

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

С. Ш. Залаева, О. А. Рыбка, Д. С. Золотухина

**ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ САНИТАРИЯ
И ГИГИЕНА ТРУДА**

ЧАСТЬ 3

**ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ЛАЗЕРНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ**

Учебное пособие

Белгород
2008

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

С. Ш. Залаева, О. А. Рыбка, Д. С. Золотухина

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ САНИТАРИЯ
И ГИГИЕНА ТРУДА

ЧАСТЬ 3

ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ЛАЗЕРНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Утверждено ученым советом университета в качестве учебного пособия
для студентов специальности 280102– Безопасность технологических
процессов и производств очной формы обучения

Белгород
2008

УДК 658 (07)

ББК 65.247я7

З-22

Рецензенты:

канд. социол. наук, доцент *Н. А. Дорожкин*

канд. техн. наук, доцент *В. Ю. Радоуцкий*

Залаева, С. Ш.

Производственная санитария и гигиена труда: учеб. пособие:
З-22 в 3 ч. – Ч. 3. Ионизирующие излучения, лазерные излучения и
электромагнитные поля / С. Ш. Залаева, О. А. Рыбка, Д. С.
Золотухина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 213 с.

Учебное пособие по дисциплине «Производственная санитария и гигиена труда» подготовлено в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования программы подготовки дипломированных специалистов и научной концепцией в системе «человек – машина – среда обитания». Учебное пособие состоит из трех частей: первая часть – «Производственное освещение. Вибрация»; вторая часть – «Вредные вещества. Производственный шум»; третья часть – «Ионизирующие излучения, лазерные излучения и электромагнитные поля».

Настоящее учебное пособие состоит из трех разделов: ионизирующие излучения, лазерные излучения и электромагнитные поля. Рассмотрены характеристики и источники радиации, лазерных и электромагнитных излучений; их медико-биологическое действие на человека и оценка генетических последствий облучения; методы и способы защиты от их воздействия.

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения специальности 280102 – Безопасность технологических процессов и производств.

Издание публикуется в авторской редакции.

УДК 658 (07)

ББК 65.247я7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2008

Введение

Проблема защиты человечества от действия электромагнитных и ионизирующих излучений (ЭМИ и ИИ) в настоящее время приобретает все более важное значение, т.к. число источников ЭМИ и ИИ растет, возрастают их мощности. В частности, растет использование электронных средств (компьютеров, телевизоров, радиотелефонов, оргтехники, бытовых приборов и т.п.), вместе с тем растет число людей, у которых возникли проблемы со здоровьем, связанные с воздействием электромагнитных и ионизирующих излучений. Все это привело к необходимости постановки и решения одной из актуальных задач – защиты человечества от электромагнитных и ионизирующих воздействий. Появился даже термин «электромагнитное и радиационное загрязнение», который сейчас применяют многие специалисты, считая его своевременным и точно отражающим электромагнитную и радиационную обстановку. Электромагнитное и радиационное загрязнение переходит в разряд глобальных проблем, стоящих перед человечеством.

Для решения этих задач, Генеральная Ассамблея ООН в декабре 1955 года основала Научный комитет по действию атомной радиации (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR). Основной задачей комитета было изучение влияния радиации – вопроса, который тогда занимал всех: каковы воздействующие уровни радиации, ее действие на окружающую среду и опасность для населения возможных излучений, создаваемых любыми источниками радиации, как естественными, так и искусственными, включая радиоактивные осадки.

Радиация смертельно опасна. При больших дозах она вызывает серьезные поражения тканей, а при малых может вызвать рак и индуцировать генетические дефекты, которые, возможно, проявятся у детей и внуков человека, подвергшегося облучению, или у его более отдаленных потомков.

Для основной массы населения самыми опасными источниками радиации являются естественные. Радиация, связанная с развитием атомной энергетики, составляет лишь малую долю радиации, порождаемой деятельностью человека; значительно бóльшие дозы мы получаем от других, вызывающих гораздо меньше нареканий, форм этой деятельности, например от применения рентгеновских лучей в медицине. Кроме того, такие формы повседневной деятельности, как сжигание угля и использование воздушного транспорта, в особенности

же постоянное пребывание в хорошо герметизированных помещениях, к значительному увеличению уровня облучения за счет естественной радиации. Наибольшие резервы уменьшения радиационного облучения населения заключены именно в таких «беспорных» формах деятельности человека.

В отличие от других факторов окружающей среды, «электромагнетизм» используется в производстве и быту, и его невозможно пока заменить на что-либо другое, менее вредное. Большая часть населения (жители промышленных центров, городов) фактически живет в весьма сложном электромагнитном поле, интенсивность которого на несколько порядков превосходит уровень естественного поля и резко отличается по своим характеристикам от полей естественного происхождения. Поскольку радиация и ЭМИ присутствуют повседневно и везде в нашей жизни, необходимы знания о воздействии излучений на человека и защите от них.

Одним из самых замечательных достижений физики второй половины XX века было открытие физических явлений, послуживших основой для создания удивительного прибора – оптического квантового генератора или лазера. Это открытие совершило прорыв в области оптической физики.

Чрезвычайны перспективы применения лазеров для различных технических целей. Лазеры могут быть использованы в локации и навигации, медицине и биологии, в химии и геофизике. Широкое применение найдут лазеры и в промышленной обработке материалов.

Уже сейчас созданы приборы для выполнения различных технологических операций, которые раньше были вообще невыполнимы или крайне затруднены. Создание и внедрение лазеров будет, безусловно, способствовать ускорению научно-технического прогресса, повышению эффективности производства и развитию материально-технической базы нашего общества.

Составители данного учебного пособия последовательно рассмотрели указанные аспекты проблемы защиты человека от действия различных источников излучений, понимание особенностей и опасностей которых обуславливает разработку адекватных мер по обеспечению безопасности жизнедеятельности в современных условиях.

1. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Природа ионизирующих излучений

Ионизирующим излучением называется излучение, которое, проходя через среду, вызывает ионизацию или возбуждение ее молекул. Ионизирующее излучение создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении ядерных частиц в веществе. Оно не воспринимается органами чувств человека, поэтому особенно опасно. Ионизирующее излучение иначе называется радиацией.

Радиоактивность (от лат *radio* – «излучаю», *radius* – «луч» и *activus* – «действенный»), *радиоактивный распад* – явление спонтанного превращения атомного ядра в другое ядро или ядра. Радиоактивный распад сопровождается испусканием одной или нескольких частиц (например, электронов, нейтрино, альфа-частиц, фотонов). Различают естественную и искусственную радиоактивность.

Естественная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, встречающихся в природе.

Искусственная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, полученных искусственным путем через соответствующие [ядерные реакции](#).

Загрязнение производственной среды веществами, являющимися источниками ионизирующего излучения, называется радиоактивным загрязнением.

Радиоактивное загрязнение это форма физического (энергетического) загрязнения, связанного с превышением естественного уровня содержания радиоактивных веществ в среде в результате деятельности человека.

Радиоактивность и сопутствующие ей ионизирующие излучения существовали на Земле задолго до зарождения на ней жизни и присутствовали в космосе до возникновения самой Земли.

Ионизирующее излучение сопровождало и Большой взрыв, с которого началось существование нашей Вселенной около 20 миллиардов лет назад. С того времени радиация постоянно наполняет космическое пространство. Радиоактивные материалы вошли в состав Земли с самого ее рождения.

В 1896 году французский ученый Анри Беккерель обнаружил следы излучения, которые приписал урану.

В 1898 году супруги Кюри установили, что уран после излучения таинственным образом превращается в другие химические элементы. Один из этих элементов супруги назвали полонием в память о родине

Марии Кюри, а еще один – радием, поскольку по-латыни это слово означает, «испускающий лучи». Открытие Беккереля, и исследования супругов Кюри были подготовлены более ранним, очень важным событием в научном мире – открытием в 1895 году рентгеновских лучей; эти лучи были названы так по имени открывшего их немецкого физика Вильгельма Рентгена.

Работами английского физика Э. Резерфорда и Кюри было установлено наличие трех видов радиоактивных излучений – α , β , γ -лучей. Резерфорд и английский физик Ф. Содди указали, что испускание α -лучей сопровождается превращением химических элементов, например, превращением радия в радон.

В 1934 году французские физики И. и Ф. Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность, т.е. радиоактивность ядер – продуктов ядерных реакций, которая впоследствии приобрела особенно важное значение. Из общего числа (~ 2000) известных радиоактивных нуклидов лишь около 300 – природные, а остальные получены в результате ядерных реакций. Между искусственной и естественной радиацией нет принципиального различия.

Открытие радиоактивности оказало огромное влияние на развитие науки и техники. За работы, связанные с исследованием и применением радиоактивности, было присуждено более 10 Нобелевских премий по физике и химии, в том числе А. Беккерелю, П. и М. Кюри, Э. Ферми, Э. Резерфорду, Ф. и И. Жолио-Кюри, Д. Хевеши, О. Гану, Э. Макмиллану и Г. Сиборгу, У. Либби.

Беккерель один из первых столкнулся с самым неприятным свойством радиоактивного излучения: его воздействию на ткани живого организма. Беккерель положил пробирку с радием в карман и получил в результате ожог кожи. Мария Кюри умерла, по всей видимости, от одного из злокачественных заболеваний крови, поскольку слишком часто подвергалась воздействию радиоактивного излучения. По крайней мере, 336 человек, работавших с радиоактивными материалами в то время, умерли в результате облучения.

Несмотря на это, небольшая группа талантливых и большей частью молодых ученых направила свои усилия на разгадку одной из самых волнующих загадок всех времен, стремясь проникнуть в самые сокровенные тайны материи. К сожалению, результатам их поисков суждено было воплотиться в атомную бомбу в 1945 году.

Взрывы этих бомб в конце Второй мировой войны привели к колоссальным человеческим жертвам. Но практическим воплощением их поисков явилось создание в 1954 году первой промышленной

атомной электростанции в г. Обнинск (СССР). С момента открытия рентгеновские лучи стали применяться в медицине, и сфера их использования все расширяется.

Главным объектом исследования ученых был сам атом, вернее его строение. Атом похож на Солнечную систему в миниатюре: вокруг крошечного ядра движутся по орбитам «планеты» – электроны. Размеры ядра в сто тысяч раз меньше размеров самого атома, но плотность его очень велика, поскольку масса ядра почти равна массе всего атома. Ядро, как правило, состоит из нескольких более мелких частиц, которые плотно сцеплены друг с другом (рис. 1.1.1).

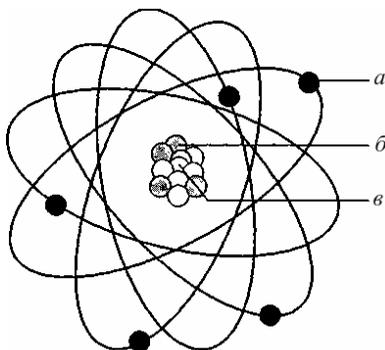


Рис. 1.1.1. Строение ядра:
а – электрон; *б* – протон; *в* – нейтрон

Некоторые из этих частиц имеют положительный заряд и называются *протонами*. Число протонов в ядре и определяет, к какому химическому элементу относится данный атом: ядро атома водорода содержит всего один протон, атома кислорода – 8, урана – 92. В каждом атоме число электронов в точности равно числу протонов в ядре; каждый электрон несет отрицательный заряд, равный по абсолютной величине заряду протона, так что в целом атом нейтрален. В ядре, как правило, присутствуют и частицы другого типа, называемые *нейтронами*, поскольку они электрически нейтральны. Ядра атомов одного и того же элемента всегда содержат одно и то же число протонов, но число нейтронов в них может быть разным. Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, относятся к разным разновидностям одного и того же химического элемента, называемым *изотопами* данного элемента. Чтобы отличить их друг от друга, к символу элемента приписывают число, равное сумме всех частиц в

ядре данного изотопа. Так, уран-238 содержит 92 протона и 146 нейтронов; в уране-235 тоже 92 протона, но 143 нейтрона. Ядра всех изотопов химических элементов образуют группу «нуклидов».

Некоторые нуклиды стабильны, т.е. в отсутствие внешнего воздействия никогда не претерпевают никаких превращений. Большинство же нуклидов нестабильны, они все время превращаются в другие нуклиды. В качестве примера возьмем хотя бы атом урана-238, в ядре которого протоны и нейтроны едва удерживаются вместе силами сцепления. Время от времени из него вырывается компактная группа из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов (α -частица). Уран-238 превращается, таким образом, в торий-234, в ядре которого содержатся 90 протонов и 144 нейтрона. Но торий-234 также нестабилен. Его превращение происходит, однако, не так, как в предыдущем случае: один из его нейтронов превращается в протон, и торий-234 превращается в протактиний-234, в ядре которого содержатся 91 протон и 143 нейтрона. Эта метаморфоза, произошедшая в ядре, сказывается и на движущихся по своим орбитам электронах: один из них становится неспаренным и вылетает из атома. Протактиний очень нестабилен, и ему требуется совсем немного времени на превращение. Далее следуют иные превращения, сопровождаемые излучениями, и вся эта цепочка, в конце концов, оканчивается стабильным нуклидом свинца (см. рис. 1.1.2). Разумеется, существует много таких цепочек самопроизвольных превращений (распадов) разных нуклидов по разным схемам превращений и их комбинациям.

При каждом таком акте распада высвобождается энергия, которая и передается дальше в виде излучения. Можно сказать, что испускание ядром частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов, – это альфа-излучение: испускание электрона, как в случае распада тория-234, – это бета-излучение. Часто нестабильный нуклид оказывается настолько возбужденным, что испускание частицы не приводит к полному снятию возбуждения; тогда он выбрасывает порцию чистой энергии, называемую гамма-излучением (гамма-квантом). Как и в случае рентгеновских лучей (во многом подобных гамма-излучению), при этом не происходит испускания каких-либо частиц.

Весь процесс самопроизвольного распада нестабильного нуклида называется *радиоактивным распадом*, а сам такой нуклид – *радионуклидом*. Но хотя все радионуклиды нестабильны, одни из них более нестабильны, чем другие. Например, протактиний-234 распадается почти моментально, а уран-238 – очень медленно. Половина всех атомов протактиния в каком-либо радиоактивном

источнике распадается за время, чуть большее минуты, в то же время половина всех атомов урана-238 превратится в торий-234 за четыре с половиной миллиарда лет.

Вид излучения	Нуклид	Период полураспада
	Уран-238	4,47 млрд. лет
α	Торий-234	24,1 суток
β	Протактиний-234	1,17 минуты
β	Уран-234	245 000 лет
α	Торий-230	8 000 лет
α	Радий-226	1 600 лет
α	Радон-222	3,823 суток
α	Полоний-218	3,05 минуты
α	Свинец-214	26,8 минуты
β	Висмут-214	19,7 минуты
β	Полоний-214	0,000164 секунды
α	Свинец-210	22,3 года
β	Висмут-210	5,01 суток
β	Полоний-210	138,4 суток
α	Свинец-206	Стабильный

Рис. 1.1.2. Радиоактивный распад ядер

Время, за которое распадается в среднем половина всех радионуклидов данного типа в любом радиоактивном источнике, называется *периодом полураспада* соответствующего изотопа ($T_{1/2}$).

Этот процесс продолжается непрерывно. За время, равное одному периоду полураспада, останутся неизменными каждые 50 атомов из 100, за следующий аналогичный промежуток времени 25 из них распадутся, и так далее по экспоненциальному закону.

Радионуклиды, испуская частицы, превращаются в другие радионуклиды и химические элементы. Их распад происходит с различной скоростью. Скорость распада нуклидов называется активностью.

Активность (A) радиоактивного вещества это число спонтанных (самопроизвольных) ядерных превращений (dN) в единицу времени (dt) (скорость превращения):

$$A = dN / dt .$$

Единица измерения активности в системе СИ – беккерель (Бк). 1 Бк равен одному ядерному превращению в секунду.

Активность чаще выражается во внесистемных единицах – кюри (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Количество распадов в секунду, происходящих в 1 г радия-226 (активность) равна 1 Ки.

При распаде уменьшается количество радионуклида и уменьшается его активность. Закономерность, по которой снижается активность, подчиняется закону радиоактивного распада:

$$A = A_0 e^{-0,69t / T_{1/2}},$$

где A_0 – начальная активность; A – активность через период времени t .

1.2. Основные виды и характеристики ионизирующих излучений

По своей природе ионизирующие излучения подразделяются на корпускулярные и электромагнитные.

