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

3.1. Механизм биологического действия электромагнитного излучения

Эффект воздействия СВЧ ЭМП на биологические объекты определяется количеством проникающей в них и поглощаемой ими электромагнитной энергии. Значительная часть энергии микроволн поглощается тканями организма и переходит в тепло, что объясняется возникновением колебаний ионов и дипольных молекул воды, содержащихся в тканях. Наиболее эффективное поглощение микроволн отмечается в тканях с большим содержанием воды: кровь, тканевая жидкость, слизистая желудка, кишок, хрусталик глаза и др.

Нагрев тканей в СВЧ-поле является наиболее простым и очевидным эффектом действия микроволн на организм человека. Положение максимума температуры, его удаление от поверхности тела зависит от проводимости среды, а следовательно, и от частоты радиоволны, действующей на ткань.

Принято различать тепловое действие микроволн — при ППЭ, превышающей 10 мВт/см^2 , и нетепловое — при ППЭ ниже 10 мВт/см^2 . Такое деление условно, так как в действительности имеет место и то и другое действие.

Первичный механизм теплового действия изучен довольно обстоятельно. Обнаружено, что температурное распределение, которое устанавливается в живом организме под действием микроволн, зависит не только от длины волны, интенсивности излучаемой энергии и продолжительности воздействия, но и от ряда других факторов, главными из которых являются теплообмен на поверхности нагреваемого объекта (естественное или принудительное охлаждение), тканевая структура объекта (однородность или слоистое строение), интенсивность кровоснабжения в нагреваемой области и др.

Изучение механизма нетеплового действия выдвигает гораздо более трудные задачи. Само нетепловое или как его называют специфическое действие (энерго-информационное) не является столь бесспорным как тепловое действие микроволн. Нетепловое действие СВЧ называют специфическим на основании предположения о существовании каких-либо первичных механизмов взаимодействия, специфических именно для ЭМИ СВЧ-диапазона. Утверждать определенно о микроприроде неспецифического воздействия СВЧ-излучения на основании имеющихся материалов трудно. Тем не менее существуют данные, подтверждающие действие СВЧ-поля без нагрева. Они были получены из наблюдений за реакциями целостных организмов на воздействие микроволн небольшой интенсивности.

В настоящее время существует три теории нетермического действия микроволн на организм. Эффекты слабых полей объясняют кооперативными процессами, основанными на резонансных взаимодействиях биоло-

гических макромолекул. Считается, что ими являются белковые молекулы, входящие в состав мембраны. Нетепловые резонансные эффекты миллиметровых волн связывают с синхронизацией существующих в норме нефазированных колебаний множества осцилляторов живой клетки (например, колебания белковых молекул в мембране). Для объяснения нетермических эффектов можно привлечь теорию Фрелиха, согласно которой при воздействии энергии ЭМИ может произойти полярная перестройка биомолекул, способная дать на резонансной частоте колебания большой амплитуды за счет перекачки энергии (по аналогии с химическими лазерами).

Точкой приложения любого патогенного фактора является система регуляции. Большинство жалоб и объективных данных при синдроме электромагнитного воздействия укладывается в картину динамических нарушений регуляторного звена. В обобщенном виде можно сказать, что последствия ЭМИ проявляются:

- угнетением и истощением процессов нервной и эндокринной регуляции;
- сдвигами в обмене веществ, угнетением синтетических процессов;
- снижением неспецифической резистентности, ослаблением иммунных процессов;
- снижением адаптации к факторам окружающей среды.

Следствием перечисленного будут:

- повышение заболеваемости (общей, инфекционной, соматической);
- преморбидные состояния;
- отягощение имеющихся хронических заболеваний;
- функциональные расстройства в сердечно-сосудистой, кроветворной, генеративной и других системах организма;
- невротические расстройства;
- нарушение гормонального баланса, преждевременное старение организма;
- возможны онкогенные процессы и отдаленные последствия среди потомства.

В ряде случаев влияние ЭМИ не проявляется какой-либо клинической картиной, но изменяет резистентность организма к иным факторам среды. Возможна кумуляция повреждающих эффектов, ведущая к срыву механизмов адаптации. Наиболее выраженные нарушения обнаруживаются при действии сверхвысоких частот; с понижением частоты при эквивалентной энергии излучения глубина ответных реакций уменьшается, но направленность их остается однотипной.

В развитии патологического процесса при действии ЭМИ в его первой фазе отражаются приспособительные реакции на основе усиления деятельности ЦНС, эндокринных желез и нейрогуморальной регуляции. Вторая фаза процесса — охранительная, сопровождающаяся снижением уровня деятельности различных систем и постепенным истощением резервов. Для третьей фазы характерно развитие декомпенсации — вегетативно-сосудистых кризов.

В целом соматические последствия радиоволнового воздействия с развитием соответствующего синдрома можно трактовать как болезнь системы регуляции. В связи с отсутствием нозологической формы заболевания электромагнитной природы, при экспертизе профессиональных заболеваний следовало бы отдать приоритет наличию донозологического состояния как показателю нарушения нейроэндокринной регуляции, характерного для ЭМИ.

Реакции организма при радиоволновых (как и при многих других) воздействиях направлены на поддержание гомеостаза и являются суммой эффектов непосредственного действия ЭМИ, реакций противодействия этим эффектам и более медленных, но сильных репаративных процессов (как производного от глубины повреждения и компенсаторных возможностей организма). Все это и обуславливает неспецифичность картины расстройств электромагнитной природы, и проявления болезни будут замаскированы признаками адаптивно-компенсаторного процесса. Поэтому предпатологическая оценка должна получить новый критерий — донозологические состояния, а в оценке профессиональной патологии важнейшее место следовало бы отдать показателю общей заболеваемости.

Истощение регуляции, угнетение синтетических и иммунных процессов в облученном организме в конечном итоге приведет к ослаблению его резистентности, повышенной общей и инфекционной заболеваемости и к другим, пока еще недостаточно подтвержденным, нарушениям здоровья. Пониженная адаптация облученного организма к обычным факторам окружающей среды и производства также будет способствовать болезненным реакциям организма на раздражители любой природы. Кроме того, ЭМИ существенно изменяют характер и силу ответной реакции организма.

3.2. Предельно допустимые уровни воздействия СВЧ-излучения на персонал

Нормативными документами, устанавливающими ПДУ ЭМИ, являются Государственные стандарты ССБТ и СанПиН.

Гигиенические стандарты и нормы традиционно разрабатывались для двух категорий облучения — профессионального, т. е. облучения на рабочих местах, и непрофессионального — облучения населения, профессионально не связанного с использованием ЭМП. В последнее время формируется еще одна категория — профессиональное облучение особого контингента населения. К нему, прежде всего, относятся женщины в состоянии беременности и лица, не достигшие 18 лет; для этих лиц в современных российских и белорусских нормах установлены достаточно жесткие ПДУ.

Зарубежные стандарты разрабатываются преимущественно на экспериментально-расчетных методах, причем выводы строятся на основе острых опытов с выраженными поражениями биообъекта. Такой подход позволил

выполнить непрерывное нормирование во всем диапазоне ЭМП от 0 Гц до 300 ГГц. В ряде зарубежных стандартов дополнительно установлены особые ПДУ также для людей с имплантированными кардиостимуляторами.

Биофизической основой для разработки отечественных нормативных документов послужили две группы биоэффектов, помимо «кратковременного термического»:

— кумуляция эффекта воздействия в организме при длительном непрерывном и дробном воздействии, особенно в пределах дотепловых уровней;

— обратимость эффектов и адаптация облучаемого организма при наличии больших пауз между экспозициями.

Подобный подход потребовал значительного объема медико-биологических исследований и не позволил интерполировать результаты нормирования на другие частотные диапазоны. Этим, в частности, объясняется разрывный (ступенчатый) характер отечественных ПДУ, к тому же не перекрывающих весь частотный диапазон от 0 Гц до 300 ГГц. Следует отметить, что темпы развития техники существенно опережают темпы разработки стандартов и норм.

ПДУ ППЭ в диапазоне частот свыше 300 МГц до 300 ГГц, согласно СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях», представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Предельно допустимый уровень СВЧ-излучения

Категория облучаемых лиц	ППЭ СВЧ-излучения, мкВт/см ²
Работающие с источниками излучения в течение:	
— 8-часовой смены	10
— не более 2 час. в смену	100
— не более 20 мин. в смену	1000
Лица, не связанные с источниками излучения профессионально	1
Население	1

Оценка и нормирование воздействия ЭМП диапазона частот свыше 30 кГц до 300 ГГц, включая СВЧ ЭМИ, осуществляется по величине ЭЭ. ЭЭ в диапазоне частот свыше 300 МГц до 300 ГГц рассчитывается по формуле 1.

$$ЭЭ_{\text{ппэ}} = \text{ППЭ} \times T, \text{ (Вт/м}^2\text{)} \times \text{ч или (мкВт/см}^2\text{)} \times \text{ч}, \quad (1)$$

где ППЭ — плотность потока энергии (Вт/м², мкВт/см²);

T — время воздействия за смену (ч).

ПДУ ЭЭ в диапазоне частот свыше 300 МГц до 300 ГГц на рабочих местах за смену не должен превышать величины 200 мкВт/см² · час.

3.3. Последствия влияния электромагнитного излучения на организм человека

Первые сведения о негативных последствиях радиочастотных облучений человека появились в 30-х годах. В годы Второй мировой войны аме-

риканскими исследователями проведен ряд работ в связи с жалобами личного состава кораблей на ухудшение здоровья при работе с РЛС, однако исследователи не пришли к определенному выводу о клинической значимости микроволновых воздействий. В послевоенные годы клинические и лабораторные исследования ЭМИ получили широкое распространение в России и за рубежом. Наибольший интерес проявлялся к диапазону СВЧ в связи с широким использованием источников этих частот и наибольшей биологической значимостью микроволн. Были выявлены повреждающее действие на ткани организма (чаще — хрусталик глаза, семенники) и функциональные расстройства важнейших систем организма — нервной, эндокринной, сердечно-сосудистой, гематоиммунной.

Проблема хронического действия малых интенсивностей ЭМИ разрабатывалась в основном отечественными клиницистами. В исследованиях выявилась отчетливая зависимость от интенсивности и длительности воздействия излучения, однотипность симптоматики хронического действия ЭМИ разных диапазонов, отсутствие специфической картины расстройств. Выявились также различия в трактовке возникающих расстройств, признание зарубежными авторами лишь «тепловой» природы нарушений в организме, что существенно повлияло на экспертную оценку расстройств в организме и даже на устанавливаемые нормативы безопасности в различных странах.

3.4. Последствия интенсивных СВЧ облучений человека

Известно, что при действии высоких («тепловых») уровней ЭМИ СВЧ-диапазона могут возникать тяжелые патологические реакции со структурными нарушениями: ожоги, катаракты хрусталика, атрофия семенников, язвы желудка и кишечника и т. п., наблюдаемые в основном в эксперименте, поскольку человек может выйти из интенсивно облучаемой зоны при ощущении «жара», тепла, создаваемого ЭМП. У человека наблюдались катаракты хрусталика, выраженные острые расстройства ЦНС, нарушения слуха, слепота, вестибулярные расстройства. Гибели человека под влиянием ЭМИ не описано, однако не отвергается роль интенсивного облучения техника РЛС в развитии у него бурной картины перитонита и язвенного поражения кишечника, закончившихся смертью этого человека.

Возникающая под влиянием интенсивного действия ЭМИ картина проявляется чаще расстройствами ЦНС в виде диэнцефального синдрома, нарушений функций некоторых анализаторов, расстройств гемодинамики (пароксизмальная тахикардия, повышение АД), требующих стационарного лечения. Диэнцефальные кризы, как правило, возникают внезапно. Проявляются приступообразными головными болями, головокружением, резкой слабостью, потемнением в глазах, бледностью кожи, профузной потливостью, дрожью тела, сердцебиением, иногда носовым кровотечением и обморочным состоянием. В последующие 5–7 дней наблюдаются возбужде-

ние больного, эмоциональная лабильность, вегетативная неустойчивость. В крови — нейтрофильный лейкоцитоз до 16000 в 1 мкл с нормализацией в течение недели. Кризы проходили сравнительно быстро, но в отдельных случаях выздоровление затягивалось до 30–45 дней.