Корпускулярное ионизирующее излучение – поток элементарных частиц, с массой покоя отличной от нуля, образующихся при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, либо генерируемых на ускорителях. К нему относятся – альфа-частицы, бета-частицы, нейтроны, протоны, дейтроны.

Альфа-частицы представляют собой поток частиц, являющихся ядрами атома гелия и обладающих двумя положительными единицами заряда. Скорость вылета альфа-частиц из радиоактивного ядра 14000–20000 км/с. Энергия этих частиц, испускаемых различными радионуклидами, в пределах 2–8 МэВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). При этом все ядра радионуклида испускают α -частицы, обладающие одной той же энергией.

Бета-частицы – это поток электронов или позитронов. Скорость их вылета из ядра при радиоактивном распаде близка к скорости света

(250000–27000 км/с). При распаде ядер β -активного радионуклида различные ядра данного радионуклида испускают β -частицы различной энергии, поэтому энергетический спектр бета-частиц непрерывен. Максимальная энергия бета-частиц может достигать 3,0–3,5 МэВ.

При взаимодействии альфа- и бета-частиц с веществом происходит отрыв электрона от атома (ионизация) или перевод электрона с более глубокой, т.е. ближе расположенной к ядру оболочки, на более удаленную (возбуждение атома). Около половины энергии, переданной веществу ионизирующим излучением, в процессе взаимодействия расходуется на ионизацию, а половина на возбуждение.

Для ионизации атому необходимо сообщить энергию, превышающую силы электростатического притяжения электрона к ядру. Она находится в пределах от 4 до 25 эВ для атомов различных химических элементов.

Нейтроны (нейтронное излучение) – нейтральные элементарные частицы, не имеющие электрического заряда. При прохождении через вещество они взаимодействуют различным образом только с ядрами атомов. В результате этих процессов образуются либо заряженные частицы (ядра отдачи, протоны, дейтроны), либо гамма излучения, вызывающие ионизацию. По характеру взаимодействия со средой, зависящему от уровня энергии нейтронов, они условно разделены на 4 группы:

тепловые нейтроны.....	0,0–0,5 КэВ
промежуточные нейтроны.....	0,5–200 КэВ
быстрые нейтроны.....	200КэВ–20МэВ
релятивистские нейтроны.....	свыше 20 МэВ

Протон в химическом смысле является ядром атома водорода (точнее, его легкого [изотопа](#) – [протия](#)) без [электрона](#).

Протоны (вместе с [нейтронами](#)) являются основными составляющими атомных ядер. Порядковый номер [химического элемента](#) в [периодической таблице](#) (и, соответственно, все его химические свойства) полностью определяются [зарядом ядра](#) его атомов, который, в свою очередь, равен количеству протонов в ядре (протонному числу).

Протоны принимают участие в [термоядерных реакциях](#), которые являются основным источником энергии, генерируемой [звёздами](#).

Дейтрон – ядро атома изотопа [водорода дейтерия](#) с [массовым числом](#) $A = 2$. Обозначается ${}^2\text{H}$, D или d . Дейтрон состоит из 1 [протона](#) и 1 [нейтрона](#). Стабилен. Не имеет возбужденных состояний. Дейтрон является очень слабосвязанным ядром, его энергия связи равна лишь

2,22457 [МэВ](#). Это единственное известное ядро, состоящее из двух [нуклонов](#) (то есть единственный [нуклид](#) с массовым числом 2).

Электромагнитные излучения – поток электромагнитных колебаний, распространяющихся в вакууме с постоянной скоростью 300 000 км/с. К нему относятся – гамма- и рентгеновское излучения.

Обладая одной и той же природой, эти виды электромагнитных излучений различаются условиями образования, а так же свойствами: длиной волны и энергией.

Рентгеновское излучение – это электромагнитное излучение высокой частоты и с короткой длиной волны, возникающее при бомбардировке вещества потоком электронов. Представляет собой совокупность тормозного и характеристического излучений, диапазон энергии фотонов которых составляет 1 кэВ–1 МэВ, длина волны от $3 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-10} м.

Тормозное излучение – связано с изменением кинетической энергии заряженных частиц. Имеет непрерывный спектр и возникает в среде, окружающей источник β - излучения, в рентгеновских трубках, в ускорителях электронов и т.п.

Характеристическое излучение – электромагнитное излучение с дискретным спектром, испускаемое при изменении энергетического состояния атома, обусловленного перестройкой внутренних электронных оболочек.

Гамма-излучение – коротковолновое электромагнитное излучение (длина волны менее 10^{-10} м) испускается ядром во время перехода от высокоэнергетического состояния на более низкое, при этом количество протонов и нейтронов в ядре неизменно. Представляет собой поток квантов энергии распространяющихся со скоростью света (300 000 км/с). Не является самостоятельным видом радиоактивности, сопровождает альфа- и бета-распады. Энергия гамма излучения находится в пределах 0,01–3 МэВ

Излучения характеризуются по их ионизирующей и проникающей способности.

Ионизирующая способность излучения определяется удельной ионизацией, т.е. числом пар ионов, создаваемых частицей в единице объема, массы среды или на единице длины пути. Излучение различных видов обладают различной ионизирующей способностью.

Проникающая способность излучений определяется величиной пробега. Пробегом называется путь, пройденный частицей в веществе до ее полной остановки, обусловленной тем или иным видом взаимодействия.

Разные виды излучений сопровождаются высвобождением разного количества энергии и обладают разной проникающей способностью, поэтому они оказывают неодинаковое воздействие на ткани живого организма (рис. 1.2.1).

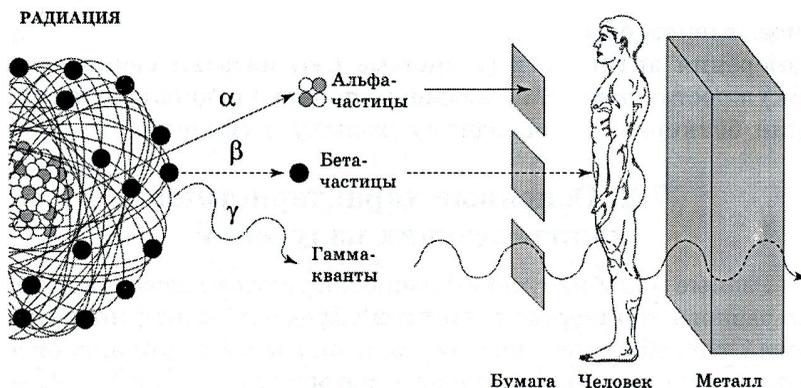


Рис. 1.2.1. Воздействие на человека различных видов излучения

Альфа-частицы обладают наибольшей ионизирующей способностью. Их удельная ионизация изменяется от 25 до 60 тыс. пар ионов на 1 см пути в воздухе. Длина пробега этих частиц в воздухе составляет 2–11 см, в живой ткани – несколько десятков микрометров. Они практически не способны проникнуть через наружный слой кожи, образованный отмершими клетками. Поэтому они не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие α -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или с вдыхаемым воздухом; в этом случае они становятся чрезвычайно опасными. Альфа-частицы поглощаются листом бумаги.

Бета-частицы имеют существенно меньшую ионизирующую способность – около 100 пар ионов на 1 см пути в воздухе, максимальный пробег достигает нескольких метров при больших энергиях: оно проходит в ткани организма на глубину один–два сантиметра.

Гамма- и рентгеновские лучи обладают самой низкой способностью ионизировать среду и самой высокой проникающей способностью (пробег в воздухе составляет несколько сот метров).

Гамма-излучение свободно проходит через тело человека и другие материалы, не сопровождаясь заметным ослаблением, и может создавать вторичное и рассеянное излучение в средах, через которые проходит (например, проходит сквозь слой свинца толщиной 5 см).

1.3. Дозы облучения

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям; количество такой переданной организму энергии называется *дозой*. Дозу излучения организм может получить от любого радионуклида или их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри него (в результате попадания с пищей, водой или воздухом).

Дозы можно рассчитывать по-разному с учетом того, каков размер облученного участка и где он расположен, один ли человек подвергся облучению или группа людей и в течение какого времени это происходило.

Для характеристики поля излучения по ионизирующей способности используется понятие «экспозиционная доза» X :

$$X = \frac{dQ}{dm},$$

где dQ – полный заряд ионов одного знака, возникающих в сухом атмосферном воздухе малого объема (Кл); dm – масса воздуха в этом объеме (кг).

Экспозиционная доза характеризует потенциальную опасность радиации при общем и равномерном облучении тела человека.

Единица экспозиционной дозы в системе СИ – кулон на килограмм (Кл/кг).

Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой 1 кг, производят в воздухе ионы, несущие электрический заряд каждого знака 1 Кл.

Внесистемная единица измерения – рентген (Р):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Рентген – это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 т воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Величина 0,001293 – это масса 1 см³ атмосферного сухого воздуха при нормальных условиях (температура 0 °С и давление 1013 ГПа (760 мм рт. ст)).

Основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

Поглощенная доза излучения D – характеризует меру воздействия ионизирующего излучения на вещество, т.е. количество энергии, поглощенной единицей массы облучаемого вещества:

$$D = \frac{dW}{dm},$$

где dW – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, Дж; dm – масса вещества, кг.

Единица поглощенной дозы в системе СИ – грей (Гр). Грей представляет собой количество энергии ионизирующего излучения, поглощенное единицей массы какого-либо физического тела, например тканями организма, $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Внесистемной единицей поглощенной дозы ионизирующего излучения является рад (рад). Рад равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 г передается энергия ионизирующего излучения, равная 100 эрг , $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$.

В задачах радиационной безопасности при хроническом облучении человека в малых дозах (в дозах, не превышающих 5 предельно допустимых годовых доз при облучении всего тела человека), основной величиной для оценки биологического действия излучения любого состава является эквивалентная доза.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения (H) – это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения W_R :

$$H_{TR} = D_{TR} \cdot W_R,$$

где D_{TR} – средняя поглощенная доза излучения в органе или ткани T , созданная данным видом излучения; W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R , значение которого для различных видов излучений приведены в табл. 1.3.1.

Единица эквивалентной дозы в системе СИ – зиверт (Зв). Зиверт учитывает неодинаковую радиационную опасность для организма разных видов ионизирующего излучения. Один зиверт соответствует поглощенной дозе в 1 Дж/кг (для рентгеновского, γ -, β - излучения).

Внесистемная единица эквивалентной дозы – бэр (биологический эквивалент рад). Бэр – единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 рад рентгеновского или γ -излучения. $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

Таблица 1.3.1

Значение коэффициентов W_R для отдельных видов излучений

Виды излучения	W_R
Фотоны любых энергий	1,0
Электроны и мюоны любых энергий	1,0
Нейтроны с энергией менее 10кэВ (тепловые)	5,0
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2,0 МэВ	20
от 2,0 до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны (кроме протонов отдачи с энергией более) 2,0 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Мощность (M) дозы – доза излучения за единицу времени (секунда, минута, час) экспозиционной дозы (X), поглощенной (D) и эквивалентной дозы (H):

$$\dot{X} = \frac{dQ}{dt}; \quad \dot{D} = \frac{dD}{dt}; \quad \dot{H} = \frac{dH}{dt}.$$

Доза и мощность дозы связаны следующими соотношениями:

$$M(X) = X / t, \text{ Р/с; ммР/ч; мкР/ч;}$$

$$M(D) = D / t, \text{ Гр/с; рад/с;}$$

$$M(H) = H / t, \text{ Зв/с; бэр/с; мкЗв/ч, мбэр/ч и др.,}$$

где $M(X)$, $M(D)$, $M(H)$ – соответственно мощности экспозиционной, поглощенной и эквивалентной доз; t – продолжительность облучения, с (ч).

Как меру риска возникновения отдельных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности вводят «понятие эффективная доза» (E). Риск – вероятность возникновения неблагоприятных последствий для человека (смерть, травматизм, заболевание и т.п.) вследствие облучения, аварии или другой причины, проявление которой носит стохастический характер.

Эффективная доза равна сумме произведения эквивалентной дозы в органе (H_T) на соответствующий взвешивающий коэффициент (W_T):

$$E = H_T W_T,$$

где H_T – эквивалентная доза в ткани T; W_T – взвешивающий коэффициент для ткани T, значения которого представлены в табл. 1.3.2.

Таблица 1.3.2

Значение коэффициентов W_T для различных органов и тканей

Орган или ткань	W_T
Гонады	0,20
Красный костный мозг, легкие, толстый кишечник, желудок	0,12
Молочные железы женщин, щитовидная железа, печень, пищевод, мочевой пузырь	0,05
Клетки костных поверхностей, кожа	0,01
Прочие органы	0,05
$\sum W_T = 1$	

Эффективная доза измеряется в Зв.

Умножив эквивалентные дозы на соответствующие коэффициенты и просуммировав по всем органам и тканям, получим *эффективную эквивалентную дозу*, отражающую суммарный эффект облучения для организма; она также измеряется в зивертах. Эти понятия описывают только индивидуально получаемые дозы. Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы, полученные группой людей, мы приходим к *коллективной эффективной эквивалентной дозе*, которая измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв).

Введено еще одно определение, поскольку многие радионуклиды распадаются очень медленно и останутся радиоактивными и в отдаленном будущем. Коллективную эффективную эквивалентную дозу, которую получают многие поколения людей от какого-либо радиоактивного источника за все время его дальнейшего существования, называют *ожидаемой (полной) коллективной эффективной эквивалентной дозой*.

1.4. Источники радиации

В НРБ–99 (Нормы радиационной безопасности) и ОСПОРБ–99 (Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности) приведена классификация источников ионизирующего излучения, в соответствии с которой они делятся на естественные и искусственные.

1.4.1. Естественные источники радиации

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (рис. 1.4.1). Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды

ионизирующего излучения падают на поверхность Земли из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Человек подвергается облучению двумя способами: внешним и внутренним. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи; в этом случае говорят о *внешнем облучении*. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или в воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют *внутренним*.

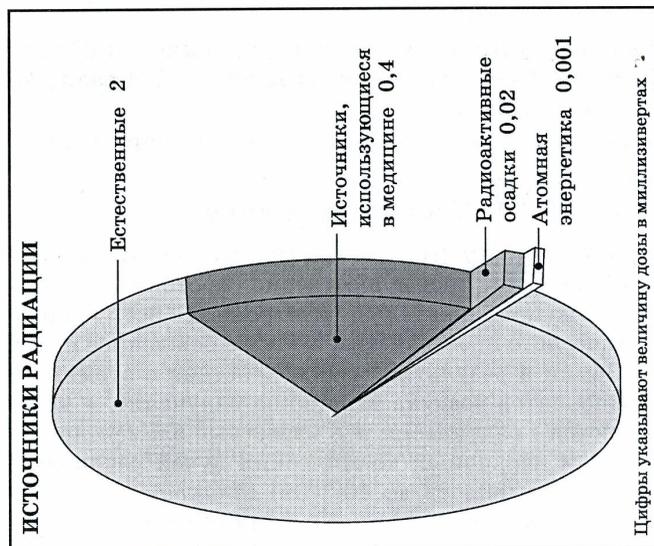
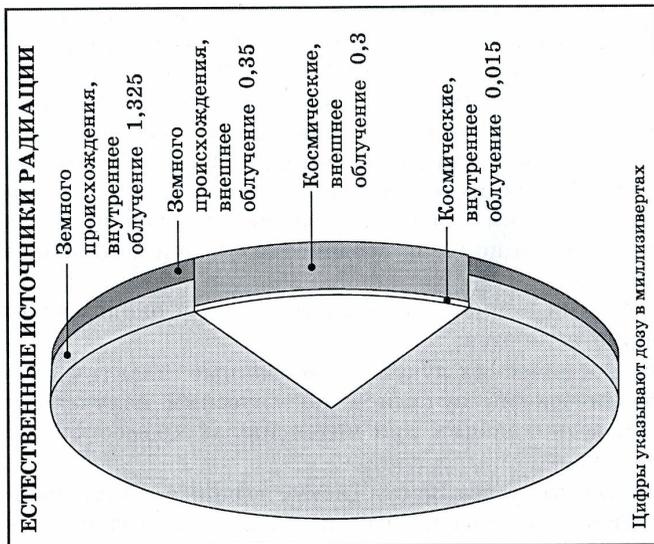
Облучению от естественных источников радиации подвергаются все жители Земли, однако одни из них получают большие дозы, чем другие. Это зависит, в частности, от того, где они живут. Уровень радиации в некоторых местах земного шара, особенно там, где залегают радиоактивные породы, оказывается значительно выше среднего, а в других местах – соответственно ниже. Доза облучения зависит также от образа жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для приготовления пищи, открытых угольных жаровен, герметизация помещений и даже полеты на самолетах – все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников радиации.

Земные источники радиации в сумме ответственны за большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации.

В среднем они обеспечивают более 5/6 годовой эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном вследствие внутреннего облучения. Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения (см. рис. 1.4.1).

Источниками ионизирующих излучений в околоземном пространстве являются:

- потоки космических лучей, образованные галактическими космическими лучами и космическим излучением Солнца, возникающим при интенсивных хромосферных вспышках;
- радиационные пояса Земли (искусственные и естественные), расположенные на расстояниях от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч километров от поверхности Земли;



Средние годовые эффективные эквивалентные дозы облучения от естественных и техногенных источников радиации

Рис. 1.4.1. Источники радиации

– при полетах к некоторым планетам, например, к Юпитеру, космический аппарат может быть подвержен воздействию ИИ радиационных поясов этих планет.

Космические лучи – это поток элементарных частиц высокой энергии, преимущественно протонов, приходящих на Землю приблизительно изотропно со всех направлений космического пространства, а также рожденное ими в атмосфере Земли в результате взаимодействия с атомными ядрами компонентов воздуха вторичное излучение, в котором встречаются практически все известные элементарные частицы. Среди первичных космических лучей различают высокоэнергичные (вплоть до 10^{21} эВ) *галактические* космические лучи (ГКЛ), приходящие к Земле извне Солнечной системы, и *солнечные* космические лучи (СКЛ) «умеренных энергий» (10^{10} эВ), связанные с активностью Солнца.

Существование космических лучей было установлено в 1912 году австрийским физиком В.Ф. Гессом по производимой ими ионизации воздуха. Отклонение их в магнитном поле, которое открыли американский физик Р.Э. Милликен (1923), Д.В. Скобельцын (1927), С.Н. Вернов (1935), доказало, что космические лучи представляют собой поток заряженных частиц.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации (см. рис. 1.4.1). Космические лучи могут достигать поверхности Земли или взаимодействовать с ее атмосферой, порождая вторичное излучение и приводя к образованию различных радионуклидов.

Нет такого места на Земле, куда бы ни падал этот невидимый космический душ. Но одни участки земной поверхности более подвержены его действию, чем другие. Северный и Южный полюсы получают больше радиации, чем экваториальные области, из-за наличия у Земли магнитного поля, отклоняющего заряженные частицы (из которых в основном и состоят космические лучи). Существеннее то, что уровень облучения растет с высотой, поскольку при этом над нами остается все меньше воздуха, играющего роль защитного экрана.

Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космических лучей эффективную эквивалентную дозу около 300 микрозивертов (миллионных долей зиверта) в год; для людей же, живущих выше 2 000 м над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше. Еще более интенсивному, хотя и относительно непродолжительному облучению, подвергаются экипажи и пассажиры самолетов. При подъеме с высоты 4 000 м (максимальная высота, на которой расположены человеческие поселения: деревни шерпов на склонах Эвереста) до 12 000 м (максимальная высота полета трансконтинентальных

авиалайнеров) уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз и продолжает расти при дальнейшем увеличении высоты до 20 000 м (максимальная высота полета сверхзвуковых реактивных самолетов).

При перелете пассажир обычного турбореактивного самолета получает дозу около 50 мкЗв, а пассажир сверхзвукового самолета – на 20 % меньше, хотя подвергается более интенсивному облучению. Это объясняется тем, что во втором случае перелет занимает гораздо меньше времени. Всего за счет использования воздушного транспорта человечество получает в год коллективную эффективную эквивалентную дозу около 2000 чел-Зв.

Естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ) представляют собой внутренние области земной *магнитосферы*, в которых магнитное поле Земли удерживает заряженные частицы (протоны, электроны, альфа-частицы и ядра более тяжелых химических элементов), обладающие высокой кинетической энергией от десятков кэВ до сотен МэВ. Своим существованием эти пояса Земли обязаны наличию у Земли магнитного поля. Магнитное поле Земли захватывает падающие в него заряженные частицы, так что земная магнитосфера оказывается заполненной электронами, протонами, а также ионами разных энергий, совокупность которых и составляет радиационные пояса.

Состав, плотности потоков и энергетические спектры частиц в естественных радиационных поясах Земли зависят от времени вариаций, связанных в основном с протекающими на Солнце процессами. При этом внутренний ЕРПЗ практически не подвержен временным вариациям, а внешний ЕРПЗ меняется во времени существенно.

Поэтому радиационные пояса представляют собой серьезную опасность при длительных полетах в околоземном пространстве. Потоки протонов малых энергий могут вывести из строя солнечные батареи и вызвать помутнение тонких оптических покрытий. Длительное пребывание во внутреннем поясе может привести к лучевому поражению живых организмов внутри космического корабля под воздействием протонов высоких энергий.

Кроме Земли, радиационные пояса существуют у Меркурия, Юпитера и Сатурна.

Земная радиация. Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, – это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно

от урана-238 и тория-232 – долгоживущих изотопов, включившихся в состав Земли с самого ее рождения.

По подсчетам Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников естественной радиации, составляет примерно 350 микрозивертов, т.е. чуть больше средней индивидуальной дозы облучения из-за радиационного фона, создаваемого космическими лучами на уровне моря.

В среднем примерно 2/3 эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с пищей, водой и воздухом.

Совсем небольшая часть этой дозы приходится на радиоактивные изотопы типа углерода-14 и трития, которые образуются под воздействием космической радиации. Все остальное поступает от источников земного происхождения. В среднем человек получает около 180 микрозивертов в год за счет калия-40, который усваивается организмом вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходимыми для жизнедеятельности организма. Однако значительно бóльшую дозу внутреннего облучения человек получает от нуклидов радиоактивного ряда урана-238 и в меньшей степени от радионуклидов ряда тория-232.

Некоторые из них, например нуклиды свинца-210 и полония-210, поступают в организм с пищей. Они концентрируются в рыбе и моллюсках, поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, могут получить относительно высокие дозы облучения.

Десятки тысяч людей на Крайнем Севере питаются в основном мясом северного оленя (карибу), в котором оба упомянутых выше радиоактивных изотопа присутствуют в довольно высокой концентрации. Особенно велико содержание полония-210. Эти изотопы попадают в организм оленей зимой, когда они питаются лишайниками, в которых накапливаются оба изотопа. Дозы внутреннего облучения человека от полония-210 в этих случаях могут в 35 раз превышать средний уровень. А в другом полушарии люди, живущие в Западной Австралии в местах с повышенной концентрацией урана, получают дозы облучения, в 75 раз превосходящие средний уровень, поскольку едят мясо и требуху овец и кенгуру.

Прежде чем попасть в организм человека, радиоактивные вещества, как и в рассмотренных выше случаях, проходят по сложным

маршрутам в окружающей среде, и это приходится учитывать при оценке доз облучения, полученных от какого-либо источника. В качестве примера на рис. 1.4.2. представлена одна из схем распространения радиоактивных веществ в окружающей среде. Рисунок примерно соответствует модели, на основе которой рассчитывались дозы облучения населения от радионуклидов, поступающих в окружающую среду от предприятий атомной энергетики. Показаны пути, по которым радионуклиды могут попасть в организм человека с пищей, а также пути, которые оканчиваются в подпочвенных слоях грунта. Конечно, в действительности все обстоит не так просто: почти каждый этап представляет собой сумму очень сложных процессов.



Рис. 1.4.2. Возможные способы распространения радиоизотопов в окружающей среде

Радиоактивный газ радон. Наиболее весомым из всех естественных источников радиации является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ (в 7,5 раза тяжелее воздуха) радон. Согласно текущей оценке НКДАР ООН, радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада ответствен примерно за 3/4 годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации, и примерно за половину этой дозы от всех естественных источников радиации.

Большую часть этой дозы человек получает от радионуклидов, попадающих в его организм вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях.

Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но его концентрация в наружном воздухе существенно различается для разных точек земного шара. Основную часть дозы облучения от радона человек получает, находясь в закрытом, непроветриваемом помещении. В зонах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Радон концентрируется в воздухе внутри помещений лишь тогда, когда они в достаточной мере изолированы от внешней среды. Поступая внутрь помещения тем или иным путем (просачиваясь через фундамент и пол из грунта или, реже, высвобождаясь из материалов, использованных в конструкции дома), радон накапливается в нем. В результате в помещении могут возникать довольно высокие уровни радиации, особенно если дом стоит на грунте с относительно повышенным содержанием радионуклидов, или если при его постройке использовали материалы с повышенной радиоактивностью; герметизация помещений с целью утепления только усугубляет дело, поскольку при этом еще более затрудняется выход радиоактивного газа из помещения.

Самые распространенные строительные материалы – дерево, кирпич и бетон – выделяют относительно немного радона (рис. 1.4.3). Гораздо большей удельной радиоактивностью обладают гранит и пемза, используемые в качестве строительных материалов, например, в России и Германии.

Скорость проникновения исходящего из земли радона в помещения фактически определяется толщиной и целостностью (т.е. количеством трещин и микротрещин) межэтажных перекрытий.

Эффективным средством уменьшения количества радона, просачивающегося через щели в полу являются вентиляционные установки в подвалах.

Кроме того, эмиссия радона из стен уменьшается в 10 раз при облицовке стен пластиковыми материалами типа полиамида, поливинилхлорида, полиэтилена или после покрытия стен слоем краски на эпоксидной основе или тремя слоями масляной краски. Даже при оклейке стен обоями скорость эмиссии радона уменьшается примерно на 30 %.

Еще один источник поступления радона в жилые помещения представляют собой вода и природный газ.

Концентрация радона в обычно используемой воде чрезвычайно мала, но вода из некоторых источников, особенно из глубоких колодцев или артезианских скважин, содержит очень много радона.

По оценкам НКДАР ООН, среди всего населения Земли менее 1 % жителей потребляет воду с удельной радиоактивностью более 1 млн. Бк/м³ и менее 10 % пьют воду с концентрацией радона, превышающей 100 000 Бк/м³.



Рис. 1.4.3. Выделение радона различными строительными материалами

Однако основная опасность исходит вовсе не от питья воды, даже при высоком содержании в ней радона. Обычно люди потребляют большую часть воды в составе пищи и в виде горячих напитков (кофе,

чай). При кипячении же воды или приготовлении горячих блюд радон в значительной степени улетучивается и поэтому поступает в организм в основном с некипяченой водой. Но даже и в этом случае радон очень быстро выводится из организма.

Гораздо бóльшую опасность представляет попадание паров воды с высоким содержанием радона в легкие вместе с вдыхаемым воздухом, что чаще всего происходит в ванной комнате. При обследовании домов оказалось, что в среднем концентрация радона в ванной комнате примерно в три раза выше, чем на кухне, и приблизительно в 40 раз выше, чем в жилых комнатах.

Радон проникает также в природный газ под землей. В результате предварительной переработки и в процессе хранения газа перед поступлением его к потребителю большая часть радона улетучивается, но концентрация радона в помещении может заметно возрасти, если кухонные плиты, отопительные и другие нагревательные устройства, в которых сжигается газ, не снабжены вытяжкой. При наличии же вытяжки, которая сообщается с наружным воздухом, пользование газом практически не влияет на концентрацию радона в помещении.

Согласно данным НКДАР ООН концентрация радона вместе с его дочерними продуктами внутри домов в 90 % случаев составляет менее 50 Бк/м^3 , т.е. примерно в 25 раз выше среднего уровня в наружном воздухе, и всего лишь в нескольких процентах домов удельная радиоактивность воздуха внутри помещений превышает 100 Бк/м^3 .

Нетрадиционные источники радиации. Уголь, подобно большинству других природных материалов, содержит ничтожные количества первичных радионуклидов. Последние, извлеченные вместе с углем из недр земли, после сжигания угля попадают в окружающую среду, где могут служить источником облучения людей.

Хотя концентрация радионуклидов в разных угольных пластах различается в сотни раз, в основном уголь содержит меньше радионуклидов, чем земная кора в среднем. Но при сжигании угля большая часть его минеральных компонентов спекается в шлак или золу, куда в основном и попадают радиоактивные вещества. Большая часть золы и шлаки остаются на дне топки электросиловой станции. Однако более легкая зольная пыль уносится тягой в трубу электростанции. Количество этой пыли зависит от отношения к проблемам загрязнения окружающей среды и от средств, вкладываемых в сооружение очистных устройств.

Облака, извергаемые трубами тепловых электростанций, приводят к дополнительному облучению людей, а оседая на землю, частички могут вновь вернуться в воздух в составе пыли. Согласно текущим

оценкам, производство каждого гигаваатт-года электроэнергии обходится человечеству в 2 чел-Зв ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозы облучения, т.е. например, сегодня ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза от всех работающих на угле электростанций во всем мире составила около 2000 чел-Зв.

На приготовление пищи и отопление жилых домов расходуется меньше угля, но зато больше зольной пыли летит в воздух в пересчете на единицу топлива. Таким образом, из печек и каминов всего мира вылетает в атмосферу зольной пыли, возможно, не меньше, чем из труб электростанций. Из-за сжигания угля в домашних условиях для приготовления пищи и обогрева жилищ во всем мире сегодня ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза облучения населения Земли возросла на 100 000 чел-Зв.

Термальные водоемы. Некоторые страны эксплуатируют подземные резервуары пара и горячей воды для производства электроэнергии и отопления домов; один такой источник вращает турбины электростанции в Лардерелло в Италии с начала нашего века. Измерения эмиссии радона на этой и еще на двух, значительно более мелких, электростанциях в Италии показали, что на каждый гигаваатт-год вырабатываемой ими электроэнергии приходится ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза 6 чел-Зв, т. е. в три раза больше аналогичной дозы облучения от электростанций, работающих на угле.

Фосфаты. Добыча фосфатов ведется во многих местах земного шара; они используются главным образом для производства удобрений, которых на сегодня во всем мире было получено около 30 млн. т. Большинство разрабатываемых в настоящее время фосфатных месторождений содержат уран, присутствующий там в довольно высокой концентрации. В процессе добычи и переработки руды выделяется радон, да и сами удобрения радиоактивны, и содержащиеся в них радиоизотопы проникают из почвы в пищевые культуры. Радиоактивное загрязнение в этом случае бывает обыкновенно незначительным, но возрастает, если удобрения вносят в землю в жидком виде или если содержащие фосфаты вещества скормливают скоту. Такие вещества действительно широко используются в качестве кормовых добавок, что может привести к значительному повышению содержания радиоактивности в молоке. Все эти аспекты применения фосфатов дают за год ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу, равную примерно 6000 чел-Зв, в то время как соответствующая доза из-за применения

фосфогипса, получаемого только за год, составляет около 300 000 чел-Зв. Все это говорит о большой опасности, которую может представлять она человеку (рис. 1.4.4.).

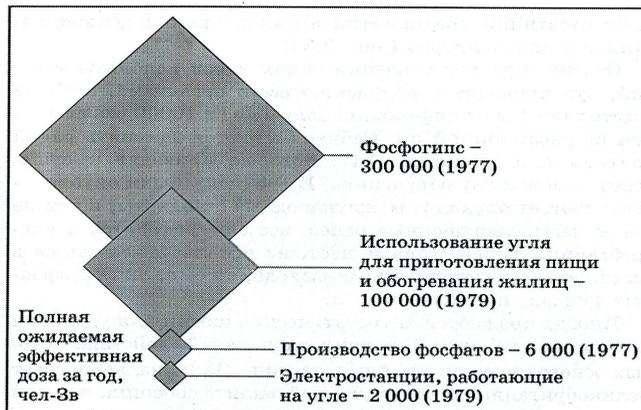


Рис. 1.4.4. Сопоставление годичных ожидаемых доз

1.4.2. Искусственные источники радиации

Искусственные источники радиации это источники, созданные человеком для их полезного применения или являющиеся побочными продуктами этой деятельности, на которые распространяются действия Норм и Правил

Ядерные взрывы. За последние несколько десятилетий человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и научился использовать энергию атома в самых разных целях: в медицине и для создания атомного оружия, для производства энергии и обнаружения пожаров, для изготовления светящихся циферблатов часов и поиска полезных ископаемых. Все это приводит к увеличению дозы облучения, как отдельных людей, так и населения Земли в целом.

Индивидуальные дозы, получаемые разными людьми от искусственных источников радиации, сильно различаются. В большинстве случаев эти дозы весьма невелики, но иногда облучение за счет техногенных источников оказывается во много тысяч раз интенсивнее, чем за счет естественных.