Клиническая картина острого синдрома легкой и средней тяжести протекает в основном однотипно; в ней преобладает неспецифическая симптоматика (слабость, головная боль, шум в ушах, тревожный сон, тенденция к изменениям АД), в основе лежит нейродинамический механизм соматических расстройств, а нарушения в основном носят обратимый характер. Подобные нарушения в организме наблюдали и зарубежные авторы. У людей, подвергшихся в течение часа действию ЭМИ умеренной интенсивности от РЛС с фазированной антенной решеткой через 3–4 ч появляется ухудшение самочувствия, выраженная головная боль, общая слабость, одышка, головокружение, колющие боли в области сердца. Позднее возникают нарушение сна, половая слабость. Большинство пострадавших предъявляют эти жалобы в течение 10–12 дней. При обследовании обнаруживается очаговая микросимптоматика (неправильная форма зрачков, слабость конвергенции глазных яблок, неравномерность сухожильных рефлексов), выраженный тремор в позе Ромберга, различные вегетососудистые нарушения. Симптоматика имеет обратимой (в течение 30–40 дней) характер. При исследовании крови обнаруживается повышение числа палочкоядерных нейтрофилов до 10-го дня, постепенное повышение тромбоцитов с 5-го по 40-й день после облучения; в костном мозге возросло содержание плазматических клеток.

Описаны эффекты острых воздействий ЭМИ субтепловой интенсивности и в условиях клиничко-лабораторного наблюдения за состоянием организма добровольцев, подвергавшихся кратковременному (1 ч) облучению с ППЭ 1–3 мВт/см² при 7–10 повторных сеансах. Непосредственные реакции при таких острых воздействиях малой интенсивности были слабо выраженными, отражали усиление возбудительных процессов ЦНС, носили фазный характер и зависели от индивидуальных особенностей организма: обнаружено усиление мышечного тремора, снижение точности движений, усиление двигательной активности во время сна, сужение поля зрения. Время сенсомоторной реакции в основном нарастало на 2–3 день облучения, нормализация наступала через 1–3 дня после воздействия (предполагается эффект кумуляции). Сдвиги в гемодинамике и ряде показателей гуморального иммунитета были недостоверными и быстро преходящими. Зависимость от интенсивности облучения проявилась по функциональным показателям нейтрофилов крови.

3.5. Клиничко-физиологические последствия хронического влияния на организм человека электромагнитного излучения малой интенсивности

Многочисленные клиничко-физиологические наблюдения проведены в основном отечественными и зарубежными авторами среди производствен-

ных коллективов и военных контингентов, подвергающихся так называемому «нетепловому действию» ЭМИ. Полученные данные в основном отражают реакцию организма при уровнях до 1 мВт/см^2 периодически превышающих их. Картина хронического действия ЭМИ не имеет четкой границы, она выражается нарушениями функций нервной, эндокринной и сердечно-сосудистой систем, сдвигами в гемато-иммунной, генеративной и других системах. В изменениях нервно-психического состояния облученных некоторые авторы видят последовательные этапы.

Наиболее ранние последствия облучения возникают лишь у небольшой (до 3 % численности) группы работающих с ЭМИ. Через 3–6 мес. профессионального контакта у этой группы работающих возникают усталость и ухудшение самочувствия к концу рабочего дня, раздражительность, головные боли, снижение работоспособности, сонливость, боли в области сердца, эмоциональная неустойчивость, тревожность. Постепенно субъективная симптоматика сглаживается и исчезает, объективная практически отсутствует (в этот период регистрируются лишь случаи брадикардии и гипотонии, в 2–3 раза чаще, чем среди необлученных).

Основное развитие отсроченных последствий регистрируется различными авторами через 2–5 и даже 10 лет от начала работы с ЭМИ. По-видимому, такие сроки определяются как интенсивностью излучений, так и индивидуальными особенностями организма. На этом этапе также преобладает субъективная симптоматика, но налицо и объективная картина расстройств. Примерно 10–40 % работающих предъявляют жалобы на раздражительность, упорные головные боли, головокружение, периодическую тошноту, боли в области сердца и сердцебиение, утомляемость и прогрессирующую слабость, ослабление мужской потенции, снижение работоспособности, сонливость днем, нарушение ночного сна, ослабление памяти. При объективном исследовании выявляется эмоциональная неустойчивость, подавленность, снижение внимания, депрессия, игра вазомоторов, тремор пальцев рук, гипергидроз, неустойчивость в позе Ромберга, красный дермографизм. Наблюдаются неустойчивость АД и сосудистых реакций при функциональных пробах, изменения внутрисердечной проводимости, признаки гипоксии миокарда, нарушение вегетативной регуляции сердечного ритма, тенденция к лейкопении, тромбоцитопении, повышение гистамина и билирубина (непрямые фракции) в крови, повышение потребления кислорода, нерезко выраженные сдвиги в углеводном и минеральном обмене. Сердечно-сосудистая симптоматика укладывается в картину нейроциркуляторной дистонии по кардиальному или гипертоническому типу. Появляются признаки нарушения центральной и периферической гемодинамики. Выраженные вегетативные сдвиги и расстройства гемодинамики наблюдались у людей, периодически облучавшихся с ППЭ $3\text{--}4 \text{ мВт/см}^2$.

На третьем этапе заболевания, в более поздние сроки трудового стажа картина расстройств электромагнитной природы прогрессирует, усугуб-

ляются жалобы больных, возникают явления навязчивых страхов, вязкость мышления, становятся выраженными нарушения гемодинамики. В данном случае можно говорить о развившемся заболевании (астено-вегетативном, астено-невротическом синдроме и нейро-циркуляторной дистонии). Нередко обнаруживается микросимптоматика нарушения функции черепно-мозговых нервов, симптомы орального автоматизма, повышенные сухожильные рефлексы, иногда — парестезии. Растет число повторяющихся случаев ОРЗ, гриппа, ангина, радикулита. В 22–40 % выявляется отрицательное действие ЭМИ на эндокринную систему женщин, в 18–29 % — на течение беременности (выкидыши, токсикозы, кровотечения, слабость родовой деятельности). Периодически возникают и учащаются диэнцефальные кризы. Нейро-циркуляторная дистония определяется у 60 % предъявляющих жалобы на здоровье; в основном развивается гипертоническая болезнь, возможны раннее развитие ишемической болезни сердца, коронарная недостаточность, динамическое расстройство мозгового кровообращения. Гипертонические реакции в основном наблюдаются при стаже свыше 5–10 лет. Состояние усугубляется присоединением хронического гастрита, язвенной болезни, дискинезии желудочно-кишечного тракта и желчных путей. Выявляется дисбаланс в эндокринной системе (угнетение половой функции, увеличение щитовидной железы). Снижаются показатели клеточного и гуморального иммунитета, возрастают аутоаллергические процессы.

Гематологическая картина расстройств электромагнитной природы в основном характеризуется неустойчивостью показателей белой крови. Отклонения от нормы показателей крови при хроническом облучении как правило незначительны и связаны с уровнями ЭМИ, близкими к тепловым. При длительном (около 10 лет) облучении в несколько мВт/см² появляется выраженная цитопеническая реакция (уменьшение числа лейкоцитов, тромбоцитов и даже эритроцитов). Влияние малых интенсивностей (до 1 мВт/см²) обуславливает склонность к лейкопении, нейтропении и относительному лимфоцитозу. Однако при повторных интенсивных облучениях СВЧ наблюдалось прогрессирующее снижение ретикулоцитов, снижение гемоглобина, гематокрита, общего белка и числа лимфоцитов. Снижение числа сегментированных форм лейкоцитов и тромбоцитов отмечено у 25 % работающих при ППЭ 9 мВт/см² и у 12 % — при ППЭ 1,6 мВт/см² и ниже. Вместе с тем наблюдалось и повышение количества лейкоцитов и лимфоцитов у 38 % обследованных при ППЭ 13 мВт/см² в течение 6–9 месяцев; у 30 % из этой же группы отмечено снижение числа эритроцитов. В костном мозге — тенденция к усилению процессов регенерации, нерезко выраженные цитогенетические изменения в хромосомах лимфоцитов. Выявляется качественная неполноценность эритроцитов в периферической крови, моноцитоз, базофилия эритроцитов; у трети больных снижена СОЭ.

Систематическое действие полей СВЧ и ВЧ ведет к повышению общего белка и а- и р-глобулинов в сыворотке практически здоровых людей.

В выраженной стадии заболевания нарушения обмена нарастают; у половины обследованных возросло содержание холестерина, а у 65 % — увеличивалась концентрация гистамина в 1,5–2 раза, сахарные кривые были атипичными — уплощенные, так называемые «диабетические», и двугорбые — при сахарной нагрузке. По данным ряда авторов у длительно работающих с источниками СВЧ наиболее часты гипертензия, миокардиодистрофия, хронические гастрит и холецистохолангит; у 60 % обследованных обнаружены гемодинамические расстройства в бассейне центральной артерии сетчатки глаза. Однако и в этом комплексе расстройств нет определенной системной патологии. Симптоматика неспецифическая, функциональные сдвиги можно обнаружить практически во всех наиболее важных системах (нервной, эндокринной, иммунной, сердечно-сосудистой, в системе крови и обмене веществ), что говорит о нарушении регуляции физиологических процессов в организме.

Ряд зарубежных авторов не выявили отрицательных отклонений в состоянии здоровья персонала, в течение 10–12 лет обслуживающего источники СВЧ. Наблюдаются противоречивые результаты при эпидемиологических исследованиях. По-видимому, этому способствует отсутствие четкой симптоматики и неоднозначность критериев эпидобследования.

Специфических изменений в организме под влиянием ЭМИ пока не найдено, в связи с чем предлагаемая ранее нозологическая форма «радиоволновая болезнь» не была принята. Не существует и теории о возможном специфическом действии ЭМИ. В целом картина последствий длительного радиочастотного облучения проявляется в интенсивных циркуляторных и склеротических процессах, в преждевременном старении.

Проблему отдаленных последствий электромагнитного облучения человека, по-видимому, следует осветить с позиций влияния ЭМИ на возникновение раковых заболеваний, нарушения генеративной функции у облученных и функциональную неполноценность потомства подвергавшихся облучению людей. Соматостохастические эффекты популяции человека носят вероятностный характер, и причину их появления (например, лейкемии, рака, общего нарушения состояния здоровья с сокращением продолжительности жизни и др.) в каждом отдельном случае установить невозможно. Стохастическими являются и генетические эффекты, и выявление их возможно статистическими методами также лишь в облученной популяции. Пока еще нет убедительных доказательств изменения плодовитости облученного человека, поскольку предварительных обследований, как правило, не проводилось, однако зафиксированы факты олигоспермии и бесплодия у ранее плодовитых мужчин при неоднократном облучении микроволнами высокой интенсивности. В другой работе показаны последствия длительного (в среднем 8 лет) облучения: достоверное снижение количества сперматозоидов на 1 мл спермы и процента подвижных сперма-

тозоидов в эякуляте. При длительном наблюдении за состоянием здоровья работающих обнаруживается снижение сперматогенеза, изменения менструального цикла, нарушения развития плода, врожденные дефекты, сниженную лактацию у матерей, работающих с ЭМИ. Однако все эти последствия связаны с интенсивными облучениями. Несколько случаев пороков развития зарегистрировано у потомства женщин, проходивших курс диатермии на ранних стадиях беременности. Методами опроса установлено снижение половой потенции мужчин, работающих с ЭМИ. При эпидемиологических обследованиях выявлена связь частоты пороков развития у детей с насыщенностью населенной зоны городов источниками ЭМИ. Терагенные проявления в потомстве облучавшихся родителей у человека не зафиксированы. В экспериментах данные о тератогенезе при ЭМИ противоречивы. Онкогенное воздействие ЭМИ на настоящий момент убедительно не доказано. Генетические нарушения в потомстве облученных родителей в литературе практически не представлены. Есть единичные сведения о сдвигах в физическом развитии детей на облучаемых территориях.

В экспериментах на животных выявлено влияние ЭМИ на ДНК, на гонады, на эмбрион, плод. Получены данные о мутагенном действии ЭМИ на живых системах разного уровня организации, однако эти эффекты зависят от условий облучения. Возможность возникновения генетических последствий у человека при действии ЭМИ также отрицать нельзя.

ГЛАВА 4

ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В целях предупреждения и раннего обнаружения изменений состояния здоровья все лица, профессионально связанные с обслуживанием и эксплуатацией источников ЭМП, должны проходить предварительный при поступлении и периодические профилактические медосмотры в соответствии с действующим законодательством. Лица, не достигшие 18-летнего возраста, и женщины в состоянии беременности допускаются к работе в условиях воздействия ЭМП только в случаях, когда интенсивность ЭМП на рабочих местах не превышает ПДУ, установленных для населения.