За последние 40 лет каждый из нас подвергался облучению от радиоактивных осадков, которые образовались в результате ядерных взрывов. Речь идет не о тех радиоактивных осадках, которые выпали

после бомбардировки Хиросимы и Нагасаки в 1945 году, а об осадках, связанных с испытанием ядерного оружия в атмосфере.

Максимум этих испытаний приходится на два периода: первый – на 1954–1958 годы, когда взрывы проводили Великобритания, США и СССР, и второй, более значительный, – на 1961–1962 годы, когда их проводили в основном Соединенные Штаты и Советский Союз. Во время первого периода большую часть испытаний провели США, во время второго – СССР.

Эти страны в 1963 году подписали Договор об ограничении испытаний ядерного оружия, обязывающий не испытывать его в атмосфере, под водой и в космосе. С тех пор лишь Франция и Китай провели серию ядерных взрывов в атмосфере, причем мощность взрывов была существенно меньше, а сами испытания проводились реже (последнее из них – в 1980 году). Подземные испытания проводятся до сих пор, но они обычно не сопровождаются образованием радиоактивных осадков.

Часть радиоактивного материала выпадает неподалеку от места испытания, какая-то часть задерживается в тропосфере (самом нижнем слое атмосферы), подхватывается ветром и перемещается на большие расстояния, оставаясь примерно на одной и той же широте. Находясь в воздухе в среднем около месяца, радиоактивные вещества во время этих перемещений постепенно выпадают на землю. Однако большая часть радиоактивного материала выбрасывается в стратосферу (следующий слой атмосферы, лежащий на высоте 10–50 км), где он остается многие месяцы, медленно опускаясь и рассеиваясь по всей поверхности земного шара.

Радиоактивные осадки содержат несколько сотен различных радионуклидов, однако большинство из них имеет ничтожную концентрацию или быстро распадается; основной вклад в облучение человека дает лишь небольшое число радионуклидов. Вклад в ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу облучения населения от ядерных взрывов, превышающий 1 %, дают только четыре радионуклида. Это углерод-14, цезий-137, цирконий-95 и стронций-90.

Дозы облучения за счет этих и других радионуклидов различаются в разные периоды времени после взрыва, поскольку они распадаются с различной скоростью.

Годовые дозы облучения четко коррелируют с испытаниями ядерного оружия в атмосфере: их максимум приходится на те же периоды. В 1963 году коллективная среднегодовая доза, связанная с ядерными испытаниями, составила около 7 % дозы облучения от

естественных источников; в 1966 году она уменьшилась до 2 %, а в начале 80-х – до 1 %. Суммарная ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза от всех ядерных взрывов в атмосфере, произведенных к настоящему времени, составляет 30 000 000 чел-Зв. К 1980 году человечество получило лишь 12 % этой дозы, остальную часть оно будет получать еще миллионы лет.

Атомная энергетика. Источником облучения, вокруг которого ведутся наиболее интенсивные споры, являются атомные электростанции, хотя в настоящее время они вносят весьма незначительный вклад в суммарное облучение населения. При нормальной работе ядерных установок выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду очень невелики.

К концу XX века в 26 странах работало 345 ядерных реакторов, вырабатывающих электроэнергию. Их мощность составляла 13 % суммарной мощности всех источников электроэнергии и была равна 220 ГВт. До сих пор каждые – 5 лет эта мощность удваивалась, однако, сохранится ли такой темп роста в будущем, неясно. Оценки предполагаемой суммарной мощности атомных электростанций на конец века имеют постоянную тенденцию к снижению. Причины тому – экономический спад, реализация мер по экономии электроэнергии, а также противодействие со стороны общественности. Согласно последней оценке МАГАТЭ, в 2000 году мощность атомных электростанций составляла 720–950 ГВт.

Атомные электростанции являются лишь частью ядерного топливного цикла, который начинается с добычи и обогащения урановой руды. Следующий этап – производство ядерного топлива. Отработанное в АЭС ядерное топливо иногда подвергают вторичной обработке, чтобы извлечь из него уран и плутоний. Заканчивается цикл, как правило, захоронением радиоактивных отходов (рис. 1.4.5).

На каждой стадии ядерного топливного цикла в окружающую среду попадают радиоактивные вещества. НКДАР оценил дозы, которые получает население на различных стадиях цикла за короткие промежутки времени и за многие сотни лет.

По данным НКДАР весь ядерный топливный цикл дает ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу облучения за счет короткоживущих изотопов около 5,5 чел-Зв на каждый гигаватт-год вырабатываемой на АЭС электроэнергии. Из них процесс добычи руды дает вклад 0,5 чел-Зв, ее обогащение – 0,04 чел-Зв, производство ядерного топлива – 0,002 чел-Зв, эксплуатация ядерных реакторов – около 4 чел-Зв (наибольший вклад) и, наконец, процессы, связанные с регенерацией топлива, – 1 чел-Зв.

Годовая коллективная эффективная доза облучения от всего ядерного цикла, которая ожидается в начале XXI века, будет составлять ориентировочно 10 000 чел-Зв, а к 2100 году – до 200 000 чел-Зв. Эти оценки основаны на пессимистическом предположении, что нынешний уровень выбросов сохранится, и не будут введены существенные технические усовершенствования. Но даже и в этом случае средние дозы будут малы по сравнению с дозами, получаемыми от естественных источников, – в 2100 году они составят лишь 1 % от естественного фона.

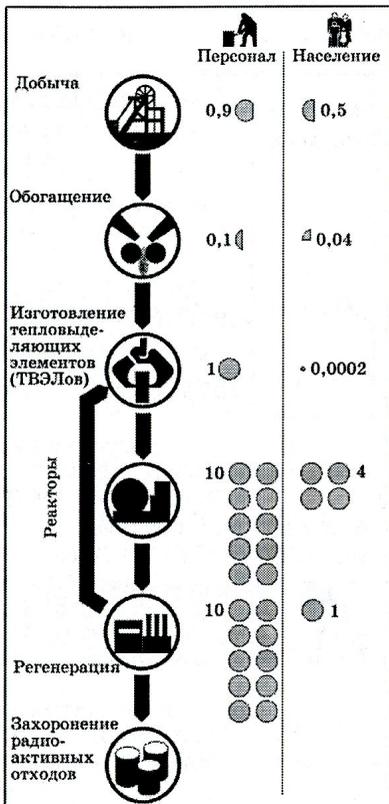


Рис. 1.4.5. Ядерно-топливный цикл

Люди, проживающие вблизи ядерных реакторов, без сомнения, получают гораздо большие дозы, чем население в среднем. Тем не менее, в настоящее время эти дозы обычно не превышают нескольких процентов естественного радиационного фона.

Все приведенные выше цифры, конечно, получены в предположении, что ядерные реакторы работают нормально. Однако количество радиоактивных веществ, поступивших в окружающую среду при авариях, может оказаться гораздо больше. И с этим, конечно, надо считаться и принимать все необходимые меры по предотвращению таких ситуаций.

Источники, использующиеся в медицине. В настоящее время основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности. Во многих странах этот источник ответствен практически за всю дозу, получаемую от техногенных источников радиации.

Радиация используется в медицине, как в диагностических целях, так и для лечения. Одним из самых распространенных медицинских приборов является рентгеновский аппарат. Получают все более широкое распространение и новые сложные диагностические методы, опирающиеся на использование радиоизотопов. Как ни парадоксально, но одним из основных способов борьбы с раком является лучевая терапия.

Наиболее распространенным видом излучения, применяющимся в диагностических целях, являются рентгеновские лучи. Согласно данным по развитым странам, на каждую 1000 жителей приходится от 300 до 900 обследований в год – и это не считая рентгенологических обследований зубов и массовой флюорографии. Менее полные данные по развивающимся странам показывают, что здесь число проводимых обследований не превышает 100–200 на 1000 жителей. В действительности около 2/3 населения Земли проживает в странах, где среднее число рентгенологических обследований составляет не более 10 % от числа обследований в промышленно развитых странах.

Благодаря техническим усовершенствованиям, по-видимому, можно уменьшить и дозы, получаемые пациентами при рентгенографии зубов. Это очень важно хотя бы потому, что во многих развитых странах данное рентгенологическое обследование проводится наиболее часто. Максимальное уменьшение площади рентгеновского пучка, его фильтрация, убирающая лишнее излучение, использование более чувствительных пленок и правильная экранировка – все это уменьшает дозу.

Меньшие дозы должны использоваться и при обследовании молочной железы. Введенные во второй половине 70-х годов новые методы рентгенографии этого органа уже привели к существенному

снижению уровня облучения по сравнению с прежним, однако он может быть уменьшен и далее без ухудшения качества рентгенограмм.

Со времени открытия рентгеновских лучей самым значительным достижением в разработке методов рентгенодиагностики стала компьютерная томография. Этот метод находит все более широкое применение. Его применение при обследованиях почек позволило уменьшить дозы облучения кожи в 5 раз, яичников – в 25 раз, семенников – в 50 раз по сравнению с обычными методами.

Суммарная доза, получаемая населением Земли ежегодно во время сотен миллионов рентгенологических обследований с применением малых доз, значительно превышает дозу, получаемую в сумме сравнительно малым числом больных раком. Средняя эффективная эквивалентная доза, получаемая от всех источников облучения в медицине, в промышленно развитых странах составляет – 1 мЗв на каждого жителя, т.е. примерно половину средней дозы от естественных источников.

Профессиональное облучение. Самые большие дозы облучения, источником которого являются объекты атомной промышленности, получают люди, которые на них работают. Профессиональные дозы почти повсеместно являются самыми большими из всех видов доз.

Оценки показывают, что доза, которую получают рабочие урановых рудников и обогатительных фабрик, составляет в среднем 1 чел-Зв на каждый гигаватт-год электроэнергии. Примерно 90 % этой дозы приходится на долю рудников, причем персонал, работающий в шахтах, подвергается большему облучению. Коллективная эквивалентная доза от заводов, на которых получают ядерное топливо, также составляет 1 чел-Зв на гигаватт-год. Для новых электростанций характерны меньшие дозы, чем для старых. Значение среднегодовой коллективной эффективной эквивалентной дозы для реакторов составляет 10 чел-Зв на гигаватт-год электроэнергии.

Рабочие, выполняющие разные виды работ, получают неодинаковые дозы (рис. 1.4.6). Наиболее велики дозы облучения при ремонтных работах – текущих или незапланированных, на которые приходится

70 % коллективной дозы, причем иногда рабочие обязаны выполнять эту особо опасную работу по контракту. Такие рабочие получают половину всей коллективной дозы. Большие дозы получают рабочие обогатительных фабрик, причем показатели для различных фабрик могут сильно отличаться.

Некоторые работники подвергаются воздействию более высоких доз естественной радиации. Самую большую группу таких работников

составляют экипажи самолетов. Полеты совершаются на большой высоте, и это приводит к увеличению дозы из-за воздействия космических лучей. Члены экипажей получают дополнительно 1–2 мЗв в год. Внизу, под землей, повышенные дозы получают шахтеры, добывающие каменный уголь, железную руду и т.д.



Рис. 1.4.6. Дозы, получаемые в ходе выполнения различных видов работ на ядерных реакторах

Индивидуальные дозы сильно различаются, а при некоторых видах подземных работ (исключая работы в каменноугольных шахтах) эти дозы могут быть даже выше, чем в урановых рудниках.

Очень высокие дозы – более 300 мЗв в год, что в 6 раз выше международного стандарта, принятого для работников атомной промышленности, – получает персонал курортов, где применяются радоновые ванны и куда люди едут, чтобы поправить свое здоровье.

Искусственные радиационные пояса Земли образуются в результате высотных ядерных и термоядерных взрывов. Объем и координаты ИРПЗ зависят от места взрыва в пространстве и определяются мощностью боеприпасов. Осколки деления являются источником электронов с энергиями до 10 МэВ. Плотность потоков электронов в ИРПЗ может достигать 10^{19} электрон·см⁻²·с⁻¹ и выше. Однако она сравнительно быстро спадает во времени (за два месяца плотность снижается примерно на 50 %). Ориентировочные оценки поглощенной за год дозы от ИРПЗ показывают, что она может достигать 10^6 – 10^7 Дж·кг⁻¹ (10^8 – 10^9 рад).

Бытовые источники облучения. Источником облучения являются и многие общепотребительные предметы, содержащие радиоактивные вещества. Распространенным источником облучения являются часы со светящимся циферблатом. Они дают годовую дозу, в 4 раза

превышающую ту, что обусловлена утечками на АЭС. Такую же коллективную эффективную эквивалентную дозу получают работники предприятий атомной промышленности и экипажи авиалайнеров (рис 1.4.7).

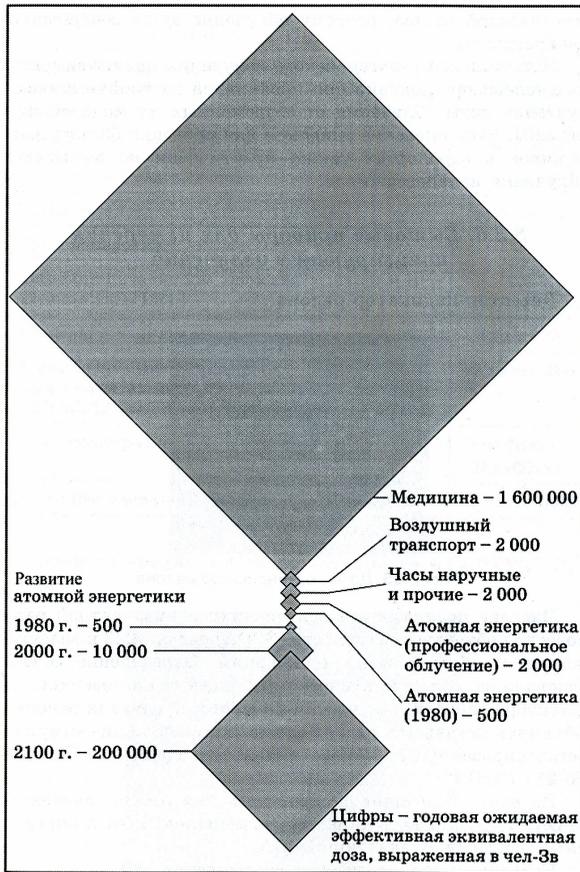


Рис. 1.4.7. Сопоставление доз, получаемых различными категориями работников предприятий атомной промышленности

При изготовлении таких часов используют радий, что приводит к облучению всего организма, хотя на расстоянии 1 м от циферблата излучение в 10 000 раз слабее, чем на расстоянии 1 см. Радиоактивные изотопы используются также в светящихся указателях входа-выхода, в компасах, телефонных дисках, прицелах и т.п.

Продаются антистатические щетки для удаления пыли с пластинок и фотопринадлежностей, действие которых основано на испускании α -частиц. Принцип действия многих детекторов дыма также основан на использовании α -излучения. Радионуклиды применяют в дросселях флуоресцентных светильников и в других электроприборах и устройствах. В середине 80-х годов в одной только Западной Германии в эксплуатации находилось почти 100 млн. таких приборов, которые, впрочем, не приводят к заметному облучению, если они исправны.

При изготовлении особо тонких оптических линз применяется торий, который может привести к существенному облучению хрусталика глаза. Для придания блеска искусственным зубам широко используют уран, который может служить источником облучения тканей полости рта. Национальный совет Великобритании по радиационной защите рекомендовал прекратить использование урана для этой цели, а в США и Германии, где производится большая часть зубного фарфора, была установлена его предельная концентрация.

1.5. Действие радиации на человека

Радиация по самой своей природе вредна для жизни. Малые дозы облучения могут «запустить» не до конца еще установленную цепь событий, приводящую к раку или к генетическим повреждениям (рис. 1.5.1). При больших дозах радиация может разрушать клетки, повреждать ткани органов и явиться причиной скорой гибели организма.

Повреждения, вызываемые большими дозами облучения, обыкновенно проявляются в течение нескольких часов или дней. Раковые заболевания, однако, проявляются спустя много лет после облучения – как правило, не ранее чем через одно-два десятилетия. А врожденные пороки развития и другие наследственные болезни, вызываемые повреждением генетического аппарата, по определению проявляются лишь в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки индивидуума, подвергшегося облучению.

Чтобы вызвать острое поражение организма, дозы облучения должны превышать определенный уровень, но нет никаких оснований считать, что это правило действует в случае таких последствий, как рак или повреждение генетического аппарата. По крайней мере, теоретически для этого достаточно самой малой дозы. Однако в то же самое время никакая доза облучения не приводит к этим последствиям во всех случаях. Даже при относительно больших дозах облучения

далеко не все люди обречены на эти болезни: действующие в организме человека репарационные механизмы обычно ликвидируют все повреждения. Точно так же любой человек, подвергшийся действию радиации, совсем не обязательно должен заболеть раком или стать носителем наследственных болезней; однако вероятность, или риск, наступления таких последствий у него больше, чем у человека, который не был облучен. И риск этот тем больше, чем больше доза облучения.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТКАНИ ОРГАНИЗМА



Заряженные частицы. Проникающие в ткани организма альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят. (Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям.)



Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных долей секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому оставшаяся часть исходно нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.



Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как «свободные радикалы».



Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.



Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Рис. 1.5.1. Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма

Реакции тканей человека на облучение для разных органов и тканей неодинаковой, причем различия очень велики (рис. 1.5.2). Величина же дозы, определяющая тяжесть поражения организма, зависит от того, получает ли ее организм сразу или в несколько приемов. Большинство органов успевает в той или иной степени залечить радиационные повреждения и поэтому лучше переносит серию мелких доз, нежели ту же суммарную дозу облучения, полученную за один прием.

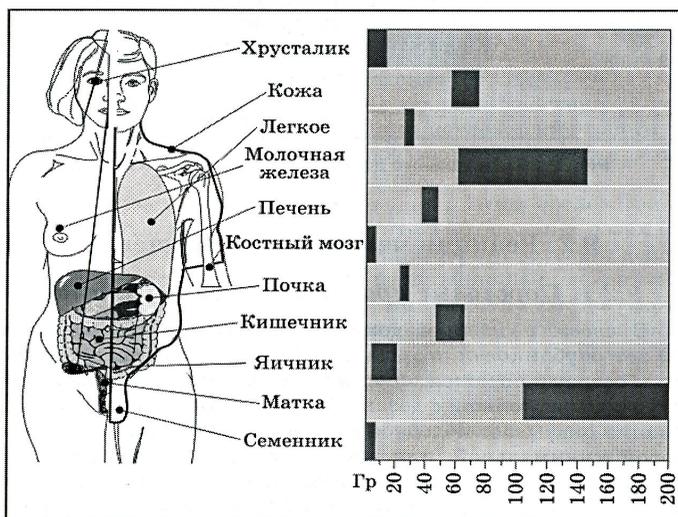


Рис. 1.5.2. Допустимые дозы излучений в лучевой терапии

Разумеется, если доза облучения достаточно велика, облученный человек погибнет. Во всяком случае, очень большие дозы облучения порядка 100 Гр вызывают настолько серьезное поражение центральной нервной системы, что смерть, как правило, наступает в течение нескольких часов или дней (рис. 1.5.3). При дозах облучения от 10 до 50 Гр при облучении всего тела поражение ЦНС может оказаться не настолько серьезным, чтобы привести к летальному исходу, однако облученный человек скорее всего все равно умрет через одну-две недели от кровоизлияния в желудочно-кишечном тракте. При еще меньших дозах может не произойти серьезных повреждений желудочно-кишечного тракта или организм с ними справится, и, тем не менее, смерть может наступить через один-два месяца с момента

облучения, главным образом, из-за разрушения клеток красного костного мозга – главного компонента кроветворной системы организма: от дозы в 3–5 Гр при облучении всего тела умирает примерно половина всех облученных. Таким образом, в этом диапазоне доз облучения большие дозы отличаются от меньших лишь тем, что смерть в первом случае наступает раньше, а во втором – позже.



Рис. 1.5.3. Летальные дозы радиационного излучения

Разумеется, чаще всего человек умирает в результате одновременного действия всех указанных последствий облучения.

Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы наиболее уязвимы при облучении и теряют способность нормально функционировать уже при дозах облучения 0,5–1 Гр. Они обладают замечательной способностью к регенерации, и или доза облучения не настолько велика, чтобы вызвать повреждение всех клеток, кроветворная система может полностью восстановить свои функции. Если же облучению подверглось не все тело, а какая-то его часть, то уцелевших клеток мозга бывает достаточно для полного возмещения поврежденных клеток.

Репродуктивные органы и глаза также отличаются повышенной чувствительностью к облучению. Наиболее уязвимой для радиации частью глаза является хрусталик.

Погибшие клетки становятся непрозрачными, а разрастание помутневших участков приводит сначала к катаракте, а затем и к

полной слепоте. Чем больше доза, тем больше потеря зрения. Помутневшие участки могут образоваться при дозах облучения 2 Гр и менее. Более тяжелая форма поражения глаза – прогрессирующая катаракта – наблюдается при дозах около 5 Гр. Показано, что даже связанное с рядом работ профессиональное облучение вредно для глаз: дозы от 0,5 до 2 Гр, полученные в течение 10–20 лет, приводят к увеличению плотности и помутнению хрусталика.

Дети крайне чувствительны к действию радиации. Относительно небольшие дозы при облучении хрящевой ткани могут замедлить или вовсе остановить у них рост костей, что приводит к аномалиям развития скелета. Облучение мозга ребенка при лучевой терапии может вызвать изменения в его характере, привести к потере памяти, а у очень маленьких детей даже к слабоумию и идиотии. Кости и мозг взрослого человека способны выдерживать гораздо большие дозы.

Крайне чувствителен к действию радиации и мозг плода, особенно если мать подвергается облучению между восьмой и пятнадцатой неделями беременности. В этот период у плода формируется кора головного мозга, и существует большой риск того, что в результате облучения матери (например, рентгеновскими лучами) родится умственно отсталый ребенок. Большинство тканей взрослого человека относительно мало чувствительны к действию радиации. Почки выдерживают суммарную дозу около 23 Гр, полученную в течение пяти недель, без особого для себя вреда, печень – по меньшей мере 40 Гр за месяц, мочевой пузырь – по меньшей мере 55 Гр за четыре недели, а зрелая хрящевая ткань – до 70 Гр. Легкие – чрезвычайно сложный орган – гораздо более уязвимы, а в кровеносных сосудах незначительные, но, возможно, существенные изменения могут происходить уже при относительно небольших дозах.

Облучение в терапевтических дозах, как и всякое другое облучение, может вызвать заболевание раком в будущем или привести к неблагоприятным генетическим последствиям. Облучение в терапевтических дозах, однако, применяют обыкновенно для лечения рака, когда человек смертельно болен, а поскольку пациенты в среднем довольно пожилые люди, вероятность того, что они будут иметь детей, также относительно мала.

Рак – наиболее серьезное из всех последствий облучения человека при малых дозах.

Согласно имеющимся данным, первыми в группе раковых заболеваний, поражающих население в результате облучения, стоят лейкозы (рис. 1.5.4). Они вызывают гибель людей в среднем через 10

лет с момента облучения – гораздо раньше, чем другие виды раковых заболеваний.

Самыми распространенными видами рака, вызванными действием радиации, оказались рак молочной железы и рак щитовидной железы. По оценкам НКДАР примерно у десяти человек из тысячи облученных отмечается рак щитовидной железы, а у десяти женщин из тысячи – рак молочной железы (в расчете на каждый грэй индивидуальной поглощенной дозы).

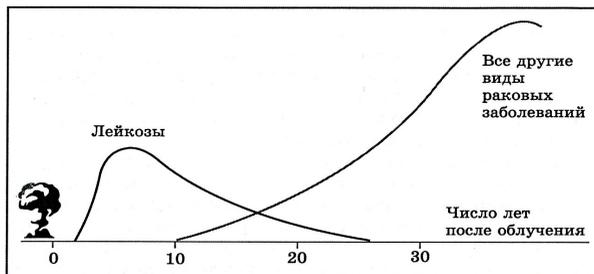


Рис. 1.5.4. Вероятность заболевания раком при радиационном облучении
Относительная среднестатистическая вероятность заболевания раком после получения однократной дозы в один рад (= 0,01 Гр) при равномерном облучении всего тела. На графике, построенном по результатам обследования людей, переживших атомную бомбардировку, показано ориентировочное время появления злокачественных опухолей с момента облучения. Из графика следует, что, прежде всего после двухлетнего скрытого периода развиваются лейкозы, достигая максимальной частоты через 6–7 лет; затем частота плавно уменьшается и через 25 лет становится равной нулю. Сплотные (сплошные) опухоли начинают развиваться через 10 лет после облучения, но исследователи не располагают пока достаточной информацией, позволяющей построить всю кривую

Обе разновидности рака в принципе излечимы, а смертность от рака щитовидной железы особенно низка.

Рак легких принадлежит к распространенным разновидностям раковых заболеваний среди облученных групп населения.

Рак других органов и тканей, как оказалось, встречается среди облученных групп населения реже. Согласно оценкам НКДАР, вероятность умереть от рака желудка, печени или толстой кишки составляет примерно всего лишь 1/1000 на каждый грэй средней индивидуальной дозы облучения, а риск возникновения рака костных тканей, пищевода, тонкой кишки, мочевого пузыря, поджелудочной железы, прямой кишки и лимфатических тканей еще меньше и составляет примерно от 0,2 до 0,5 на каждую тысячу и на каждый грэй средней индивидуальной дозы облучения.

Радиация может оказывать действие на разные химические и биологические агенты, что может приводить в каких-то случаях к дополнительному увеличению частоты заболевания раком.

Одним из таких агентов является табачный дым. Оказалось, что шахтеры урановых рудников из числа курящих заболевают раком гораздо раньше (рис. 1.5.5). В остальных случаях данных явно недостаточно, и необходимы дальнейшие исследования.

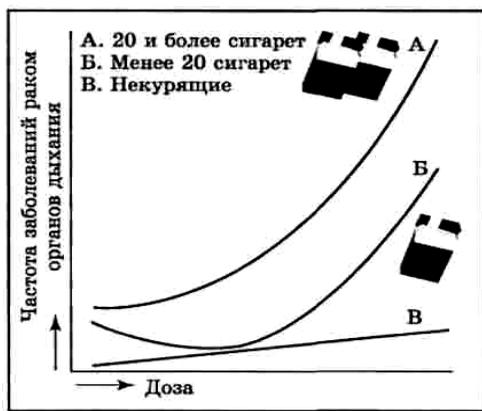


Рис. 1.5.5. Курение и радиация

Смертность от рака органов дыхания как функция дозы облучения, обусловленной дочерними продуктами радиоактивного распада радона, для трех групп рабочих урановых рудников: среди заядлых курильщиков, выкуривающих более 20 сигарет в день (кривая А), среди «умеренных» курильщиков, выкуривающих менее 20 сигарет в день (кривая Б) и среди некурящих (кривая В)

1.5.1. Биологическое действие ионизирующих излучений

В молекулах живых клеток первичные физико-химические процессы возникают при поглощении ими ионизирующего излучения, воздействие которого может быть прямым или косвенным:

– *прямое воздействие* – разрыв молекулярных связей и изменение химической структуры различных соединений при ионизации живой ткани, это приводит к гибели клеток;

– *косвенное действие* – радиолиз воды, составляющий около 70 % массы ткани, с образованием свободных радикалов, а так же сильных окислителей гидропероксида и пероксида водорода.

Продукты радиолиза весьма активны. Они вступают в химические реакции с молекулами тканей и образуют новые соединения, не свойственные здоровому организму – токсины, разрушают клетки.

Изменение состава отдельных молекул клетки и ее гибель выводят из строя сотни и тысячи других молекул погибшей клетки, не смотря на то, что они не подверглись излучению. Это огромная, многократная поражающая способность является особенностью воздействия на организм человека ионизирующего излучения и может вызвать два вида эффектов, которые клиническая медицина называет болезнями: *детерминированные* (определенные) пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой ожог, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода) и *стохастические* (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни и др.).

При воздействии на человека больших доз ИИ возможно возникновение лучевой болезни в острой и хронической форме.

Острая лучевая болезнь возникает при воздействии на человека больших доз излучений за короткий промежуток времени и имеет три стадии:

1-я стадия (доза облучения 1–2 Зв (1,5–2,0 Гр), скрытый период 2–3 недели) сопровождается симптомами, характерными и для других заболеваний: слабость, головные боли, нарушение сна. Исключение облучения и соответствующее лечение позволяет полностью восстановить здоровье;

2-я стадия (доза облучения 2–3 Зв (2,5–5,0 Гр) скрытый период одна неделя) характеризуется усилением болезненных ощущений, появлением сильных болей в области сердца, живота, тошноты, изжоги, кровотечений из носа, десен, изъязвлением слизистых оболочек носа и рта. Срок лечения 1,5–2 месяца, в 50 % случаев приводит к смерти в течении первого месяца;

3-стадия возникает при дозе облучения 3–5 Зв (4,0–6 Гр), характеризуется необратимыми изменениями в организме через 3–7 часов и даже летальным исходом.

Доза более 5 Зв (6,0Гр) является смертельной.

Хроническая форма лучевой болезни возникает при облучении человека небольшими дозами в течение длительного времени. При хроническом облучении малыми дозами, в том числе и от радионуклидов, попавших внутрь организма, суммарные дозы могут быть существенно большими. Характерными признаками являются: изменения в крови, локальные поражения кожи, поражения хрусталика, пневмосклероз и др. Наносимое организму повреждение частично восстанавливается. Доза в 0,5 Зв, приводящая при однократном облучении к болезненным ощущениям, при хроническом облучении, растянутом во времени на 10 и более лет, к видимым

явлениям не приводит. При дозах, превышающих 5 Зв (6 Гр), развивается крайне тяжелая форма лучевой болезни, которая почти в 100 % случаев заканчивается смертью вследствие кровоизлияния или инфекционных заболеваний. Данные приведены на случай отсутствия лечения. При имеющихся в настоящее время противолучевых средств возможно исключить летальный исход при дозах около 10 Гр

1.5.2. Генетические последствия облучения

Изучение генетических последствий облучения связано с еще большими трудностями, чем в случае рака. Во-первых, очень мало известно о том, какие повреждения возникают в генетическом аппарате человека при облучении; во-вторых, полное выявление всех наследственных дефектов происходит лишь на протяжении многих поколений; и, в-третьих, как и в случае рака, эти дефекты невозможно отличить от тех, которые возникли совсем по другим причинам. Около 10% всех живых новорожденных имеют те или иные генетические дефекты, начиная от необременительных физических недостатков типа дальтонизма и кончая такими тяжелыми состояниями, как синдром Дауна, хорея Гентингтона и различные пороки развития. Генетические нарушения можно отнести к двум основным типам: *хромосомные aberrации*, включающие изменения числа или структуры хромосом, и *мутации* в самих генах. Генные мутации подразделяются далее на доминантные (которые проявляются сразу в первом поколении) и рецессивные (которые могут проявиться лишь в том случае, если у обоих родителей мутантным является один и тот же ген; такие мутации могут не проявиться на протяжении многих поколений или не обнаружиться вообще). Оба типа аномалий могут привести к наследственным заболеваниям в последующих поколениях, а могут и не проявиться вообще.

Биологическое действие радиации на живой организм начинается на клеточном уровне. Живой организм состоит из клеток. Клетка состоит из клеточной оболочки, окружающей студенистую массу – цитоплазму, в которой заключено более плотное ядро. Цитоплазма состоит из органических соединений белкового характера, образующих пространственную решетку, ячейки которой заполняют вода, растворенные в ней соли и относительно малые молекулы липидов – веществ, со свойствами подобным жирам. Ядро считается наиболее чувствительной жизненно важной частью клетки, а основными его структурными элементами являются хромосомы. В основе строения хромосом находится молекула *дизоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК)*, в которой заключена

наследственная информация организма. Отдельные участки ДНК, ответственные за формирование определенного элементарного признака, называются генами или «кирпичиками наследственности». Гены расположены в хромосомах в строго определенном порядке и каждому организму соответствует определенный набор хромосом в каждой клетке. У человека каждая клетка содержит 23 пары хромосом. При делении клетки (митозе) хромосомы удваиваются и в определенном порядке располагаются в дочерних клетках.

Ионизирующее излучение вызывает поломку хромосом (хромосомные аберрации), за которыми происходит соединение разорванных концов в новые сочетания. Это и приводит к изменению генного аппарата и образованию дочерних клеток неодинаковых с исходными. Если стойкие хромосомные аберрации происходят в половых клетках, то это ведет к мутациям, т.е. появлению у облученных особей потомства с другими признаками. Мутации полезны, если они приводят к повышению жизнестойкости организма, и вредны, если проявляются в виде различных врожденных пороков.

Однако в любой клетке обнаружены непрерывно действующие процессы исправления химических повреждений в молекулах ДНК. Оказалось так же, что ДНК достаточно устойчиво по отношению к разрывам, вызываемым радиацией. Необходимо произвести семь разрушений структуры ДНК, чтобы она уже не могла восстановиться, т.е. только в этом случае происходит мутация. При меньшем числе разрывов ДНК восстанавливается в прежнем виде. Это указывает на высокую прочность генов по отношению к внешним воздействиям, в том числе и ионизирующим излучениям.

1.6. Нормирование ионизирующего излучения

Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) на основании анализа и обобщения всех имеющихся экспериментальных данных о воздействии ионизирующих излучений различных уровней на животных и человека разработала рекомендации по нормированию облучения.

В России Гигиеническое нормирование ионизирующих излучений с учетом рекомендаций МКРЗ осуществляется «Нормами радиационной безопасности (НРБ-99)», СП 2.6.1.758-99, которые утверждены Главным государственным санитарным врачом РФ 2.07.1999 г.

Нормы радиационной безопасности являются основополагающим документом, регламентирующим требования Федерального закона «О радиационной безопасности населения».

НРБ–99 распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

- в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;
- в результате радиационной аварии;
- от природных источников излучения;
- при медицинском облучении.

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине.

Радиационная безопасность – это состояние защищенности настоящего и будущего поколения людей от вредного воздействия ионизирующего излучения. Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения требуется руководствоваться следующими принципами:

- не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Снижение риска до возможно низкого уровня (оптимизацию) осуществляется с учетом:

- предел риска регламентирует потенциальное облучение от всех возможных источников излучения, поэтому для каждого источника излучения при оптимизации устанавливается граница риска;
- при снижении риска потенциального облучения существует минимальный уровень риска, ниже которого он считается пренебрежимым, и дальнейшее снижение риска нецелесообразно.

Предел индивидуального пожизненного риска в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается округленно $1,0 \cdot 10^{-3}$, а для населения – $5 \cdot 10^{-5}$.

Уровень пренебрежительного риска разделяет область оптимизации риска и область безусловного приемлемого риска и составляет 10^{-6} .

Нормы устанавливаются две категории лиц, подвергающихся облучению:

– персонал – лица, работающие с источниками радиации (группа А) или находящиеся по условиям работы в сферах их воздействия (группа Б);

– все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Основные пределы доз (ПД) приведены в табл. 1.6.1.

Таблица 1.6.1

Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз, мЗв	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год: в хрусталике глаза	150	15
коже	500	50
кистях и стопах	500	50

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз персонала группы Б равны $\frac{1}{4}$ значений для персонала группы А.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, вводят дополнительные ограничения: эквивалентная доза в коже нижней части живота не должна превышать 1 мЗв в месяц. При установлении беременности женщина обязана информировать об этом администрацию и должна быть переведена на работу, не связанную с излучением, – на весь период беременности и на весь период грудного вскармливания ребенка.

Для учащихся в возрасте до 21 года, проходящих обучение с источниками ионизирующего излучения, принимаются дозовые пределы, установленные для лиц из населения.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) – 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Нормы внутреннего облучения населения

базируются на исходной величине – пределе годового поступления (ПП) радионуклида внутрь организма.

На основании ППП рассчитывают допустимую концентрацию (ДК) радионуклидов в воздухе, питьевой воде, продуктах питания, Ки/л; Ки/кг; Бк/кг; Бк/л:

$$ДК = ППП/M,$$

где M – годовое потребление человеком продукта, л, кг.

Для населения в расчетах приняты фиксированные значения M и t (время облучения). Для воды $M = 730$ л/год, для воздуха $M = 8,1 \cdot 10^6$ л/год (лица старше 17 лет). Значение t для населения принимают равным 8 800 часов в год.

1.7. Защита от ионизирующего облучения

Средства защиты от ионизирующих излучений подразделяются на коллективные и индивидуальные. Их классификация дана в ГОСТ 12.4.120–83 (88) «ССБТ. Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений. Общие технические требования» (рис. 1.7.1).

Защита от внешнего облучения. Внешним облучением называется воздействие на организм ионизирующих излучений от источников, находящихся вне организма, когда исключена возможность попадания радиоактивных веществ внутрь организма. Осуществляется нормированием расстояния от человека до источника ионизирующего излучения, времени работы с радиоактивными источниками и экранированием излучения с помощью экранов и биологических защит.

Защита расстоянием обеспечивается безопасным расстоянием до источника излучения, определяемым из формулы:

$$D = \frac{K_\gamma AT}{R^2}, \quad (1.7.1)$$

где D – доза облучения, Р; K_γ – гамма постоянная изотопа (это мощность дозы излучения в рентгенах в час (Р/ч), создаваемая нефльтрованным гамма-излучением данного радиоактивного изотопа активностью 1 мКи на расстоянии 1 см); A – активность источника, мКи; T – время облучения, час; R – расстояние от источника до рабочего места, см. Каждый источник гамма-излучения имеет свою характерную для него гамма-постоянную. Для радия $K_\gamma = 8,4$ Р·см²/г·мКи; для ⁶⁰Со и ¹³⁷Сs соответственно 12,93 и 3,10 Р·см²/г·мКи.

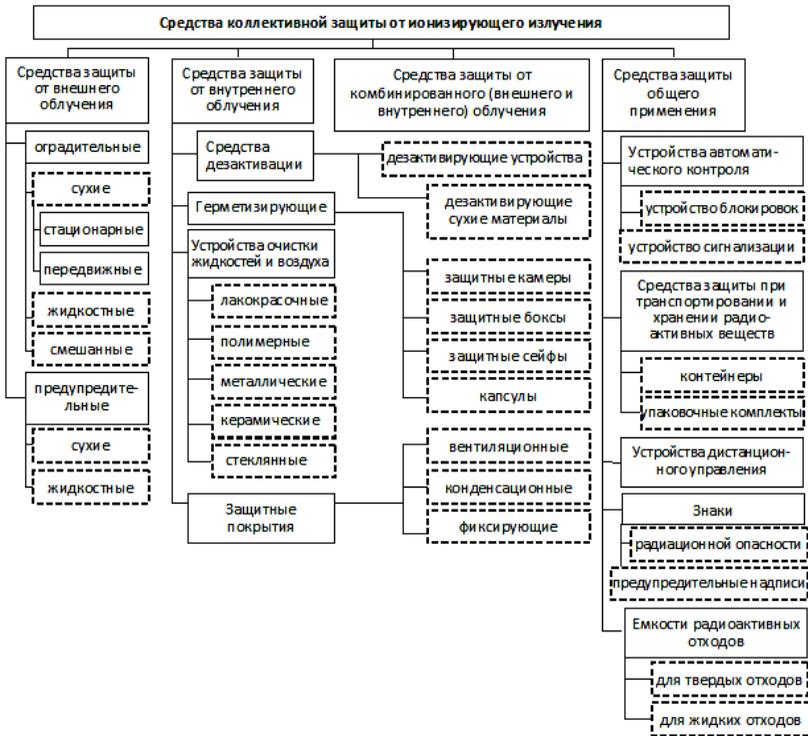


Рис.1.7.1. Классификация средств защиты от ионизирующего излучения

Из формулы (1.7.1) видим, что доза облучения прямо пропорциональна активности источника и времени облучения и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. При этом вместо D подставляется предельно допустимая доза облучения за время t в мЗв.

В лабораторных условиях широко применяется дистанционное управление работой оборудования, дающее возможность выполнять операции с радиоактивными веществами на расстоянии (копирующие и координатные манипуляторы, смотровые системы) и контроль за технологическим процессом. Часто используются копирующие манипуляторы с комплектом инструментов, необходимых для работы (захваты, зажимы и т.п.). Эти манипуляторы представляют собой механические устройства, имеющие ряд блоков, позволяющих копировать движение рук оператора. Промышленностью выпускается целый ряд таких инструментов – пружинные самодержащие захваты

ЗПС, инструментарий дистанционный ИД, магнитный манипулятор ВНИИТБ и др.) длиной от 0,25–1,25 м.

Защита временем применяется в тех случаях, когда нельзя нормировать расстояние и применять экраны. Сущность защиты заключается в ограничении времени работы с радиоактивными источниками. Максимальное время работы в радиоактивной зоне постоянной мощности равно:

$$t = \text{ПД}_{\text{доп}} / M(H),$$

где t – время, ч; $\text{ПД}_{\text{доп}}$ – предел дозы облучения за год, сЗв (сЗв – сантисиверт (10^{-2} Зв)); $M(H)$ – мощность дозы облучения, сЗв/ч.

Защита от ионизирующих излучений считается достаточной, если на рабочем месте мощность дозы M или доза D излучения не превышает предельно допустимых величин регламентированных НРБ–99, СП2.1.758–99 (см. табл. 1.6.1).

Экранирование ионизирующего излучения применяется, если указанных выше мер не достаточно для снижения уровня излучения до допустимых величин. Экраны устанавливают между источником излучения и защищаемым объектом (человеком). Экраны подразделяют на следующие виды:

- контейнеры, предназначены для хранения радиоизотопов;
- экраны для оборудования, полностью огораживают все рабочее оборудование с радиоактивными веществами;
- экраны для рабочих защищают конкретное рабочее место и находящихся на нем рабочих;
- экраны СИЗ (щиток из оргстекла для защиты головы, очки для защиты глаз и т.п.);
- строительные конструкции помещений (кирпичные, бетонные стены, перекрытия и т.п.) – также защитные экраны.

По способу установки защитные экраны могут быть стационарные, передвижные, разборные, настольные.

Эффективность защиты экрана зависит от материала, из которого он изготовлен и его толщины. В зависимости от типа и интенсивности излучения экраны изготавливают из различных материалов. Так, например, для защиты от гамма- и рентгеновского излучений, обладающих очень высокой проникающей способностью, применяют свинец, вольфрам, медь и другие материалы с большой атомной массой (сталь, железо, чугун, бетон, кирпич). Толщина экрана для альфа- и бета-излучений должна быть больше длины их пробега в материале экрана. Для защиты от альфа-излучений достаточен слой воздуха в несколько сантиметров. В качестве материала для экрана применяются материалы с малой атомной массой (плексиглас, стекло,

алюминиевая фольга и т.д.). Основная задача при наличии бета-излучения – это защита от вторичного тормозного излучения. Поэтому для экранов выбирают материал с малым атомным номером (алюминий, медь, оргстекло, пластмассы и т.д.), дающие наименьшее тормозное излучение.

Расчет защитных экранов базируется на законах взаимодействия различных видов излучений с веществом. Например, толщина защитного экрана d_β от β -частиц рассчитывают по формуле

$$d_\beta = l_\beta / \rho ,$$

где l_β –длина пробега частиц, г/см² (1 г/см² характеризует слой вещества, имеющий массу 1 г при сечении 1 см²); ρ – плотность вещества экрана, г/см³.

При расчете защитных устройств в первую очередь необходимо учитывать спектральный состав излучения, его интенсивность, а так же расстояние от источника, на котором находится обслуживающий персонал, и время пребывания в сфере воздействия излучения. На основании имеющихся расчетных экспериментальных данных составлены таблицы кратности ослабления (рис. 1.7.2), а также различного рода номограммы (рис. 1.7.3), позволяющие определить толщину защитного слоя от гамма-излучений различных энергий.

Защита от внутреннего облучения. Под внутренним облучением понимают воздействие на организм ионизирующих излучений радиоактивных веществ, находящихся внутри организма. Защита от внутреннего облучения требует исключения непосредственного контакта с радиоактивными веществами в открытом виде и предотвращения попадания их в воздух рабочей зоны.

Уровень требований к помещениям при работе с открытыми радионуклидами зависит от группы их активности и класса работ (табл.1.7.1).

Помещение разделяют на три зоны. *В первой зоне* размещаются камеры, боксы, оборудование, линии, являющиеся основными источниками радиоактивного загрязнения; *во второй зоне* ведется загрузка и выгрузка радиоактивных веществ, проводятся ремонтные работы; *в третьей зоне* помещения находятся операторские, пульта управления и др., где постоянно присутствуют люди. Помещение третьей и второй зон сообщаются через санитарный шлюз.

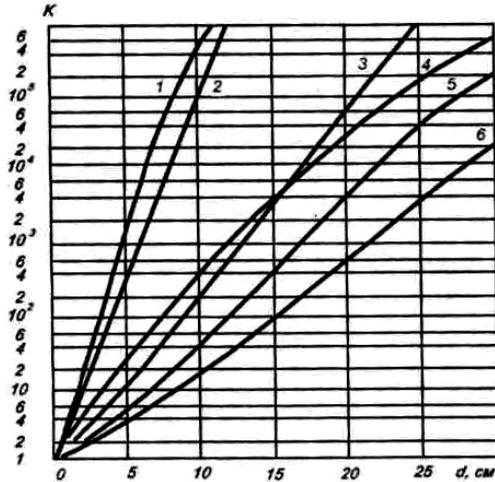


Рис 1.7.2. Зависимость кратности ослабления γ -излучения от толщины защитного экрана:

из свинца: 1 – ^{129}Ir ; 2 – ^{147}Cs ; 3 – ^{60}Co ; из железа: 4 – ^{129}Ir ; 5 – ^{137}Cs ; 6 – ^{60}Co

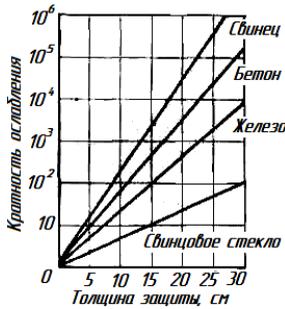


Рис. 1.7.3. Номограмма для расчета толщины защиты от гамма-излучения радия (для бетона толщину защиты умножаем на 4)

На дверях помещений, где проводятся работы с радиоактивными веществами, должен быть помещен знак радиационной безопасности (рис. 1.7.4) и указан класс работы.

Таблица 1.7.1

Активность радионуклидов на рабочих местах, кБк

Группа нуклидов	Класс работы
-----------------	--------------

Знак	МЗА*, кБк	I	II	III
А	3,7	Более 37×10^4	$37 (10-10^4)$	$37 (0,1-10)$
Б	3,7	Более 37×10^5	$37 (10^2-10^5)$	$37 (1-100)$
В	370	Более 37×10^6	$37 (10^3-10^6)$	$37 (10-1000)$
Г	3700	Более 37×10^7	$37 (10^4-10^7)$	$37 (100-110000)$

* МЗА (минимально значимая активность) – наибольшая активность радионуклидов на рабочем месте, не требующая регистрации или получения разрешения на работу с ними.

1. Работы *III класса* разрешается проводить в обычных лабораториях, оборудованных вытяжными шкафами. Поверхности столов, оборудования, полов покрывают слабо сорбирующими (поглощающими) материалами;

2. Помещения для работ *II класса* должны размещаться в изолированной части здания и иметь санитарный пропускник или душевую с дозиметрическим контролем на выходе. В них должны быть вытяжные шкафы, боксы;

3. Работы *I класса*, необходимо проводить в отдельном здании или в его изолированной части с отдельным входом через санитарный пропускник.



Рис. 1.7.4. Знак радиационной опасности

Помещения должны быть оборудованы механической вентиляцией с кратностью обмена воздуха не менее 10 раз в час. Скорость движения воздуха в рабочих проемах шкафов и укрытий должна быть не менее 1,5 м/с. Перед выбросом в атмосферу воздух должен обязательно очищаться на специальных фильтрах до определенных норм.

Защита предполагает проведение мероприятий по борьбе с накоплением радиоактивной пыли и ее удалению из производственного помещения. К этим мероприятиям относятся: покраска или облицовка стен, потолок и пола помещения, их влажная уборка, организация вытяжной вентиляции. Если это практически недостижимо работающие должны обеспечиваться средствами индивидуальной защиты (СИЗ). При работах I класса и некоторых работах II класса предусматриваются полное снятие одежды работающими, переход их через санпропускник, надевание рабочей одежды (комбинезон, белье, шапочка, носки и обувь), а после работы – душ, дозиметрический контроль и лишь после этого надевание домашней одежды и обуви. Для измерения дозы облучения за время работы всем выдаются личный дозиметр типа ДКП-50-А; он позволяет измерять дозы облучения от 0,1 до 5 МЗв при

мощности дозы излучения от 0,5–20 мЗв/ч. Для защиты от загрязнения рук работающим выдаются перчатки, а для защиты от радиоактивной – пыли респираторы.

На время ликвидации аварий, ремонтных работ применяют изолирующие пневмокостюмы или костюмы с автономным питанием.

Рабочий день при работах I и II класса должен составлять 4–6 часов. Работающие с радиоактивными веществами обеспечиваются специальным питанием или молоком.