4.1. Диагностика и классификация

При диагностировании СВЧ-поражений нельзя не учесть того факта, что о прямой связи возникших изменений с микроволновым излучением мы можем говорить только в случае острых поражений, когда клиническая картина возникла в ближайшее время после облучения и нет других причин для ее возникновения. Диагноз острого поражения СВЧ-полем должен ставиться на основании данных тщательной всесторонней экспертизы об-

лучения, жалоб больного и результатов клинического обследования пострадавшего в условиях стационара. При проведении дифференциальной диагностики необходимо исключение всех причин, могущих приводить к аналогичным поражениям. Установление диагноза хронического поражения микроволнами нередко встречает большие затруднения. Некоторые авторы трактуют все изменения, найденные у персонала РЛС как СВЧ поражения. Между тем в деятельности специалистов РЛС имеется комплекс других неблагоприятных факторов среды (высокая температура, шумы, низкая освещенность и др.), среди которых СВЧ поле не всегда является основным фактором. Отсутствие специфических симптомов микроволнового поражения приводит к тому, что некоторые врачи ошибочно трактуют нарушения, наступающие в организме у специалистов РЛС вне связи с СВЧ воздействием как его последствия. Эта связь правомерна лишь в тех случаях, когда астеническое состояние, нейроциркуляторные, эндокринные и обменные нарушения, изменения в системе крови и другие сдвиги возникают у лиц, которые действительно в течение длительного времени (месяцы, годы) работают в сфере СВЧ поля при интенсивностях, как правило, превышающих ПДУ. При этом исключаются другие причины, приводящие к аналогичным изменениям в организме.

Роль СВЧ-поля как фактора риска в развитии заболевания более вероятна при наличии определенной последовательности в развитии отдельных симптомов при ведущей роли функциональных изменений со стороны нервной системы: длительный астенический фон с неврастеническими проявлениями, вегетативно-сосудистая дисфункция, которая в последующем может протекать с кризовыми состояниями и признаками гипоталамической недостаточности. При решении вопроса о роли микроволнового излучения в развитии астенических состояний, нейроциркуляторных дистоний, дистрофии миокарда и других висцеральных дисфункций надо исключить возможность хронической лучевой болезни, гиповитаминоза, черепно-мозговой травмы, интоксикаций, вялотекущего ревматизма и многих других причин. При наличии признаков гипоталамической недостаточности дифференциальный диагноз должен проводиться, прежде всего, с диэнцефальными синдромами инфекционного и травматического происхождения.

Таким образом, при установлении диагноза поражения микроволнами (наряду с выявлением характерных клинических симптомов) ведущую роль играет правильно собранный профессиональный анамнез (длительность работы с генераторами СВЧ, характер контакта с микроволнами в течение суток, месяца, года, функциональные обязанности, маршруты передвижения во время работы, время появления болезненных расстройств и их связь с характером работ, выполняемых в период развития расстройств) и объективная характеристика условий работы, включая данные тщательно проведенной дозиметрии при различных режимах работы РЛС.

Работами многих отечественных клиницистов определена клиническая картина расстройств электромагнитной природы. Однако отсутствие специфической симптоматики не позволило принять предлагаемую 25–30 лет назад нозологическую форму выявленных расстройств «радиоволновая болезнь». Клиническая картина последствий электромагнитного облучения формулируется в литературе лишь на уровне синдромов. С 60-х годов сложилась синдромная классификация последствий влияния радиочастот: неврастенический синдром с вегетативными, эндокринными и трофическими расстройствами, нейроциркуляторной дистонией и катарактой хрусталика глаза. Также клинику этих расстройств определяют как «синдром хронического воздействия СВЧ-поля». Различают 5 синдромов в клинике последствий СВЧ-облучения: вегетативный, диэнцефальный, астенический, астено-вегетативный и ангиодистонический. М. Н. Садчиковой предложено понятие «радиоволновая болезнь», как нозологическая форма вызываемых ЭМИ расстройств в организме. При этом по степени тяжести предлагалось различать три стадии: начальную, умеренно выраженную и выраженную, с различными клиническими синдромами. В официальной медицинской документации последствия влияния ЭМИ классифицируются как «последствия острого и хронического воздействия СВЧ-поля». Клиническая классификация проявлений расстройств электромагнитной природы (Д. В. Гусаров) включает в себя характеристику облучения по параметрам ЭМИ и условиям воздействия, клинические формы поражения, степень их тяжести и варианты течения:

а) острое локальное поражение микроволнами III степени, катаракта обоих глаз (одномоментное облучение, ППЭ 30 мВт/см², режим генерации непрерывный;

б) хроническое поражение микроволнами III степени, нейроциркуляторная дистония по смешанному типу, групповые экстрасистолы из обоих желудочков;

в) хроническое поражение микроволнами II степени, астенический синдром, функциональное расстройство желудка с понижением кислотообразующей функции.

Выделяют легкую, среднюю и тяжелую степени СВЧ-поражения.

1. К легким поражениям (острым и хроническим) относят преходящие функциональные изменения в организме, не требующие длительного лечения и существенно не снижающие трудоспособности пострадавших.

2. Поражения средней тяжести характеризуются стойкими функциональными нарушениями, требующими длительного и часто повторного лечения и снижающими трудоспособность пострадавших в последующем.

3. При тяжелой степени поражения наблюдаются органические повреждения и выраженные дистрофические изменения тех или иных систем, тяжелые функциональные расстройства (диэнцефальные кризы, симптомы коронарной недостаточности и т. д.).

Полного выздоровления может и не наступить. Эти лица потребуют длительного лечения и, возможно, специального трудоустройства или перевода на инвалидность. Возможны рецидивы СВЧ-поражений при интеркуррентных заболеваниях.

4.2. Профилактика и лечение

Первостепенное значение при профилактике вредного действия СВЧ-излучений отводится контролю за соблюдением личным составом в процессе учебно-боевой деятельности и персоналу РЛС санитарно-гигиенических норм микроволнового облучения. Так, интенсивность облучения в СВЧ-поле не должна превышать следующих предельно допустимых величин: для 8 ч работы — ППЭ не более 25 мкВт/см^2 ; независимо от времени работы максимально допустимая величина — ППЭ не более 1000 мкВт/см^2 .

Важное значение приобретает создание системы надежной защиты людей от вредного влияния СВЧ-излучений. Все защитные мероприятия можно объединить в две группы: коллективные меры защиты и индивидуальные меры защиты. Первые предусматривают групповую защиту обслуживающего персонала и других лиц, находящихся в зонах воздействия излучающих устройств от СВЧ воздействия. Вторые — непосредственную защиту каждого специалиста, подвергающегося опасности облучения. Коллективные меры защиты могут быть преимущественно организационными или преимущественно техническими. К организационным мерам можно отнести такие, как рациональное расположение излучающих устройств на местности с соблюдением необходимых пространственных разрывов между ними и жилыми зданиями, поднятие антенных систем над окружающей местностью, установление для работающих станций определенных безопасных секторов работы и углов места и т. д. Примером технических мер защиты могут служить различные виды экранирования. В качестве индивидуальных средств защиты используются специальные защитные очки и шлемы и специальная защитная одежда.

Медико-гигиеническая профилактика не ограничивается контролем за соблюдением установленных гигиенических условий (в том числе дозиметрический контроль). Она включает проведение медицинского отбора специалистов для работы с генераторами СВЧ-поля, а также постоянное диспансерное наблюдение за работающими. Один раз в год специалисты РЛС проходят комиссионное медицинское обследование, в котором обязательно участвуют терапевт, невропатолог и окулист.

Большую роль в профилактике вредных последствий СВЧ воздействия на организм играет повышение его устойчивости к различным вредным факторам. В первую очередь усилия должны быть направлены на устранение всех причин, вызывающих ослабление организма. Весьма важны, например, своевременная санация хронических очагов инфекции, своевре-

менное и тщательное лечение возникших заболеваний. Рекомендации общего характера сводятся к урегулированию режима труда и отдыха, полноценному регулярному питанию, приему витаминов, особенно «С» и группы «В» и ликвидации вредных привычек. Если имеют место переутомление и нарушение сна, которые играют большую роль в развитии функциональных расстройств сердечно-сосудистой и нервной систем, показано восстановление нормального ритма дежурств и отдыха, прогулки перед сном, легкий спорт. Необходимо в выходные дни и в период очередного отпуска рекомендовать активный отдых с умеренной физической нагрузкой на открытом воздухе, плавание, туризм и т. д. Одной из форм профилактики СВЧ-поражений является пребывание контактирующих с микроволнами лиц в санаториях и домах отдыха.

При хроническом переоблучении легкой степени лечение обычно проводят амбулаторно, при средней и тяжелой степени заболевания — в условиях госпиталя. Применяются симптоматические, общеукрепляющие и тонизирующие средства. Назначают препараты валерианы, поливитамины, при гипотонии — настойку китайского лимонника или женьшеня, а также настойку левзеи (по 10–15 капель 3 раза в день). В госпитальных условиях применяют глютаминовую кислоту по 0,5 три раза в день, внутривенно 40 % раствор глюкозы по 20 мл с аскорбиновой кислотой (5 % раствор 2 мл) и витамином В, (0,6 % 1 мл) на курс 10–15 вливаний; внутримышечно 10 % раствор глюконата кальция по 10 мл 10–15 инъекций. При нарушении сна — барбамил, бромурал. Вместе с ними целесообразно назначать димедрол или пипольфен 2–3 раза в день. При стойкой гипотонии с успехом применяют стрихнин (0,1 % раствор по 0,5 или 1,0 мл подкожно). Умеренная лейкопения проходит без специального лечения. Более стойкая лейкопения требует назначения стимуляторов (пентоксил 0,3 по 1 пор. 3 раза в день или лейкоген по 1 табл. 3 раза в день). Медикаментозная терапия сочетается с физиотерапевтическими процедурами (хвойные и углекислые ванны, гальванический воротник по Щербаку, лечебная гимнастика и др.).

При остром воздействии СВЧ-поля первым мероприятием должно быть удаление пострадавшего из зоны облучения. Патогенетического лечения не существует. Назначается симптоматическая терапия в зависимости от тяжести поражения и клинических проявлений. Ведется борьба с острыми нарушениями сердечно-сосудистой системы, кровотечениями и другими нарушениями.

ГЛАВА 5

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. Организационные мероприятия защиты от электромагнитного излучения

Организационные мероприятия при проектировании и эксплуатации оборудования, являющегося источником ЭМП или объектов, оснащенных источниками ЭМП, включают:

- 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;
- проведение ремонта оборудования, являющегося источником ЭМП, вне зоны влияния ЭМП от других источников (по возможности);
- соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП.

Защита временем применяется, когда нет возможности снизить интенсивность излучения в данной точке до предельно допустимого уровня. В действующих ПДУ предусмотрена зависимость между интенсивностью ППЭ и временем облучения.

Защита расстоянием применяется, если невозможно ослабить ЭМП другими мерами, в том числе и защитой временем. Защита расстоянием положена в основу зон нормирования излучений для определения необходимого разрыва между источниками ЭМП и жилыми домами, служебными помещениями и т. п. Для каждой установки, излучающей электромагнитную энергию, должны определяться санитарно-защитные зоны в которых интенсивность ЭМП превышает ПДУ. Границы зон определяются расчетным путем для каждого конкретного случая размещения излучающей установки при работе их на максимальную мощность излучения и контролируются с помощью приборов. В соответствии с ГОСТ 12.1.026-80 зоны излучения ограждаются либо устанавливаются предупреждающие знаки с надписями: «Не входить, опасно!».

5.2. Инженерно-технические методы и средства защиты от ЭМИ

Инженерно-технические мероприятия должны обеспечивать снижение уровней ЭМП на рабочих местах путем внедрения новых технологий и применения средств коллективной и индивидуальной защиты (когда фактические уровни ЭМП на рабочих местах превышают ПДУ, установленные для производственных воздействий).

Руководители организаций для снижения риска вредного влияния ЭМП, создаваемого средствами радиолокации, радионавигации, связи, в том числе подвижной и космической, должны обеспечивать работающих средствами индивидуальной защиты.

Инженерно-технические защитные мероприятия строятся на использовании явления экранирования ЭМП непосредственно в местах пребывания человека либо на мероприятиях по ограничению эмиссионных параметров источника поля. Последнее, как правило, применяется на стадии разработки изделия, служащего источником ЭМП.

Радиоизлучения могут проникать в помещения, где находятся люди, через оконные и дверные проемы. Для экранирования смотровых окон, окон помещений, застекления потолочных фонарей, перегородок применяется металлизированное стекло, обладающее экранирующими свойствами. Такое свойство стеклу придает тонкая прозрачная пленка либо окислов металлов, чаще всего олова, либо металлов — медь, никель, серебро и их сочетания. Пленка обладает достаточной оптической прозрачностью и химической стойкостью. Будучи нанесенной на одну сторону поверхности стекла она ослабляет интенсивность излучения в диапазоне 0,8–150 см на 30 дБ (в 1 000 раз). При нанесении пленки на обе поверхности стекла ослабление достигает 40 дБ (в 10 000 раз).

Для защиты населения от воздействия ЭМИ в строительных конструкциях в качестве защитных экранов могут применяться металлическая сетка, металлический лист или любое другое проводящее покрытие, в том числе и специально разработанные строительные материалы. В ряде случаев достаточно использования заземленной металлической сетки, помещаемой под облицовочный или штукатурный слой. В качестве экранов могут применяться также различные пленки и ткани с металлизированным покрытием. В последние годы в качестве радиоэкранирующих материалов получили распространение металлизированные ткани на основе синтетических волокон. Их получают методом химической металлизации (из растворов) тканей различной структуры и плотности. Существующие методы получения позволяют регулировать количество наносимого металла в диапазоне от сотых долей до единиц мкм и изменять поверхностное удельное сопротивление тканей от десятков до долей Ом. Экранирующие текстильные материалы обладают малой толщиной, легкостью, гибкостью; они могут дублироваться другими материалами (тканями, кожей, пленками), хорошо совмещаются со смолами и латексами.

Эффективность средств защиты определяется по степени ослабления интенсивности ЭМП, выражающейся коэффициентом экранирования (коэффициент поглощения или отражения), и должна обеспечивать снижение уровня излучения до безопасного в течение времени, определяемого назначением изделия. Оценка безопасности и эффективности средств защиты

должна производиться в испытательных центрах (лабораториях), аккредитованных в установленном порядке. Контроль эффективности коллективных средств защиты на рабочих местах должен производиться в соответствии с техническими условиями, но не реже 1 раза в 2 г.; индивидуальных средств защиты — не реже 1 раза в год.

5.3. Радиопоглощающие материалы и радиопоглощающие покрытия

Области применения композитных РПМ и РПП разнообразны. Композитные радиогерметизирующие уплотнители и СВЧ-абсорберы предотвращают утечку электромагнитной энергии из радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивая помехоустойчивость. Они служат для защиты от СВЧ-излучения операторов РЛС, радиофизических приборов и другого радиотехнического оборудования, пользователей ЭВМ, бытовых микроволновых печей, сотовых телефонов и т. п. Также РПМ являются эффективным средством борьбы с паразитной интерференцией радиоволн, переотраженных от соседних объектов. РПМ нашли применение в качестве функциональных элементов СВЧ-устройств: оконечных нагрузок и аттенуаторов в волноводных и коаксиальных линиях; радиопоглощающих нагрузок зеркальных антенн, задающих требуемый закон распределения отражаемого сигнала по апертуре, элементов антенных обтекателей, переключателей и т.п. Новая область использования ЭМЭ — защита средств электронной обработки и передачи информации от несанкционированного доступа. РПМ и РПП применяются для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами. При взаимодействии ЭМИ с РПМ происходят одновременные процессы поглощения, рассеяния (вследствие структурной и геометрической неоднородности материала) и интерференции радиоволн.

Различие между РПМ и РПП условно и предполагает, что первые входят в состав конструкции объекта, а вторые наносятся на его поверхности. Условность разделения связана и с тем обстоятельством, что любой РПМ является не только материалом, но микроволновым устройством-поглотителем. Способность материала поглощать высокочастотное излучение зависит от его состава и структуры. РПМ и РПП не обеспечивают поглощения излучения в широком диапазоне частот, а характеризуется лучшей поглощающей способностью при определенных частотах ЭМИ. Не существует универсального поглощающего материала, приспособленного для поглощения ЭМИ во всем частотном диапазоне.

Существует заблуждение относительно того, что в результате применения РПМ объект становится невидимым для радиолокаторов. В действительности, применение РПМ способно лишь существенно снизить эффективную поверхность рассеяния объекта в конкретном диапазоне частот РЛС, что не обеспечивает полную невидимость объекта при иных частотах

ЭМИ. РПМ являются лишь слагаемым обеспечения низкой заметности объекта, среди которых: конфигурация летательного аппарата; конструктивно-компоновочные решения; широкое применение композиционных материалов, отсутствие собственных излучений и т. п.

В настоящее время разработана и находит применение на объектах, проектируемых по технологии Stealth, гамма композитных РПМ. Наиболее перспективными по технологическим, эксплуатационным и экономическим критериям являются РПМ на основе полимерных композитов. Широкая номенклатура подобных материалов предназначена для различных сфер технического приложения. В совершенствовании техники радиопоглощения особая роль принадлежит композитным материалам на основе термопластов. Такие материалы не только сочетают свойства входящих в них ингредиентов, но и приобретают новые свойства, не присущие отдельным компонентам. Достоинство композитных РПМ на основе термопластов состоит в сочетании высокой химической стойкости, удовлетворительных механических свойств с технологичностью переработки и низкой стоимостью. Наиболее распространенными связующими таких РПМ являются полиолефины — высокомолекулярные углеводороды алифатического ряда, получаемые полимеризацией соответствующих олефинов. Типичные представители этой подгруппы — полиэтилен, полипропилен и их многочисленные сополимеры.

Композитные материалы классифицируют по природе полимерного связующего, наполнителя и структурным признакам. Необходимое условие достижения материалом заданного уровня радиотехнических параметров — наличие в его составе компонентов, обеспечивающих потери СВЧ-энергии. К числу таких компонентов относят диэлектрические, электропроводящие, магнитные и комбинированные наполнители.

Согласно литературным данным, типовыми наполнителями РПМ являются:

1) электропроводящие порошкообразные материалы (уголь, сажа, графит, металлы — сталь, чугун, железо, алюминий, кобальт, свинец, цинк, олово, медь и др., соли металлов) со сферической, цилиндрической, чешуйчатой и др. формой частиц;

2) проводящие углеродные, металлические и металлоуглеродные волокна, углеткани, металлические нити, пластинки, полоски фольги, обрезки проволоки, сетки сложной формы, решетки, резонансные элементы в виде крестообразных диполей или замкнутых проводников (колец) и т. п.;

3) металлизированные углеродные и полимерные волокна, ткани, пленки, макросферы;

4) магнитные наполнители — ферриты различного химического состава (преимущественно магнитно-мягкие), а также магнитные порошки металлов и аморфных сплавов (Fe, Ni, сплавы Fe-Co-Ni; пермаллой и др.);

5) дисперсные полупроводники — оксиды, карбиды и сульфиды металлов, карбид кремния, сегнетокерамика, обугленные кремнийорганические ткани и волокна;

6) диэлектрики, в частности, легко поляризуемые органические вещества (соли ретинила Шиффа), биополимеры (хитин) и т. п.

5.4. Электромагнитные экраны

Экранирование ЭМИ является основой электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности. ЭМЭ — эффективное средство защиты биологических объектов от негативного влияния СВЧ-излучения, а также препятствует утечке информации по техническим каналам. Актуальны проблемы электромагнитного терроризма и промышленного шпионажа. Понятие «защита коммерческой тайны» можно определить как комплекс организационных и технических мер, проводимых в целях предотвращения хищения, умышленной передачи, уничтожения и несанкционированного доступа к информации либо утечки данных.

В современном мире наряду с бурно развивающейся техникой все острее становится проблема формирования электромагнитной обстановки, обеспечивающей нормальное функционирование электронных устройств и экологическую безопасность. Электромагнитная обстановка представляет собой совокупность ЭМП в заданной области пространства, которая может влиять на функционирование конкретного радиоэлектронного устройства или биологического объекта. Для создания благоприятной электромагнитной обстановки и для обеспечения требований электромагнитной безопасности объекта, которая включает в себя и противодействие несанкционированному доступу к информации с использованием специальных технических средств, производится экранирование ЭМИ. Применение качественных ЭМЭ позволяет решать многие задачи, среди которых защита информации в помещениях и технических каналах, задачи электромагнитной совместимости оборудования и приборов при их совместном использовании, задачи защиты персонала от повышенного уровня ЭМП и обеспечение благоприятной экологической обстановки вокруг работающих электроустановок и СВЧ-устройств.

Под экранированием в общем случае понимается как защита приборов от воздействия внешних полей, так и локализация излучения каких-либо средств, препятствующая проявлению этих излучений в окружающей среде. В любом случае $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$ — это степень ослабления составляющих поля (электрической или магнитной), определяемая как отношение действующих значений напряженности полей в данной точке пространства при отсутствии и наличии ЭМЭ.

Теоретическое решение задачи экранирования, определение значений напряженности полей в общем случае чрезвычайно затруднительно, поэтому в зависимости от типа решаемой задачи представляется удобным рассматривать отдельные виды экранирования: электрическое, магнито-

статическое и электромагнитное. Последнее является наиболее общим и часто применяемым, так как в большинстве случаев экранирования приходится иметь дело либо с переменными, либо с флуктуирующими и реже — действительно со статическими полями.

Теоретические и экспериментальные исследования ряда авторов показали, что форма ЭМЭ незначительно влияет на его эффективность. Главным фактором, определяющим качество экрана, являются радиофизические свойства материала из которого изготовлен ЭМЭ, а также его конструкционные особенности. Это позволяет при расчете эффективности ЭМЭ в реальных условиях пользоваться наиболее простым его представлением: сфера, цилиндр, плоскопараллельный лист и т. п. Такая замена реальной конструкции не приводит к сколько-нибудь значительным отклонениям реальной эффективности от расчетной, так как основной причиной ограничивающей достижение высоких значений $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$ является наличие в экране технологических отверстий (устройства ввода-вывода, вентиляции), а в экранированных помещениях — устройств жизнеобеспечения, связывающих помещение с внешней средой.

Большинство исследователей прибегают к разделённому рассмотрению $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$ по поглощению и отражению падающей волны экраном. Часто применяют приближенный анализ, основанный на представлении $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$ как суммы отдельных составляющих (формула 2):

$$K = K_{\text{погл}} + K_{\text{отр}} + K_{\text{н.отр}} \quad (2)$$

где $K_{\text{погл}}$ — эффективность экранирования вследствие поглощения ЭМЭ электрической энергии;

$K_{\text{отр}}$ — эффективность экранирования за счет отражения ЭМВ экраном;

$K_{\text{н.отр}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий многократные внутренние переотражения ЭМВ от поверхностей экрана.

К настоящему времени сформировалась широкая номенклатура ЭМЭ многообразных конфигураций и структуры. В них используются различные типы связующего и функционального наполнителя, отличающиеся по физико-химическим и структурным характеристикам, вплоть до уникальных (соли ретинила Шиффа, биополимеры (хитин), сегнетомагнетики, кримальные микроэлементы, нанотрубки на основе фуллеренов, а также электропроводящие полимеры — полианилин и полипиррол). Тем не менее до сих пор не существует универсального высокоэффективного поглотителя энергии ЭМИ в широкой полосе СВЧ при удовлетворительных размерных, физико-механических и других эксплуатационных характеристиках.

5.5. Физические механизмы взаимодействия СВЧ-излучения с радиопоглощающим материалом и электромагнитном экраном

Основной задачей при разработке ЭМЭ является оптимизация их конфигурации, размеров, состава и структуры для обеспечения требуемого

коэффициента отражения электромагнитных волн в заданном диапазоне частот при минимальных толщине и массе материала.

В общем случае снижение энергии отраженной ЭМВ обусловлено не только ее рассеянием под разными углами в результате взаимодействия со структурными неоднородностями материала и гашением за счет интерференции при переотражениях на границах раздела сред. Оно вызвано главным образом поглощением электромагнитной энергии вследствие присутствия РПМ диэлектрических и магнитных потерь, а также переходом ее в другие виды энергии, в частности, в тепловую.

Для того, чтобы РПМ эффективно поглощал и мало отражал ЭМВ в широком диапазоне частот и углов их падения, необходимо выполнить два противоречивых условия:

1) волновое сопротивление РПМ должно быть согласовано со «свободным пространством» так, чтобы на границе двух сред отражение было минимально и падающая волна максимально проходила внутрь материала;

2) энергия волны, прошедшей в материал, должна им поглотиться.

Способность материала поглощать ЭМИ зависит от его электрических и магнитных свойств. Наиболее информативными характеристиками реакции среды на воздействие внешнего ЭМП являются частотные дисперсии комплексных величин диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь (формулы 3, 4 5, 6).

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega), \quad (3)$$

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) + i\mu''(\omega), \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \varepsilon''(\omega) / \varepsilon'(\omega), \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta_m(\omega) = \mu''(\omega) / \mu'(\omega), \quad (6)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота;

ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемость материала;

$\operatorname{tg} \delta$ и $\operatorname{tg} \delta_m$ — тангенсы углов диэлектрических и магнитных потерь.

Поглощение энергии ЭМВ, падающей на РПМ, обусловлено следующими основными причинами:

1) джоулевыми потерями, вызванными истинно омической проводимостью компонентов материала;

2) явлениями естественного ферромагнитного резонанса — в феррокомпозитах;

3) потерями, обусловленными инерционностью поляризации и намагничивания РПМ под действием внешнего переменного поля;

4) вихревыми токами — в композитах, содержащих электропроводящие компоненты.