Профилактика методом фармакохимической защиты применяется в случае неизбежного облучения работающих в дозах превышающих предельно допустимые. В организм за определенное время до облучения вводятся вещества, снижающие радиационное поражение. Такие вещества называются *радиозащитными* или *радиопротекторами*. К ним относятся серосодержащие вещества (цистамин, цистафост, гаммафост и др.); биологически активные амины (мексамин, индралин и др.).

Выбор защитных материалов. При проектировании защиты от нейтронного излучения необходимо выбирать материал с учетом защитных и механических свойств, а также его стоимости, массы и объема.

Защитные свойства материалов от нейтронного излучения определяются их замедляющей и поглощающей способностью, степенью активации.

Быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются веществами с малым порядковым номером. К таким материалам относятся водородсодержащие вещества (вода, тяжелая вода, пластмассы, полиэтилен, парафин и др.), графит и др.

Для эффективного поглощения тепловых нейтронов применяются материалы, которые имеют большое сечение поглощения (соединения с бором – борная сталь, бораль, борный графит, карбид бора, кадмий, бетон (на лимонитовых и других рудах) и др.).

γ -излучение наиболее эффективно ослабляется материалами с высокой плотностью (свинец, сталь, бетон на магнетитовых и других рудах, свинцовое стекло и т.п.).

Помимо защитных свойств материалы должны быть механически прочными, огнестойкими, нетоксичными, стойкими к ионизирующему излучению химически инертными по отношению к материалам, используемым в реакторе. Они должны сохранять стабильные размеры и не иметь запаха. Рассмотрим некоторые материалы, получившие широкое применение для защиты от нейтронного излучения.

Вода используется не только как замедлитель, но и как защитный материал от нейтронного излучения благодаря высокой плотности атомов водорода. После многих столкновений с атомами водорода быстрый нейтрон замедляется до тепловой энергии, а затем поглощается средой. При поглощении тепловых нейтронов ядрами водорода

$[H\{n, \gamma\} D]$ возникают захватные γ -кванты с энергией $E_\gamma = 2,23$ Мэв. Захватное γ -излучение можно значительно снизить, если применить борированную воду. В этом случае тепловые нейтроны будут поглощаться бором $[B(n, \alpha) Li]$, а захватное γ -излучение будет иметь энергию $E_\gamma = 0,5$ Мэв.

На рис. 1.7.5 изображено изменение дозы захватного γ -излучения по отношению к дозе быстрых нейтронов в зависимости от толщины поглощающего слоя чистой воды (кривая 1) и борированной воды (кривая 2). При толщине воды 60 см нейтронная доза в два раза больше, чем доза от захватного γ -излучения (кривая 1). При толщине воды 75 см и выше доза от захватного γ -излучения превышает дозу от нейтронного излучения. В этом случае необходимо создать защиту от γ -излучения. Применение борированной воды резко снижает дозу от захватного γ -излучения (кривая 2). Так, например, при толщине слоя воды 200 см доза γ -излучения снижается более чем на два порядка и становится приблизительно равной дозе нейтронного излучения.

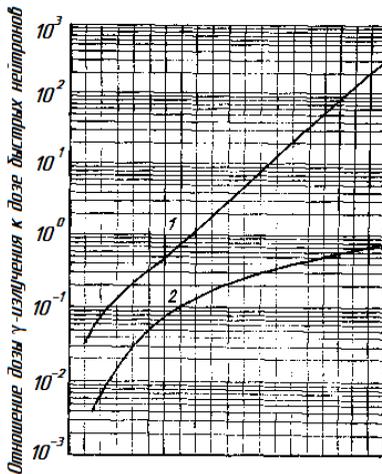


Рис. 1.7.5. Изменение дозы захватного γ -излучения по отношению к дозе быстрых нейтронов

Сталь является основным конструкционным материалом для изготовления узлов реакторных установок (корпус реактора, тепловая и радиационная защита, трубопроводы, различные механизмы,

арматура для защиты из других материалов и т.п.). Она относится к материалам, в которых хорошо сочетаются конструкционные и защитные свойства. Защита из стали от γ -излучения на 30 % тяжелее эквивалентной свинцовой защиты, но это компенсируется лучшими конструкционными качествами стали. Как защита от нейтронного излучения сталь более эффективна, чем свинец. Однако при использовании стали в качестве конструкционного материала для реактора необходимо учитывать и ее недостатки. Под действием тепловых нейтронов железо, являющееся основной составляющей частью стали, активируется с образованием долгоживущего радионуклида Fe^{59} ($T_{1/2} = 45,1$ дня), излучающего коротковолновое γ -излучение $E_{\gamma'} = 1,1$ Мэв; $E_{\gamma} = 1,29$ Мэв). Кроме того, при захвате нейтронов атомами железа возникает очень коротковолновое захватное γ -излучение ($E_{\gamma} = 7,7$ Мэв). Иногда при несовершенной конструкции реакторной установки захватное γ -излучение от железной тепловой защиты является определяющим в выборе защиты по сравнению со всем γ -излучением, возникающим в реакторе. К недостаткам железа как защитного материала относится плохое ослабление нейтронов промежуточных энергий.

При проектировании защиты следует обращать особое внимание на содержание в стали марганца, тантала и кобальта, так как наведенная γ -активность определяется в основном содержанием этих элементов стали. Сталь, подвергающаяся облучению нейтронами высокой плотности, должна содержать не более 0,2 % марганца, а тантал и кобальт могут находиться лишь в виде следов.

Захватное γ -излучение и остаточную активность можно в значительной степени уменьшить, если добавить в сталь борное соединение и получить борную сталь. Бор интенсивно поглощает тепловые нейтроны, при этом образуются легко поглощаемые γ -кванты ($E_{\gamma} = 0,5$ Мэв) и α -частицы.

Борная сталь по механическим свойствам хуже конструкционной стали. Она очень хрупка и трудно поддается механической обработке.

Бетон является основным материалом для защиты от излучений, если масса и размер защиты не ограничиваются другими условиями. Бетон, применяющийся для защиты от излучений, состоит из заполнителей, связанных между собой цементом. В состав цемента в основном входят окислы кальция, кремния, алюминия, железа и легкие ядра, которые интенсивно поглощают γ -излучение и замедляют быстрые нейтроны в результате упругого и неупругого столкновений.

Ослабление плотности потока нейтронов в бетоне зависит от содержания воды в материале защиты, которое определяется в основном типом используемого бетона.

Поглощение плотности потока нейтронов бетонной защитой может быть значительно увеличено введением соединения бора в состав материала защиты. Поглощающая способность γ -излучения зависит от плотности бетона, которая может составлять 2,4–6,6 г/см³. Наибольшая плотность бетона получается при использовании в качестве заполнителя железного скрапа (стальных шариков, проволоки, обрезков стального лома), наименьшая – при использовании песка и гравия. Конструкция бетонной защиты может быть монолитной (для больших реакторов) или состоять из отдельных блоков (небольших реакторов).

При ограничении размеров и массы защиты от γ -излучения целесообразно использовать тяжелые материалы: свинец, вольфрам, тантал. Применение свинца ограничивается низкой температурой плавления (327 °С). Защитные материалы вольфрам, тантал могут использоваться в горячих зонах, в которых применение свинца исключается. Использовать эти металлы для защиты промышленных реакторов нецелесообразно, так как они крайне дороги.

Из соединений бора наиболее часто применяют карбид бора – В₄С. Карбид бора хрупок, обладает высокой термостойкостью. При поглощении тепловых нейтронов в результате ядерной реакции В¹⁰(n, α)Li⁷ образуется гелий и литий. Скопления гелия в порах при высокой температуре может привести к увеличению давления в газовой полости, вследствие чего возникают трещины в материале. Присутствие лития в борсодержащем материале снижает его коррозионные свойства. Бор вводится в легированную сталь до 3 %, при более высоком содержании бора сталь становится хрупкой и плохо обрабатывается. При использовании бора изготавливают дисперсионные материалы, например бораль, борный графит и др.

Бораль изготавливают из листов алюминия, между которыми засыпают порошкообразную смесь карбида бора с алюминием. Затем всю массу прокатывают в горячем состоянии. Лист боралья толщиной 0,44 см с массовым содержанием В₄С (30 %) снижает плотность потока тепловых нейтронов в 1000 раз. Бораль обладает удовлетворительной теплопроводностью (около 0,08 кал/(см·сек·град), его плотность сохраняется до температуры 800 °С. Бораль хорошо обрабатывается, легко сваривается в атмосфере гелия.

По стоимости борный графит гораздо дешевле боралья. Как и бораль, он обладает хорошими поглощающими свойствами и малой

остаточной активностью. Лист из борного графита толщиной 2,5 см (с массовым содержанием бора до 4 %) ослабляет плотность потока тепловых нейтронов в 400 раз.

Борный графит приготавливают из смеси графита и какого-либо соединения бора (B_4C , B_2O_3 и др.).

Графит находит широкое применение в реакторах на тепловых нейтронах в качестве замедлителя и отражателя. Он обладает хорошими тепловыми свойствами и достаточной прочностью, легко поддается механической обработке. Однако графит имеет низкую стойкость к окислению, в результате чего он становится хрупким. Кроме того, при облучении нейтронами кристаллическая решетка графита повреждается, что отражается на его физических свойствах. Для повышения стойкости графита к окислению до температуры 500–950 °С производится покрытие его поверхности пленкой из фосфатного стекла.

Кадмий хорошо поглощает нейтроны с энергией меньше 0,5 Мэв. Листовой кадмий толщиной 0,1 см снижает плотность потока тепловых нейтронов в 10^9 раз. При этом возникает коротковолновое захватное γ -излучение с энергией до 7,5 Мэв. Кадмий не обладает достаточно хорошими механическими свойствами. Поэтому чаще применяют сплав кадмия со свинцом, который наряду с хорошими защитными свойствами от нейтронного и γ -излучений имеет лучшие механические свойства по сравнению с чистым кадмием. Лист, выполненный из такого сплава (5 мас. % кадмия), ослабляет плотность потока тепловых нейтронов в 500 раз.

Полиэтилен $(CH_2)_n$ содержит больше атомов водорода на единицу объема по сравнению с водой, поэтому он является лучшим замедлителем, чем вода. Полиэтилен можно применять на таких участках защиты, где температура не достигает температуры его размягчения (115 °С). Полиэтилен можно отлить любой формы. Он применяется в виде листов, лент, прутков и т.п. При использовании полиэтилена необходимо учитывать его высокий коэффициент линейного расширения (в 13 раз больше, чем у железа). С повышением температуры полиэтилен размягчается, а затем загорается, образуя двуокись углерода и воду.

Для уменьшения захватного γ -излучения в полиэтилен добавляют борсодержащие вещества.

Парафин, как и полиэтилен, применяют для замедления быстрых нейтронов. Чаще используют борированный парафин.

1.8. Радиоактивные отходы и их ликвидация

Радиоактивными отходами (РАО) называются не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные в НРБ–99.

Радиоактивные отходы подразделяются по удельной активности на 3 категории (табл. 1.8.1):

- низкоактивные;
- среднеактивные;
- высокоактивные.

Таблица 1.8.1

Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг		
	Бета-излучающие радионуклиды	Альфа-излучающие радионуклиды (исключая	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	Менее 10^3	Менее 10^2	Менее 10
Среднеактивные	От 10^3 до 10^7	От 10^2 до 10^6	От 10 до 10^5
Высокоактивные	Более 10^7	Более 10^6	Более 10^6

Газообразные радиоактивные отходы выдерживаются и очищаются на фильтрах для снижения их активностей до уровней, регламентируемых допустимым выбросом, после чего удаляются в атмосферу.

Сбор радиоактивных отходов производится непосредственно в местах их образования отдельно от обычных отходов с учетом:

- категории отходов;
- агрегатного состояния;
- физических и химических характеристик;
- природы (органические, неорганические);
- периода полураспада радионуклидов, находящихся в отходах (менее 15 суток, более 15 суток);
- взрыво- и огнеопасности;
- принятых методов переработки отходов.

Основными принципами обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными отходами являются:

- безопасность при обращении с РАО должна обеспечиваться за счет последовательной реализации глубоко эшелонированной защиты;
- система барьеров при обращении с РАО должна включать физико-химическую форму кондиционирования РАО (перевод РАО в форму,

пригодную для безопасного хранения, и (или) транспортирования, и (или) захоронения), герметичные ограждения помещений и хранилищ, стенки сосудов (оборудования), контейнеров и трубопроводов, содержащих РАО;

– система технических и организационных мер при обращении с РАО АС включает:

– проектирование на основе консервативного подхода систем обращения с РАО, обеспечивающих безопасность при их сборе, переработке, кондиционировании, транспортировании и хранении;

– необходимое качество изготовления оборудования, трубопроводов и других элементов систем обращения с РАО;

– подбор эксплуатационного персонала и необходимый уровень его подготовки;

– системы обращения с РАО должны обеспечивать сбор, переработку, кондиционирование и хранение РАО, образующихся при всех режимах нормальной эксплуатации и при проектных авариях на АС;

– системы обращения с РАО должны быть оснащены средствами контроля и управления, позволяющими контролировать технологические процессы, эффективно управлять ими и предотвращать неконтролируемое поступление радионуклидов в окружающую среду во всех проектных режимах эксплуатации;

– в проекте должны быть установлены и обоснованы допустимое количество хранящихся на площадке АС жидких и твердых радиоактивных отходов, их радионуклидный состав, величины активности жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и твердых радиоактивных отходов (ТРО), места (помещения, хранилища) их хранения и сроки хранения.

Радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 15 суток, собираются отдельно от других радиоактивных отходов и выдерживаются в местах временного хранения для снижения активности до уровней, не превышающих допустимых. После чего твердые отходы удаляются как обычные промышленные отходы, а жидкие сливаются в хозяйственно-бытовую канализацию или используются организацией в системе оборотного хозяйственно-технического водоснабжения.

Транспортировка радиоактивных отходов производится в механически прочных герметичных упаковках на специально оборудованных транспортных средствах при наличии санитарно-эпидемиологического заключения о соответствии условий и способов транспортировки санитарным правилам.

Переработку, долговременное хранение и захоронение радиоактивных отходов производят специализированные организации по обращению с радиоактивными отходами.

Выбор места захоронения радиоактивных отходов производится с учетом гидрогеологических, геоморфологических, тектонических и сейсмических условий. При этом должна быть обеспечена радиационная безопасность населения и окружающей среды в течение всего срока изоляции отходов с учетом долговременного прогноза.

Эксплуатирующая организация должна один раз в пять лет в соответствии с требованием нормативных документов обеспечить проведение инвентаризации РАО путем проверки их фактического наличия и сравнения полученных данных с данными учетных документов. Эффективная доза облучения населения, обусловленная радиоактивными отходами, включая этапы хранения и захоронения, согласно ОСПОРБ–99 не должна превышать 10 мкЗв/год.

Допустимые выбросы и сбросы, рассчитанные исходя из величины минимально значимой дозы, должны устанавливаться для АС в целом независимо от количества эксплуатируемых блоков на площадке.

Эксплуатирующая организация должна:

- своевременно информировать органы государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии и природоохранные органы о нарушениях эксплуатации систем обращения с РАО и авариях на них, влекущих за собой загрязнение рабочих помещений, площадки АС или объектов окружающей среды;
- представлять органам государственного регулирования безопасности и природоохранным органам информацию по вопросам обеспечения безопасности при обращении с РАО в объеме и по форме, установленных указанными органами.

1.9. Методы регистрации и дозиметрии излучений

С целью предупреждения заболеваний от переоблучения на производствах, где выполняются работы с применением радиоактивных веществ, систематически проводится дозиметрический контроль, позволяющий своевременно обнаруживать повышенные уровни радиации и применять оперативные меры защиты. Контроль ионизирующих излучений бывает двух видов: общий и индивидуальный.

Общий контроль устанавливает степень радиоактивного загрязнения поверхностей стен, пола и потолка помещений, воздушной среды в них, спецодежды работников и т.п. Он

осуществляется переносными и стационарными приборами, соответствующими требованиям ГОСТ 29074–91 «Аппаратура контроля радиационной обстановки. Общие требования» и ГОСТ 28271–89 «Приборы радиометрические и дозиметрические носимые. Общие технические требования, методы испытаний». Действие этих приборов основано на различных принципах. Наиболее часто используется принцип ионизации среды, через которую проходит излучение (ионизационные камеры).

Широко применяется также сцинтилляционный метод регистрации излучений. Сцинтилляционные счетчики применяются для измерения числа частиц бета-, гамма- и нейтронного излучения.

Для контроля больших доз излучений применяют химические и калориметрические методы.

Индивидуальный контроль осуществляется с помощью дозиметров. Уми снабжается весь персонал, обслуживающий радиационные установки, а также имеющий контакт с радиоактивными веществами.