5.6. Параметры и методы оценки функциональных свойств радиопоглощающих материалов и электромагнитных экранов

Свойство ЭМЭ поглощать энергию СВЧ-излучения характеризуют следующими наиболее часто употребляемыми количественными параметрами:

- модулем коэффициента отражения R при падении плоской ЭМВ на поверхность ЭМЭ (при разных углах падения в широкой полосе частот);
- удельной поглощаемой мощностью ЭМИ P (Вт/см²);
- уровнем ослабления энергии ЭМВ при ее прохождении через ЭМЭ (эффективностью экранирования $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$) по электрическому (\mathcal{E}_E) и магнитному (\mathcal{E}_H) полям (формулы 7 и 8).

$$\mathcal{E}_E = 20\lg(E_1/E_2) \text{ (дБ)}, \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_H = 20\lg(H_1/H_2) \text{ (дБ)}, \quad (8)$$

где E_1, H_1 и E_2, H_2 — напряженности электрического и магнитного полей в данной точке пространства при отсутствии радиопоглощающего экрана и при его наличии, соответственно.

Значение коэффициента отражения (R) измеряют методами рефлектометрии, то есть путем анализа отраженного от поверхности ЭМЭ СВЧ-сигнала. Эти методы обеспечивают достаточную точность и надежность измерений. Для определения величины R анализируют электромагнитные параметры:

а) стоячей волны, образующейся в волноводах и коаксиальных линиях в результате интерференции нормально падающей на образец и отраженной ЭМВ;

б) отраженного сигнала при разных углах падения на образец плоской ЭМВ в свободном пространстве.

По одному из вариантов метода (а), образец ЭМЭ, расположенный на металлической подложке, помещают в волновод прямоугольного сечения. Размеры последнего должны удовлетворять условию $d < \lambda < 2d$, где λ — длина ЭМВ, d — размер большей стороны прямоугольного сечения волновода. В волноводе формируется плоская (поперечная) ЭМВ, источником которой является СВЧ-генератор. Векторы напряженностей \mathbf{E} и \mathbf{H} в такой волне перпендикулярны друг другу и направлению ее распространения (продольная составляющая ЭМП отсутствует), причем вектор \mathbf{E} направлен параллельно меньшей стороне сечения волновода. При суперпозиции падающей и отраженной от образца волн образуется стоячая волна с присущим ей пространственным распределением ЭМП, которое характеризуется отношением максимума изменяющейся интенсивности электрического поля (E_{\max}) к ее минимуму (E_{\min}). Этот параметр называется коэффициентом стоячей волны по напряжению (формула 9).

$$КСВ_n = E_{\max}/E_{\min} \quad (9)$$

Он связан с модулем комплексного коэффициента отражения ЭМЭ соотношением 10.

$$R (\%) = (KCB_H - 1) \times 100 / (KCB_H + 1) \quad (10)$$

Принцип работы установки заключается в выделении сигналов, пропорциональных мощности отраженной и падающей волн и измерении их отношения, которое равно квадрату R . Индикаторная шкала прибора градуирована в величинах KCB_H .

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

1. Лабораторная работа «Оценка уровня электромагнитного фона»

Длительное и регулярное воздействие ЭМИ СВЧ-диапазона на биологические объекты провоцирует образование опухолей, негативно влияет на мозг, зрение, лимфатическую и кровеносную системы. ЭМИ создают своеобразные «электромагнитные ванны», которые человечество ежедневно принимает. Необходимо проводить измерения ЭМИ, ведь только они способны предоставить информацию о существующей ситуации и помогут правильно организовать деятельность по снижению воздействия ЭМИ.

Цель работы. Измерение уровня электромагнитного фона в помещениях с расположенными в них радио- электронными приборами — источниками электромагнитных полей и излучений.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- ознакомить студентов с потенциально опасными источниками электромагнитных полей и излучений;
- рассмотреть способы измерения электромагнитного фона;
- измерить напряженность электрического поля;
- измерить напряженность магнитного поля;
- измерить плотность потока энергии при различном удалении от функционирующих радиоэлектронных приборов;
- методом сравнения полученных результатов измерений с данными СанПиН, включенных в руководство по эксплуатации измерителя электромагнитного фона, оценить степень опасности при использовании приборов и нахождении человека в данном помещении.

Приборы и оборудование. Измеритель уровня электромагнитного фона АТТ-2592 с 3-канальным датчиком (Россия) использован для измерения излучений создаваемых беспроводными средствами связи и бытовыми приборами. В качестве объектов исследования выбраны: мобильный телефон стандарта GSM, бытовая микроволновая печь, персональный компьютер, генератор низкочастотных сигналов РГЗ-124.

Описание лабораторной работы

Электромагнитный фон, особенно в офисных помещениях, постоянно меняется. У кого-то зазвонил радиотелефон, сотовый или где-то (например, в со-

седнем помещении) находится другой источник ЭМИ и т. д. Напряженность электрического поля «естественного» фона при выключенных тестируемых устройствах составляет от нескольких единиц до нескольких сотен мВ/м. Именно эти показатели будем считать в дальнейшем за основу для сравнения с показаниями электромагнитного фона при включенных тестируемых устройствах.

Измеритель уровня электромагнитного фона АТТ-2592 снабжен 3-канальным датчиком, позволяющим проводить измерения одновременно по трем осям: X, Y, Z; измерение напряженности электрического поля 20 мВ/м...108 В/м; напряженности магнитного поля 53 мкА/м...286, 4 мА/м; отображение текущего, максимального, среднего и максимального среднего значения. Прибор может применяться для измерения излучений создаваемых беспроводными средствами связи (CW, CDMA, DECT, GSM), радиостанциями, беспроводными устройствами Wi-Fi, микроволновыми печами, телевизорами и мониторами, скрытыми источниками сигнала и другими источниками высокочастотных ЭМИ. Внешний вид измерителя уровня электромагнитного фона АТТ-2592 представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 — Внешний вид измерителя АТТ-2592

Технические характеристики измерителя АТТ-2592:

- метод измерения изотропный;
- датчик 3-канальный;
- диапазон частот — 50 МГц...3, 5 ГГц;
- динамический диапазон — 75 дБ;
- единицы измерения: мВ/м, В/м, мкА/м, mA/м, мкВт/м², мВт/м², мкВт/см²;
- диапазон измерений:
 - а) напряженности электрического поля — 20 мВ/м...108 В/м с разрешением 0, 1 мВ/м;
 - б) напряженности магнитного поля — 53 мкА/м...286, 4 мА/м с разрешением 0, 1 мкА/м;
 - в) плотности потока энергии — 0 мкВт/м²...30, 93 Вт/м² с разрешением 0,001 мкВт/м²;
- отображение текущего, максимального, среднего и максимального среднего значения;
- частота дискретизации 2 раза в секунду;
- автовыключение через 15 мин;

- звуковой сигнал при превышении предельно допустимого уровня;
- память на 99 измерений;
- ЖК-дисплей, 4 цифры;
- подсветка дисплея
- питание 9 В (батарея типа «Крона»);
- габаритные размеры 60 × 60 × 237 мм;
- масса 200 г.

Ход работы

1. Изучить инструкцию по эксплуатации измерителя уровня электромагнитного фона АТТ-2592.

2. Измерить напряженность электрического поля мобильного телефона, СВЧ-печи, компьютера и генератора низкочастотных сигналов при выключенных тестируемых устройствах.

3. Измерить напряженность магнитного поля мобильного телефона, СВЧ-печи, компьютера и генератора низкочастотных сигналов при выключенных тестируемых устройствах.

4. Измерить плотность потока энергии мобильного телефона, СВЧ-печи, компьютера и генератора низкочастотных сигналов при выключенных тестируемых устройствах и при различном удалении от них.

5. Пункты 2–4 выполнить в режиме фиксации максимального значения при включенных тестируемых устройствах.

6. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 — Результаты измерений уровня напряженности электрического поля, магнитного поля и плотности потока энергии тестируемых устройств при различном удалении измерителя от источника

Источники ЭМП и ЭМИ	Расстояние от источника ЭММИ до измерителя, м	Измеряемые параметры		
		напряженность электрического поля, В/м	напряженность магнитного поля, А/м	плотность потока энергии, Вт/м ²
Мобильный телефон	0,0			
	0,05			
	0,30			
	1,0			
СВЧ-печь	0,0			
	0,05			
	0,30			
	1,0			
Компьютер	0,0			
	0,05			
	0,30			
	1,0			
Генератор низкочастотных сигналов	0,0			
	0,05			
	0,30			
	1,0			

7. На основе сравнительного анализа и данных СанПиН сделать выводы о наиболее вредных устройствах с точки зрения излучаемого высокочастотного электромагнитного поля.

Измеритель электромагнитного фона АТТ-2592 является уникальным прибором, благодаря которому любой пользователь может измерить электромагнитную обстановку вокруг себя. Порой достаточно переставить один источник излучения или даже просто развернуть его и ситуация может значительно измениться.

2. Лабораторная работа «Определение мощности источника СВЧ-излучения по измеренным значениям давления пара жидкости»

Цель работы. Измерение мощности СВЧ-печи, затрачиваемой на нагревание фиксированного объема жидкости, относительно ее нагревания классическим способом с контролем температуры и измерением давления пара.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- ознакомить студентов с микроволновым способом нагревания вещества;
- изучить механизмы поглощения энергии веществом;
- вспомнить основные положения термодинамики;
- измерить термодинамические параметры исследуемой жидкости;
- измерить давление пара жидкости как при классическом нагреве, так и при нагреве в СВЧ-печи;
- построить графики зависимости давления пара жидкости от температуры (при классическом нагреве) и давления пара от времени нагревания (в СВЧ-печи);
- соотнести данные, полученные при обоих способах нагревания, и рассчитать мощность СВЧ-источника.

Приборы и оборудование. Электрическая плитка, емкость для нагревания воды, стеклянная трубка в форме спирали с внутренним объемом 100–200 мл, мерный стакан, термометр жидкостный или термopара, U-образный жидкостный манометр, бытовая микроволновая печь. В качестве объектов исследования выбраны невоспламеняющиеся, нетоксичные жидкости с известным значением теплоемкости (вода дистиллированная, глицерин, индустриальное масло).

Описание лабораторной работы

Мощность бытовой микроволновой печи можно определить по времени достижения фиксированной температуры помещенного в камеру вещества с известными термодинамическими параметрами. Сложность измерения температуры в камере СВЧ-печи состоит в том, что приборы для измерения температуры (термopара, болометр, термометр) невозможно располагать внутри рабочей камеры СВЧ, непосредственно в зоне действия микроволн. Применение тепловизора или прибора, основанного на исполь-

зовании ИК-излучения, позволило бы без остановки СВЧ-нагрева определять температуру объекта, но только лишь на его поверхности. А как известно, в микроволновой печи существует градиент температуры по глубине объекта, что неприменимо для нашего исследования.

В лабораторной работе предлагается способ относительного определения температуры исследуемой жидкости, находящейся в трубке в форме спирали и размещенной в камере СВЧ-печи, в любой момент времени по значениям давления пара жидкости, заранее измеренных при классическом нагревании этой же жидкости (в трубке) известной теплоемкости и объема. С использованием физических формул, связывающих такие величины как количество энергии, необходимой для нагревания объема жидкости, коэффициент полезного действия, мощность и время нагревания, рассчитать мощность СВЧ-печи.

Ход работы

1. Заполнить стеклянную трубку, запаянную с одного конца, в форме спирали жидкостью (дистиллированной водой) в объеме 100 мл.

2. Термоизолированной трубкой соединить открытый конец спирали с U-образным жидкостным манометром и поместить спираль в емкость с водой, расположенную на электрической плитке.

3. Включить электрическую плитку и фиксировать изменение давление пара по манометру при нагревании жидкости в трубке через каждые 5 градусов. Нагревание жидкости остановить при достижении температуры 80 °С.

4. Результаты измерений занести в таблицу 2.

5. Построить график зависимости давления пара жидкости от температуры.

6. С использованием формулы 1 рассчитать значение количества теплоты, необходимой для нагревания жидкости от 20 до 80 °С

7. Заполнить спираль водой (100 мл) и поместить ее в камеру СВЧ-печи. Через специальное технологическое отверстие в боковой стенке камеры подсоединить U-жидкостный манометр к свободному концу спирали.

8. Включить СВЧ-нагрев и фиксировать давление каждые 10 с.

9. Результаты измерений занести в таблицу 3.

10. Построить график зависимости давления от времени нагревания в СВЧ-печи.

11. Соотнеся данные, полученные при обоих способах нагревания дистиллированной воды, определить значение температуры в любой момент времени нагревания в СВЧ-печи.

12. По формуле 2 определить энергию, выделяемую СВЧ источником и затрачиваемую на нагревание фиксированного объема воды. Коэффициент полезного действия (КПД) источника СВЧ составляет 70 % (или 0,7).

13. Исходя из времени нагревания фиксированного объема воды до 80 °С определить по формуле 3 мощность источника СВЧ-излучения.

14. Пункты 1–13 выполнить для другой жидкости (глицерина).

15. Сделать выводы по работе.

Таблица 2 — Значения давления паров исследуемой жидкости в зависимости от температуры при классическом способе нагревания

T, °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
P, мм. вод. ст.													

Таблица 3 — Значения давления паров исследуемой жидкости в зависимости от времени нагревания в СВЧ-печи

t, с	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
P, мм. вод. ст.													

$$Q = cm (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где Q — количества теплоты, необходимой для нагревания жидкости от T_1 до T_2 (в Дж);

c — теплоемкость жидкости (для воды $c = 4,18 \times 10^3$ Дж/кг·град);

m — масса жидкости (в кг);

T_1 — начальная температура жидкости (в градусах);

T_2 — конечная температура жидкости при нагревании.

$$\eta = \frac{Q}{W} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где η — коэффициент полезного действия СВЧ источника;

W — энергия, выделяемая СВЧ-источником и затрачиваемая на нагревание фиксированного объема воды (в Дж).

Из формулы 2 необходимо выразить W и подставить в формулу 3.

$$P_{\text{свч}} = \frac{W}{\Delta t}, \quad (3)$$

где Δt — время нагревания воды в СВЧ-печи (от 20 до 80 °C, в секундах).

3. Лабораторная работа «Измерение радиофизических характеристик материалов в СВЧ-диапазоне»

Цель работы. Измерение радиофизических характеристик материалов, преобразующих энергию ЭМИ СВЧ-диапазона.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- ознакомить студентов с современными РПМ и ЭМЭ;
- предложить классификацию РПМ по типу связующего и функционального наполнителя;
- представить информацию о способах формирования РПМ И ЭМЭ;
- изложить принципы построения эффективных ЭМЭ;
- изучить основные механизмы взаимодействия СВЧ-излучения с веществом;
- измерить радиофизические характеристики (коэффициент отражения и ослабление энергии) представленных образцов РПМ.

Приборы и оборудование. Радиофизические характеристики образцов исследуемых материалов измеряем с использованием измерителя КСВ_н и ослабления (P2-50; P2-60; P2-61; P2-65; P2-66; P2-67) в выбранном частотном диапазоне (от 2 до 37,5 ГГц) — в волноводных линиях; в свободном пространстве. Роль индикатора КСВ_н и ослабления выполнял прибор Я2Р-67, входящий в комплект измерителя P2. В качестве исследуемых образцов использованы одинаковые по толщине (от 3 до 10 мм) материалы: металлический лист, полимерный лист (полиэтилен), композиционный материал на основе полиэтилена и магнитно-мягкого феррита, композиционный материал на основе полиэтилена и порошка никеля, а также волокнистый нетканый материал на основе полиэтилена и углеродных нитей. Степень наполнения полимерного материала порошками металла и феррита составляла 50 % по массе.

Описание лабораторной работы

Параметры экранирования и ослабления энергии СВЧ-излучения, проходящего через исследуемые РПМ и ЭМЭ, оцениваем: 1) рефлектометрическим методом по коэффициенту отражения (R) и ослаблению (S) энергии СВЧ-излучения в диапазоне частот 2,0–4,0; 5,6–8,3; 8,3–12,0; 12,0–17,4; 17,4–25,8; 25,8–37,5 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны (ЭМВ) — в волноводных трактах измерителей; 2) в свободном пространстве при различных углах падения ЭМВ.

Измерение КСВ_н и ослабления энергии ЭМИ, падающего на образец в волноводе

Коэффициент отражения (R) и ослабление (S) энергии ЭМИ, падающего на образец РПМ, определяли с использованием измерителя КСВ_н панорамного типа P2. Внешний вид измерителя представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 — Измеритель коэффициента стоячей волны и ослабления панорамный

Измеритель предназначен для измерения и воспроизведения на экране осциллографа частотных характеристик $K_{СВН}$ и степени ослабления ЭМИ в волноводных каналах. Схема измерения $K_{СВН}$ представлена на рисунке 3, а для измерения ослабления — на рисунке 4.

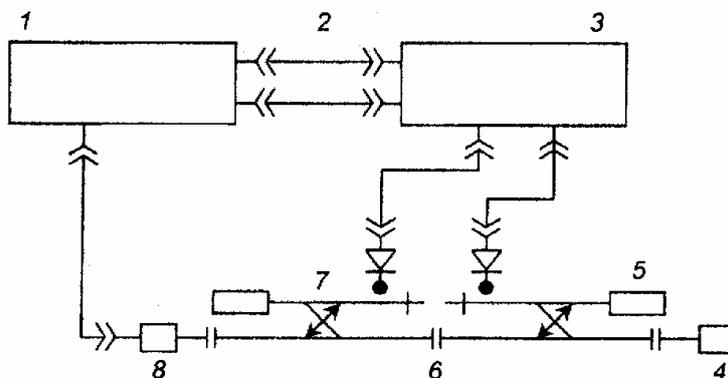


Рисунок 3 — Схема установки для измерения коэффициента отражения электромагнитного экрана в волноводе при нормальном падении электромагнитной волны:

- 1 — генератор СВЧ; 2 — соединительные кабели; 3 — индикатор $K_{СВН}$;
4 — исследуемый образец; 5 и 7 — детекторы отраженной и падающей волн;
6 — волновод; 8 — коаксиально-волноводный переход**

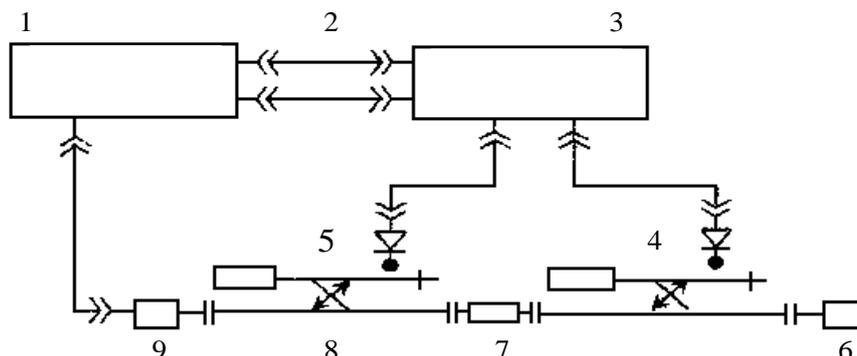


Рисунок 4 — Схема установки для измерения ослабления энергии электромагнитного излучения, проходящего через радиопоглощающий материал в волноводе при нормальном падении электромагнитной волны:

- 1 — генератор СВЧ; 2 — соединительные кабели; 3 — индикатор ослабления энергии; 4 и 5 — детекторы прошедшей и падающей волн;
6 — согласованная нагрузка; 7 — исследуемый образец;
8 — волновод; 9 — коаксиально-волноводный переход**

Работа измерителя основана на принципе рефлектометра — отдельного выделения сигналов, пропорциональных мощности ЭМВ, падающей от генератора и отраженной от измеряемого объекта (при измерении $K_{СВН}$) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления). То есть, детектор выделяет сигнал СВЧ, распространяющийся в одном направлении, и не реагирует на противоположно направленный сигнал. Сигналы, пропорциональные падающей и отраженной мощностям, снимаются с детекторных головок, встроенных во вторичные тракты на-

правленных детекторов. Уровень напряжения на выходе головки направленного детектора падающей волны поддерживается постоянным с помощью системы автоматической регулировки мощности генератора. Уровень напряжения на выходе головки направленного детектора отраженной волны (при условии квадратичного детектирования) пропорционален квадрату коэффициента отражения измеряемой нагрузки на частоте измерения.

Индикатор КСВ_н и ослабления Я2Р-67 позволяет наблюдать на экране электронно-лучевой трубки частотные характеристики КСВ_н и ослабления и производить отсчет измеряемых величин по шкалам отсчетного устройства в автоматическом и ручном режимах перестройки частоты генератора СВЧ. Шкалы индикатора рассчитаны на квадратичность детектирования и проградуированы непосредственно в значениях КСВ_н и ослабления.

Исследуемый образец РПМ прямоугольного сечения помещают в волноводный тракт измерителя, собранного по схеме измерения ослабления или КСВ_н. При неполном отражении в линии, что имеет место при внесении образца РПМ, устанавливается режим, при котором результирующие возмущения можно представить как сумму стоячей и бегущей волн. Степень приближения к режиму стоячей волны в этом случае характеризует коэффициент стоячей волны, численно равный отношению амплитуд напряженностей электрического (магнитного) поля в точках линии, соответствующих пучностям и узлам стоячей волны. Режим стоячей волны может устанавливаться только в отсутствие затухания ЭМВ в образце и при полном отражении от границ волновода.

Для калибровки прибора и измерения КСВ_н использовали короткозамыкатель — металлическую пластину, коэффициент отражения которой принимали равным единице (или 100 %), для измерения ослабления энергии ЭМИ (рисунок 3) использовали согласованную нагрузку как окончательный поглощающий элемент.

Измерение коэффициента отражения ЭМИ падающего на образец в свободном пространстве

Конструкции устройств, применяемых для измерения коэффициента отражения РПМ и ЭМЭ в свободном пространстве, могут отличаться в зависимости от типа используемого оборудования, но методика измерений остается неизменной. Схема измерительной установки представлена на рисунке 5.

Коэффициент отражения плоской ЭМВ от образца РПМ, установленного на металлическую подложку того же размера, измеряют методом сравнения с коэффициентом отражения от собственно металлической подложки. Последний принимают равным единице. Величину затухания мощности отраженного СВЧ-сигнала, которое наблюдают при помещении образца РПМ на металлическую подложку, выражают в децибелах. Установка позволяет варьировать расстояния передающей и приемной антенн от отражающей поверхности, углы падения (φ) и отражения (φ_0). Для сниже-

ния погрешностей, связанных с краевыми эффектами на краях образца, размеры последнего должны быть не менее $(6-10)$ длин волн (λ) и только при минимальных рабочих частотах $(2,5-3)\lambda$.

К косвенным параметрам, которые позволяют судить о степени поглощения СВЧ-излучения образцом РПМ, относятся присущие материалу экрана диэлектрические и магнитные потери. Их оценивают по результатам измерений комплексных величин $\varepsilon(\omega)$ и $\mu(\omega)$. С этой целью, как правило, применяют резонаторные методы.

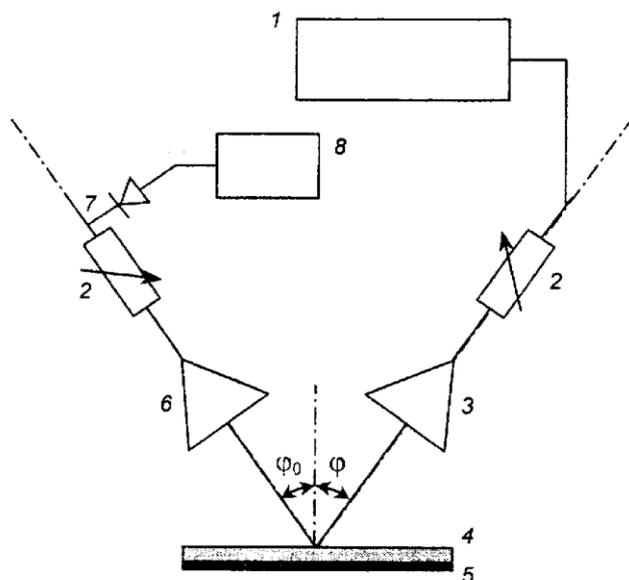


Рисунок 5 — Схема установки для измерения коэффициента отражения электромагнитного экрана в свободном пространстве:
1 — СВЧ-генератор; **2** — аттенюаторы; **3** и **6** — излучающая и приемная рупорные антенны; **4** — исследуемый образец; **5** — металлическая подложка;
7 — детекторный блок; **8** — измерительный усилитель

Ход работы

I. Измерение $K_{СВН}$ в волноводных линиях при нормальном падении ЭМВ

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме на рисунке 3.
2. Включить питание и прогреть измеритель не менее 10 минут.
3. Вместо исследуемого образца (позиция 4 на рис. 3) установить металлическую пластину, включить тумблер генератора СВЧ-излучения и провести калибровку измерителя, совмещая калибровочную прямую с нулевым значением на осциллографе измерителя Я2Р-67.

4. Вырезать скальпелем образцы исследуемых материалов (полимерные и композиционные материалы) в соответствии с поперечным сечением прямоугольного волновода (при использовании измерителя Р2-61, генерирующего ЭМИ частотой 8–12 ГГц, размеры волновода составляют 23×10 мм) с плотным допуском по посадке и установить образец в измерительную ячейку волновода.

5. Установить необходимое значение частоты, включить тумблер СВЧ-генератора и на осциллографе измерителя совместить точки (измеряемую и отсчитываемую по шкале). По шкале измерителя Я2Р-67 зафиксировать значение KCB_H .

6. Провести измерения KCB_H на других частотах СВЧ-генератора с шагом 0,5 ГГц.

7. Результаты измерений значений KCB_H занести в таблицу 4.

8. По формуле (4) определим модуль коэффициента отражения ЭМИ СВЧ-диапазона от поверхности исследуемого материала.

$$R (\%) = (KCB_H - 1) \times 100 / (KCB_H + 1) \quad (4)$$

9. Результаты вычислений коэффициента отражения R занести в таблицу 4.

10. Выполнить пункты 4–9 для всех исследуемых образцов.

11. Построить частотные зависимости коэффициента отражения для всех исследованных образцов (смотри рисунок 6 (пример)).

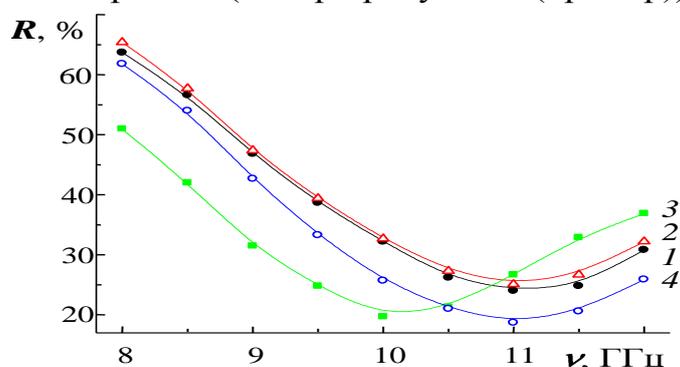


Рисунок 6 — Частотные зависимости коэффициента отражения (R) нормально падающей (в волноводе) плоской электромагнитной волны от поверхности исследуемых образцов

Таблица 4 — Результаты измерений коэффициента отражения и ослабления энергии электромагнитного излучения

№ образца	Частота, ГГц	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
1	KCB_H									
	R , %									
	S , дБ									
2	KCB_H									
	R , %									
	S , дБ									
3	KCB_H									
	R , %									
	S , дБ									
4	KCB_H									
	R , %									
	S , дБ									
5	KCB_H									
	R , %									
	S , дБ									

Внимание! Все работы по сборке установки для измерения коэффициента отражения и ослабления, а также подготовку и расположение образцов в волноводных линиях измерителя производить при выключенном тумблере СВЧ-генератора.

II. Измерение ослабления энергии ЭМИ в волноводных линиях, прошедшего через исследуемый образец

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме на рисунке 4.
2. Включить питание и прогреть измеритель не менее 10 мин.
3. В отсутствие образца в измерительной ячейке (позиция 7 на рис. 4) проконтролировать нулевое положение величины ослабления на шкале измерителя Я2Р-67 при совмещении калибровочных прямых.
4. Установить в ячейку 7 подготовленный исследуемый образец (смотри пункт 4 при выполнении измерений КСВ_н).
5. По шкале измерителя Я2Р-67 определить величину ослабления энергии ЭМИ, проходящего через исследуемый образец.
6. Провести измерения ослабления энергии ЭМИ на других частотах СВЧ-генератора с шагом 0,5 ГГц.
7. Результаты измерений значений ослабления (S) энергии ЭМИ занести в таблицу 4.
8. Выполнить пункты 4–7 для всех исследуемых образцов.
9. Построить частотные зависимости ослабления энергии ЭМИ для всех исследованных образцов (смотри рисунок 7 (пример)).

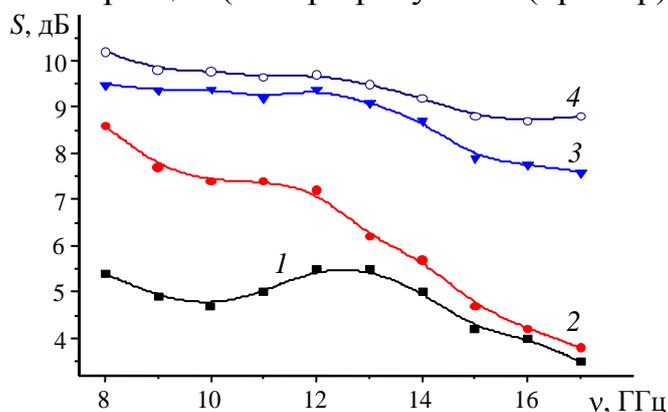


Рисунок 7 — Частотные зависимости ослабления (S) энергии ЭМИ, проходящего (в волноводе) через исследуемые образцы

III. Измерение коэффициента отражения ЭМИ в пространстве при различных углах падения на образец

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме на рисунке 5.
2. Закрепить исследуемый образец (позиция 4) на металлической подложке (позиция 5).
3. Установить угол падения ЭМВ на поверхность исследуемого образца изменяя положения излучающей (3) и приемной (6) рупорных антенн.

4. На детекторном блоке зафиксировать значение коэффициента отражения.
5. Изменяя углы падения измерить коэффициент отражения ЭМИ на разных частотах.
6. Результаты измерений коэффициента отражения R занести в таблицу 5.
7. Выполнить пункты 2–6 для всех исследуемых образцов.
8. Оформить работу и сделать выводы.

Таблица 5 — Результаты измерений коэффициента отражения при различных углах падения электромагнитных волн

№ образца	Частота, ГГц	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
1	φ , градус									
	R , %									
2	φ , градус									
	R , %									
3	φ , градус									
	R , %									
4	φ , градус									
	R , %									
5	φ , градус									
	R , %									

IV. Математическая обработка результатов эксперимента

Провести математическую обработку результатов эксперимента с помощью стандартных компьютерных программ, при принятом допущении о подчинении выборок экспериментальных данных нормальному закону распределения. Расчет статистических величин произвести по формулам 5, 6, 7, 8, 9, 10:

- 1) среднее арифметическое измеряемой величины:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

- 2) средняя квадратичная погрешность единичного результата при измерениях:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

- 3) средняя квадратичная погрешность среднего арифметического:

$$S_{nx} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

4) коэффициент вариации

$$W = \frac{S_n}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (8)$$

5) доверительный интервал для отдельного измерения

$$\Delta \bar{x} = t_{\alpha n} S_{nx} \quad (9)$$

где $t_{\alpha n}$ — коэффициент Стьюдента, определяемый по таблицам;

б) оценка промахов измерений в ряду из n измерений

$$V_{max} = \left| \frac{\bar{x} - x_i}{S_n} \right| \quad (10)$$

При проведении исследований значения измеряемых величин усреднять по 3–5 измерениям. Расчет всех количественных параметров производить с помощью стандартных процедур и функций программного продукта Origin 8.0 и пакета МО Excel с использованием ПЭВМ.

4. Лабораторная работа «Оценка эффективности электромагнитных экранов в СВЧ-диапазоне»

Цель работы. Оценка эффективности защиты от СВЧ-излучения с помощью ЭМЭ, сформированных из различных материалов.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- ознакомить студентов с характеристиками ЭМИ и теорией Максвелла о распространении ЭМВ в веществе;
- изучить механизмы взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона с различными по происхождению материалами;
- ознакомить с нормативными требованиями к уровням ЭМИ СВЧ-диапазона;
- провести измерения интенсивности ЭМИ СВЧ-диапазона от различных источников излучения на различных расстояниях от них и углах поворота;
- оценить эффективность различных ЭМЭ.

Приборы и оборудование. Мобильные телефоны студентов, а также бытовая СВЧ-печь выбраны в качестве источников СВЧ-излучения. Измерительный прибор — мультиметр с датчиками-измерителями плотности потока энергии ЭМИ. В качестве защитных средств от СВЧ-излучения выбраны различные ЭМЭ: металлический лист, сетка с размерами ячеек 5 мм, сетка с размерами ячеек 1 мм, полимерный лист (полиэтилен), композиционный материал на основе полиэтилена и магнитно-мягкого феррита, а также волокнистый нетканый материал на основе полиэтилена и углеродных нитей.

Описание лабораторной работы

Схема установки представлена на рисунке 8. На лабораторном столе размещаются источник ЭМИ на вращающемся диске с нанесенной шкалой угла поворота, держатель датчика-измерителя плотности потока энергии,

перемещаемый относительно источника ЭМИ по высоте и удалению, защитный ЭМЭ и мультиметр. На поверхность стола нанесена измерительная миллиметровая сетка.

Из микроволновой печи предварительно удаляется поворачивающийся столик, а в качестве нагрузки используется огнеупорный шамотный кирпич, устанавливаемый на неподвижную подставку. Передняя панель СВЧ-печи является участком наиболее интенсивного излучения.

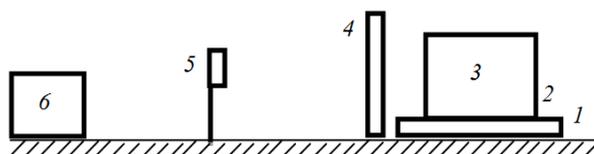


Рисунок 8 — Схема лабораторной установки для измерения интенсивности электромагнитного излучения:

1 — лабораторный стол; 2 — поворотный диск; 3 — источник СВЧ-излучения; 4 — ЭМЭ; 5 — датчик измерителя интенсивности ЭМИ; 6 — мультиметр

Датчики выполнены в виде полуволнового вибратора на частоты 2,45 ГГц, закрепленного на диэлектрической стойке с возможностью перемещения по вертикали. Узлы установки сменных защитных ЭМЭ обеспечивают их оперативную установку и замену. Сменные экраны имеют один типоразмер, но сформированы из различных материалов.

Мультиметр располагается на свободной части лабораторного стола (за пределами координатной сетки).

Технические характеристики лабораторной установки:

1) диапазон плотности потока энергии ЭМИ в изучаемой зоне СВЧ-печи — от 0 до 120 мкВт/см²;

2) диапазон плотности потока энергии ЭМИ в изучаемой зоне мобильного телефона — от 0 до 10 мкВт/см²;

3) соотношение показаний мультиметра и измерителя плотности потока энергии — 1 мкА соответствует $0,35 \pm 0,04$ мкВт/см²;

4) значения перемещений датчика относительно источника СВЧ-излучения:

- по удалению от источника — не более 500 мм,

- по оси высоте — от 0 до 250 мм;

5) угол поворота вращающегося диска с источником ЭМИ — от 0 до 360 градусов;

6) количество сменных защитных ЭМЭ — 6, в том числе:

- экран из металлического листа;

- экран из металлической сетки с шагом 1 мм;

- экран из металлической сетки с шагом 5 мм;

- экран из полиэтиленового листа;

- экран из композиционного материала на основе полиэтилена и магнитно-мягкого феррита;

— экран из волокнистого нетканого материала на основе полиэтилена и углеродных нитей;

7) размеры экранов: высота 330 ± 5 мм, ширина 500 ± 5 мм;

8) потребляемая мощность СВЧ-печи – не более 1200 Вт;

9) цена деления шкал по осям x и z — 10 ± 1 мм;

10) цена деления поворотного диска — 10 ± 1 градус;

11) режим работы СВЧ-печи:

— продолжительность работы не более 5 мин;

— продолжительность перерыва между рабочими циклами не менее 30 с;

— уровень мощности 100 %;

12) режим работы мобильного телефона:

— в режиме ожидания (произвольно по длительности);

— в режиме приема-передачи сигнала — не более 30 с.

Данная установка позволяет ознакомиться с методами измерения ЭМИ СВЧ-диапазона, а также изучить методы защиты от радиоизлучения при работе с устройствами и аппаратами, содержащими СВЧ-генератор. Установка позволяет определить зависимости плотности потока ЭМИ СВЧ-диапазона от расстояния до источника СВЧ и угла поворота, определить экранирующие свойства различных материалов.

Ход работы

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме, представленной на рисунке 8.

2. Выбрать несколько фиксированных точек расположения датчика-измерителя плотности потока энергии ЭМИ.

3. Измерить плотность потока энергии в выбранных точках без защитного экрана при включенном источнике СВЧ-излучения.

4. Результаты измерений интенсивности ЭМИ без защитного экрана занести в таблицу 6.

Таблица 6 — Результаты измерений интенсивности излучения

Номер измерения	Координата x , см	Координата z , см	Угол поворота измерителя относительно источника, градусы	Интенсивность излучения	
				показания мультиметра, мкА	плотность потока энергии, мкВт/см ²
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

5. Установить один из предложенных ЭМЭ и измерить ППЭ в выбранных точках.

6. Поочередно проделать эту процедуру со всеми из предложенных в работе ЭМЭ.

7. Результаты измерений интенсивности ЭМИ с защитным экраном занести в таблицу 7.

Таблица 7 — Эффективность экранирования

Номер и материал экрана	Интенсивность излучения (показания мультиметра, мкА)		Эффективность экранирования E, %
	до экранирования	после экранирования	
1			
2			
3			
4			
5			
6			

8. Определить $\mathcal{E}_{\text{ЭКР}}$ для каждого из экранов по формуле 11:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭКР}} = ((I - I_{\text{Э}}) / I) \times 100 \%, \quad (11)$$

где I — показание мультиметра без экрана, мкА;

$I_{\text{Э}}$ — показание мультиметра с экраном, мкА.

9. Оформить работу и сделать выводы.

ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ

1. Индукция однородного магнитного поля $B = 2$ Тл. Найти напряженность магнитного поля.

Решение: магнитная индукция $B = \mu_0 H$; отсюда $H = B / \mu_0 = 1,59$ МА/м.

2. Напряженность однородного магнитного поля длинного соленоида $H = In/l$. Найти магнитную индукцию в железном сердечнике соленоида, если длина соленоида $l = 50$ см, число витков $n = 500$, ток $I = 10$ А. Магнитная проницаемость железа $m = 5000$.

Решение: магнитная индукция $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu In/l = 62,8$ Тл.

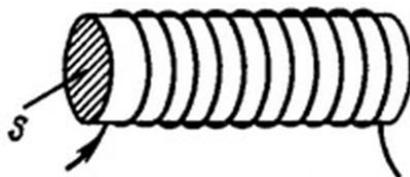
3. Найти магнитную проницаемость железа, если напряженность магнитного поля в железе $H = 800$ А/м, а магнитная индукция $B = 5$ Тл.

Решение: магнитная проницаемость $\mu_0 = B / \mu_0 H = 5000$.

4. Найти напряженность H и индукцию B магнитного поля прямого тока в точке, находящейся на расстоянии $r = 4$ м от проводника, если ток $I = 100$ А.

Решение: $H = I / 2\pi r = 4$ А/м; $B = \mu_0 H = \mu_0 I / 2\pi r = 5$ мкТл.

5. Найти магнитную индукцию и магнитный поток через поперечное сечение никелевого сердечника соленоида (рисунок), если напряженность однородного магнитного поля внутри соленоида $H = 25$ кА/м. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 20$ см², магнитная проницаемость никеля $\mu = 200$.



Решение: $B = \mu_0 \mu H = 6,28$ Тл; $\Phi = BS \cos \alpha = BS = 12,56$ мВб.

6. Магнитный поток через поперечное сечение катушки, имеющей $n = 1000$ витков, изменился на величину $\Phi = 2$ мВб в результате изменения тока в катушке от $I_1 = 4$ А до $I_2 = 20$ А. Найти индуктивность L катушки.

Решение: $L = n \Delta \Phi / (I_2 - I_1) = 125$ мГн.

7. Виток площади $S = 2$ см² расположен перпендикулярно к линиям индукции однородного магнитного поля. Найти индуцируемую в витке э.д.с., если за время $t = 0,05$ с магнитная индукция равномерно убывает от $B_1 = 0,5$ Тл до $B_2 = 0,1$ Тл.

Решение: $\varepsilon = - (B_2 - B_1) S / \Delta t = 1,6$ мВ.

8. Какой магнитный поток пронизывал каждый виток катушки, имеющей $n = 1000$ витков, если при равномерном исчезновении магнитного поля в течение времени $t = 0,1$ с в катушке индуцируется э. д. с. = 10 В?

Решение: $\Phi = \varepsilon \Delta t / n = 1$ мВб.

9. Самолет летит горизонтально со скоростью $V = 900$ км/ч. Найти разность потенциалов, возникающую между концами крыльев самолета, если вертикальная составляющая индукции земного магнитного поля $B_0 = 0,5$ мкТл и размах крыльев самолета $l = 12$ м.

Решение: Крылья самолета за время t «заметают» площадь $\Delta S = lV \Delta t$.

Магнитный поток через эту площадь равен $\Delta \Phi = B \cos \alpha \Delta S$,

где $B \cos \alpha = B_0$ — вертикальная составляющая индукции земного магнитного поля (α — угол между вертикалью и направлением магнитной индукции). Разность потенциалов U между концами крыльев самолета равна э. д. с., индуцируемой в металлических крыльях и корпусе самолета при его движении в магнитном поле Земли:

$U = \varepsilon = \Delta \Phi / \Delta t = B_0 l V = 0,15$ В.

10. Какой ток идет через гальванометр, присоединенный к железнодорожным рельсам, при приближении к нему поезда со скоростью $V = 60$ км/ч? Вертикальная составляющая индукции земного магнитного поля $B_0 = 50$ мкТл.

Сопrotивление гальванометра $R = 100$ Ом. Расстояние между рельсами $l = 1,2$ м; рельсы считать изолированными друг от друга и от земли.

Решение: $I = \varepsilon/R = B_0 l V/R = 10$ мкА.

11. Каков диапазон частот радиоволн миллиметрового диапазона (от $\lambda_1 = 1$ мм до $\lambda_2 = 10$ мм)?

Решение: Граничные значения частот диапазона $\nu_1 = c/\lambda_1$ и $\nu_2 = c/\lambda_2$ где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

В результате получим $\nu_1 = 300$ ГГц и $\nu_2 = 30$ ГГц.

12. Найти длину волны рентгеновских лучей, если их частота $\nu = 3 \times 10^9$ ГГц.

Решение: $\lambda = c/\nu = 0,1$ нм.

13. Найти диапазон длин волн генератора, возбуждающего электромагнитные колебания заданной амплитуды и частоты, если он рассчитан на диапазон частот от $\nu_1 = 0,1$ МГц до $\nu_2 = 26$ МГц.

Решение: от $\lambda_1 = c/\nu_1 = 3$ км до $\lambda_2 = c/\nu_2 = 11,6$ м.

14. Какую длину волны электромагнитных колебаний будет принимать радиоприемник, колебательный контур которого имеет конденсатор с емкостью $C = 750$ пФ и катушку с индуктивностью $L = 1,34$ мГн? Найти частоту колебаний контура радиоприемника.

Решение: $\lambda = c/\nu = c \cdot 2\pi\sqrt{LC} = 1,88$ км; $\nu = c/\lambda = 0,159$ МГц.

15. Частота колебаний электромагнитного контура $\nu_0 = 30$ кГц. Какой будет его частота ν , если расстояние между пластинами плоского конденсатора контура увеличить в $n = 1,44$ раза?

Решение: $\nu = \nu_0\sqrt{n} = 36$ кГц.

16. ЭМВ распространяются в некоторой однородной среде со скоростью $C_{cp} = 2 \times 10^8$ м/с. Какую длину волны λ имеют ЭМВ в этой среде, если их частота в вакууме $\nu_0 = 1$ МГц?

Решение: частота колебаний электромагнитной волны при переходе из одной среды в другую не изменяется, поэтому при скорости распространения C_{cp} длина волны λ :

$\lambda = C_{cp}/\nu_0 = 200$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. — Т. 4. — 704 с.
2. Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / А. Исимару. — М.: Мир, 1981. — Т. 1. — 280 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. Я. Г. Ицхоки. — М.: Сов. Радио, 1976. — Т. 1. — 456 с.
4. Стариков, В. Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий / В. Д. Стариков. — М.: Сов. радио, 1972. — 145 с.
5. Панько, С. П. Сверхширокополосная радиолокация / С. П. Панько // Зарубежная радиоэлектроника. — 1991. — № 1. — С. 106–114.
6. Майзельс, Е. Н. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей / Е. Н. Майзельс, В. А. Торгованов. — М.: Сов. радио, 1972. — 232 с.
7. Электромагнитная безопасность человека: сб. ст. / Ю. Г. Григорьев [и др.]; под общ. ред. Ю. Г. Григорьева. — М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. — 150 с.
8. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание / Ю. Г. Григорьев [и др.] — М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. — 152 с.
9. Бецкий, О. В. Миллиметровые волны в биологии и медицине / О. В. Бецкий // Радиотехника и электроника. — 1993. — Т. 38, № 10. — С. 1760–1782.
10. Голант, М. Б. Влияние монохроматических электромагнитных излучений миллиметрового диапазона малой мощности на биологические процессы / М. Б. Голант // Биофизика. — 1986. — Т. 31, Вып. 1. — С. 139–147.
11. Бортновский, В. Н. Эколого-гигиенические основы электромагнитной безопасности: учеб.-метод. пособие / В. Н. Бортновский. — Гомель: ГомГМУ, 2012. — 36 с.
12. Рудаков, М. Л. Модели биологических объектов при исследовании взаимодействий с электромагнитными полями в диапазоне радиочастот / М. Л. Рудаков // Зарубежная радиоэлектроника. — 1998. — № 2. — С. 68–75.
13. Гигиеническая оценка условий труда персонала, обслуживающего средства радиолокации, радионавигации и связи аэропортов гражданской авиации / Л. В. Походзей [и др.] // Электромагнитные поля и здоровье человека. Фундаментальные и прикладные исследования: материалы III Междунар. конф., Москва – Санкт-Петербург, 17–24 сент. 2002 г. — М., 2002. — С. 131.
14. Состояние здоровья специалистов, обслуживающих радиолокационные системы в гражданской авиации / Н. Б. Рубцова [и др.] // Электромагнитные поля и здоровье человека. Фундаментальные и прикладные исследования: материалы III Междунар. конф., Москва – Санкт-Петербург, 17–24 сент. 2002 г. — М., 2002. — С. 132.

15. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях (с изм. № 1 от 02.03.2009).

16. СанПиН 2.2.4.1329-03. Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей.

17. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

18. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов.

19. *Рудаков, М. Л.* Зарубежные гигиенические стандарты на параметры электромагнитных воздействий в диапазоне радиочастот / М. Л. Рудаков // Зарубежная радиоэлектроника. — 1997. — № 8. — С. 56–60.

20. Методические указания. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц–300 ГГц. МУК 4.3.1167-02. М.: Госкомсанэпиднадзор России. — 2002. — 66 с.

21. *Пирумов, В. С.* Новые радиопоглощающие материалы и покрытия / В. С. Пирумов, А. Г. Алексеев, Б. В. Айзикович // Зарубежная радиоэлектроника. — 1994. — № 6. — С. 2–8.

22. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. — Минск.: БГУИР, 2000. — 284 с.

23. *Алексеев, А. Г.* Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность / А. Г. Алексеев, О. М. Гусева, В. С. Семичев. — СПб: НИИХ СПбГУ, 1998. — 296 с.

24. *Макаревич, А. В.* Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ / А. В. Макаревич, В. А. Банный // Материалы, технологии, инструменты. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 24–32.

25. *Ковнеристый, Ю. К.* Материалы, поглощающие СВЧ-излучения / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарева, А. А. Раваев. — М.: Наука, 1982. — 164 с.

26. *Банний, В. А.* Полимерные композитные материалы для защиты биологических объектов от электромагнитных полей и излучений / В. А. Банний, Л. А. Евтухова, В. А. Игнатенко // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. — 2012. — № 5 (74). — С. 87–91.

27. *Банний, В. А.* Электромагнитные экраны как средство решения проблемы электромагнитной безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций / В. А. Банний // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. — 2014. — Т. 9, № 1. — С. 26–33.

28. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур / Цянь Сонгсонг [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. — 2014. — № 4 (21). — С. 40–45.

29. *Иродов, И. Е.* Основные законы электромагнетизма: учеб. пособие для студентов ВУЗов / И. Е. Иродов. — М.: Высшая шк., 1991.

30. *Тарасов, Л. В.* Вопросы и задачи по физике / Л. В. Тарасов, А. Н. Тарасова. — М.: Высшая шк., 1990.

31. *Durney, C. H.* Radiofrequency radiation dosimetry handbook / C. H. Durney, H. Massoudi, M. F. Iskander. — Fourth edition. — Salt Lake City: USAF school of aerospace medicine, 1986.

Учебное издание

Банний Виктор Анатольевич

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА
И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие
для студентов 1 курса всех факультетов
медицинских вузов

Редактор *Т. М. Кожемякина*
Компьютерная верстка *А. М. Терехова*

Подписано в печать 27.03.2015.
Формат 60×84^{1/8}. Бумага офсетная 65 г/м². Гарнитура «Таймс».
Усл. печ. л. 3,7. Уч.-изд. л. 4,01. Тираж 180 экз. Заказ № 6.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/46 от 03.10.2013.
Ул. Ланге, 5, 246000, Гомель.