1.9.1. Ионизационный метод регистрации излучения

Ионизационный метод регистрации излучений основан на ионизирующем действии излучений.

Под действием любого ионизирующего излучения в веществе (газе) из нейтральных атомов или молекул образуются ионы-частицы, несущие положительные или отрицательные электрические заряды. Положительные ионы возникают в результате отрыва от атома, молекулы или группы молекул одного или нескольких внешних электронов. Такие электроны в зависимости от рода газа либо остаются свободными, либо присоединяются к нейтральным частицам газа, образуя отрицательные ионы. В обычных условиях образовавшиеся ионы существуют недолго, они рекомбинируют, т.е. вновь соединяются в нейтральные атомы и молекулы.

Наиболее подвижны ионы в газе. В электрическом поле они довольно быстро перемещаются к соответствующим электродам, вследствие чего рекомбинация незначительна. При отсутствии источника излучения проводимость газа настолько мала, что практически ею можно пренебречь.

При работе с различными радиоактивными источниками приходится измерять силу ионизационного тока от 10^{-16} до 10^{-11} а. Такие незначительные по величине токи измерить даже самыми чувствительными гальванометрами не представляется возможным. Ионизационные токи менее 10^{-11} а измеряются: методом зарядки или

разрядки известной емкости; методом компенсации и методом постоянного отклонения.

Для измерений во всех случаях применяются ионизационные камера или счетчик и регистрирующая схема, содержащая чувствительный прибор.

Ионизационная камера. Ионизационная камера (рис. 1.9.1) представляет собой конденсатор, состоящий из электродов 1 и 2, между которыми находится газ. Электрическое поле между электродами создается от внешнего источника 4. При отсутствии радиоактивного источника 5 ионизации в камере не происходит и прибор, служащий для измерения тока, показывает нуль. Под действием ионизирующего излучения в газе камеры возникают положительные и отрицательные ионы. Под действием электрического поля на хаотическое движение ионов накладывается движение дрейфа: отрицательные ионы движутся к положительно заряженному электроду, положительные – к отрицательно заряженному электроду. В цепи возникает ток, который регистрируется измерительным прибором 3.

Если приложенную к цепи разность потенциалов постепенно увеличивать, начиная с нуля, при постоянной интенсивности излучения, то оказывается, что ток в цепи вначале увеличивается пропорционально приложенной разности потенциалов (рис. 1.9.2, область *a*), а затем его увеличение замедляется до тех пор, пока он не становится постоянным по величине, несмотря на увеличение разности потенциалов (область *б*). При очень больших разностях потенциалов ток снова возрастает, пока не наступит пробой (область *в*).

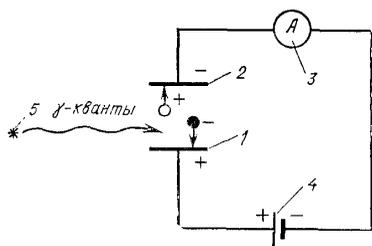


Рис. 1.9.1. Ионизационная камера

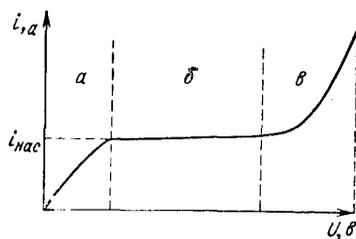


Рис. 1.9.2. Вольт-амперная характеристика ионизационной камеры

Полученную зависимость ионизационного тока от напряжения называют *вольт-амперной характеристикой* ионизационной камеры.

Физические явления, происходящие в ионизационной камере, можно объяснить следующим образом.

Величина ионизационного тока определяется суммарным электрическим зарядом ионов, достигших соответствующих электродов в течение 1 с. В слабом электрическом поле (область *a*) только часть образовавшихся ионов может попасть на электроды. Большая же часть ионов с разными знаками рекомбинирует друг с другом, т.е. заряды их нейтрализуются, прежде чем они достигают электродов. В этом случае камера малоэффективна для регистрации излучения.

В более сильном электрическом поле (область *b*) скорость движения ионов возрастает, а вероятность рекомбинации уменьшается до нуля, и все ионы, образующиеся в газе, попадают на электроды. При этом ионизационный ток возрастает и достигает значения насыщения $i_{\text{нас}}$. Ионизационные камеры обычно работают в режиме тока насыщения. По току насыщения можно определить интенсивность излучения и активность радиоактивного вещества.

Ионизационные камеры в зависимости от назначения можно разделить на две группы.

1. *Импульсные*, предназначенные для измерения числа частиц и их энергии путем регистрации импульсов тока, возникающих в камере при прохождении через нее заряженных частиц.

2. *Интегрирующие*, предназначенные для измерения ионизационного тока, возникающего при прохождении через камеру потока частиц за некоторый, но не слишком малый интервал времени.

Основное различие между импульсными и интегрирующими ионизационными камерами состоит в разном значении постоянной времени RC -контура, в состав которого входят камера и радиометрическое устройство.

Ионизационными камерами можно измерить отношение или разность двух ионизационных токов. Такие камеры называются *дифференциальными*. Дифференциальная камера состоит из двух ионизационных камер с общим собирающим (центральным) электродом.

По конструктивному оформлению ионизационные камеры можно разделить на три класса.

1. Камеры, в измерительном объеме которых ионизация возникает за счет частиц от источника, расположенного внутри самой камеры, называются *камерами с внутренним расположением источника*. Их используют для измерения ионизации от α -частиц или нейтронов.

2. Камеры, в измерительном объеме которых ионизация производится в меньшей степени частицами, возникающими в измерительном объеме, и в большей степени частицами, выбитыми из стенок камеры, называются *стеночными*. Малые стеночные камеры известны под названием *наперстковых*. Они применяются для измерения ионизации от γ -, β - и нейтронных потоков.

3. Камеры, в измерительном объеме которых ионизация создается не только частицами, образующимися в измерительном объеме, но и частицами, поступающими в измерительную среду из окружающего газа, называются камерами со свободным газом, а иногда *диафрагмовыми*, или *нормальными*, камерами. Они служат для абсолютных измерений дозы рентгеновского и γ -излучений в рентгенах.

Из весьма разнообразных форм стеночных камер наиболее часто встречаются *цилиндрические* камеры (рис. 1.9.3), которые применяются главным образом для измерения γ -излучения.

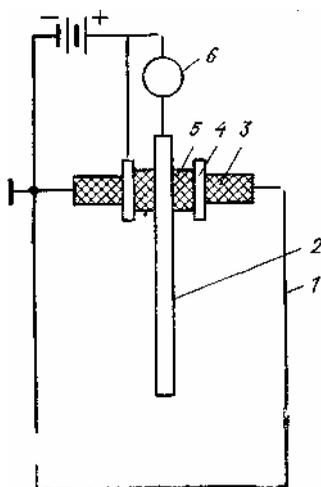


Рис. 1.9.3. Стеночная цилиндрическая камера

Цилиндрическая ионизационная камера состоит из основного цилиндрического электрода 1 и центрального электрода 2, закрепленного на изоляторах 3 и 5 по оси цилиндра. Центральный электрод является собирающим; на него подается высокое напряжение со знаком плюс, а цилиндрический электрод заземляется.

Цилиндрический электрод, являющийся стенками ионизационной камеры, выполняется из воздухоэквивалентного материала (бакелит, флексиглас и т.п.), чтобы избежать хода с жесткостью [*ходом с жесткостью* ионизационной камеры принято называть зависимость

ее чувствительности ($i_{\text{н}}/P_{\text{в}}$ – отношение тока насыщения к мощности дозы в воздухе) от энергии γ -квантов]; центральный электрод – из токопроводящего материала. Изоляторы выполняются из материалов с большим электрическим сопротивлением (изолятор 5 – из янтаря, полистирола; изолятор 3 – из текстолита, гетинакса).

Для устранения тока утечки между электродами часто применяют охранные кольца 4. Высокая разность потенциалов приложена между охранным кольцом 4 и цилиндрическим электродом 1. Разность потенциалов между охранным кольцом 4 и электродом 2, соединенным с измерительным прибором 6, очень мала, и большая часть тока утечки уходит мимо прибора.

Нормальные ионизационные камеры бывают плоские и цилиндрические. Рассмотрим схему нормальной цилиндрической камеры (рис. 1.9.4).

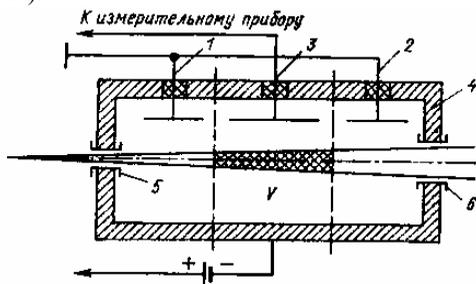


Рис. 1.9.4. Нормальная цилиндрическая камера

Нормальная камера состоит из двух защитных электродов 1, 2, измерительного электрода 3, корпуса 4, входной 5 и выходной 6 диафрагм. Защитные электроды предназначены для обеспечения равномерности электрического поля в измерительном объеме V и для отвода вторичных электронов, выбитых из стенок входной и выходной диафрагм, с тем, чтобы они не были источниками дополнительной ионизации в измерительном объеме. Корпус камеры выполняется из латуни, снаружи обшивается свинцом, изнутри – алюминием. Диафрагмы чаще всего выполняются из платины. Отверстие диафрагмы закрыто тонким целлулоидом для предотвращения попадания посторонних частиц внутрь объема камеры.

Пучок ионизирующего излучения направляется по оси камеры. Измерительный объем камеры определяется сечением входной диафрагмы и длиной измерительного электрода.

Зная объем, в котором поглощается первичное излучение, и величину ионизационного тока, можно определить абсолютное значение экспозиционной дозы.

Нормальные ионизационные камеры применяются для градуировки стеночных ионизационных камер.

Газовые счетчики. Газовый счетчик представляет собой детектор (по конструкции аналогичный ионизационной камере), предназначенный для регистрации отдельных ядерных частиц. В отличие от ионизационных камер в газовых счетчиках для усиления ионизационного тока используется газовый разряд.

Благодаря высокой чувствительности счетчик реагирует на каждую ионизирующую частицу, возникающую внутри объема газа или проникающую в него из стенки счетчика.

В зависимости от характера используемого газового разряда счетчики можно разделить на два типа: 1) пропорциональные счетчики (с несамостоятельным разрядом); 2) счетчики Гейгера (с самостоятельным разрядом).

Счетчики, в которых амплитуда импульсов пропорциональна потерянной энергии частиц в газовом объеме, называются *пропорциональными*.

Пропорциональный счетчик можно рассматривать как наперстковую камеру, удовлетворяющую условиям Грея (линейные размеры объема счетчика малы, а стенки имеют достаточную толщину). Однако чувствительность счетчика по сравнению с наперстковой камерой будет в f раз больше.

Счетчики, работающие в области самостоятельного разряда (гейгеровская область), называются *счетчиками Гейгера–Мюллера*.

В зависимости от рода газа, заполняющего счетчики Гейгера–Мюллера, они подразделяются на *самогасящиеся*, в которых разряд прекращается под действием внутренних причин за интервал времени порядка 10^{-7} с с момента возникновения, и *несамогасящиеся*, в которых возникший разряд горит до тех пор, пока не прекратится от внешнего воздействия.

В настоящее время больше используются самогасящиеся счетчики.

Конструктивное оформление счетчика зависит от рода и энергии регистрируемых частиц. Счетчики, предназначенные для счета β - и длинноволнового γ -излучения, имеют стенку из легкого материала во избежание полного поглощения излучения в самой стенке счетчика. Для высокоэнергетического излучения применяются более толстые стенки.

Для регистрации низкоэнергетического излучения β -частиц с энергией 0,05–0,3 Мэв (иногда и α -частиц) предназначен *торцевой счетчик* (рис. 1.9.5). Особенностью конструкции торцевого счетчика является окно в торце счетчика, закрытое пластинкой из слюды 1 толщиной 0,01 мм или нейлона, через которое β -частицы входят внутрь счетчика, теряя незначительную долю энергии в окис счетчика. Анодом счетчика служит вольфрамовая нить 2. Один конец нити закреплен в стеклянном корпусе счетчика 3, а на другом, свободном конце нити напаян стеклянный шарик 6 предназначенный для предотвращения искажения электрического поля на конце нити.

Цилиндрическая стенка счетчика 7, выполненная из металла, служит катодом. Токовводами являются контакты 4, 5.

Для регистрации β -частиц более высоких энергий 0,3–0,4 Мэв и выше применяются *цилиндрические счетчики* (рис. 1.9.6, а), катод которых выполнен из тонкой алюминиевой фольги 1 (толщиной 0,1 мм), а анод – из вольфрамовой нити 2, крепящейся на стеклянных изоляторах 3, 4. Выводами для электродов служат контакты 5 и 6. β -частицы с энергией 0,2 Мэв полностью поглощаются стенками счетчика, поэтому он непригоден для их подсчета.

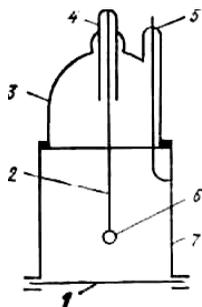


Рис. 1.9.5. Торцевой счетчик

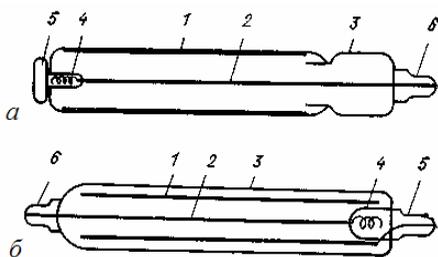


Рис. 1.9.6. Цилиндрический счетчик

Торцевые и цилиндрические счетчики наполняются гасящими газами и работают в области Гейгера.

Эффективность описанных счетчиков для β -частиц около 100 %. *Эффективностью счетчика* называется выраженное в процентах отношение числа регистрируемых частиц к числу всех частиц, прошедших через поверхность катода счетчика.

Полупроводниковые счетчики. Поиски более совершенных счетчиков привели к созданию *германиевых и кремниевых счетчиков*. Принцип их действия подобен принципу действия ионизационных камер. Электрическое поле создается в среде с низкой проводимостью.

Когда заряженная частица проникает в эту среду, то, если это газовая камера, происходят соударения и образуются пары ионов, если это твердая камера (полупроводниковый детектор) – электронно-дырочные пары. В идеальном случае заряды должны разделяться электрическим полем и собираться на границах, производя электрический импульс, который можно усилить и записать.

1.9.2. Люминесцентные методы дозиметрии

Сцинтилляционные детекторы. Сцинтилляционные методы регистрации излучений основаны на измерении интенсивности световых вспышек, возникающих в люминесцирующих веществах при прохождении через них ионизирующих излучений. Для регистрации световых вспышек используется *фотоэлектронный умножитель* (ФЭУ) с регистрирующей электронной схемой.

Вещества, испускающие свет под действием ионизирующего излучения, называются *сцинтилляторами* (фосфорами, флуорами, люминофорами). Однако известно, что среди твердых, жидких и газообразных веществ материалы с хорошими люминесцирующими свойствами встречаются довольно редко. У подавляющего большинства веществ энергия возбужденного атома переходит в энергию движения молекул или в тепло, так как благодаря взаимодействию соседних атомов и молекул среды энергия возбужденного атома передается соседним атомам и молекулам, прежде чем сможет произойти испускание излучения.

Впервые метод сцинтилляции был использован для визуального подсчета числа α -частиц с помощью *спинтарископа*, схематическое изображение которого показано на рис. 1.9.7.

Основным элементом спинтарископа является экран *1* из сернистого цинка, на котором через лупу *3* можно наблюдать отдельные вспышки (сцинтилляции) от α -частиц, излучаемых радиоактивным препаратом, нанесенным на острие *2*.

Спинтарископ до настоящего времени широко используется и учебных лабораториях, так как является весьма наглядным прибором. Однако временная разрешающая способность глаз человека позволяет вести счет сцинтилляций на спинтарископе со скоростью не более 60 вспышек в 1 мин, вследствие чего этот прибор не нашел широкого применения на практике.

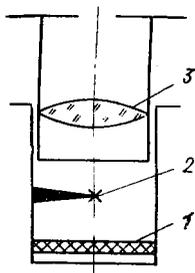


Рис. 1.9.7. Спинтарископ

С появлением устойчивых в работе фотоэлектронных умножителей сцинтилляционный метод стал широко применяться в дозиметрии.

Современный *сцинтилляционный счетчик* представляет собой комбинацию сцинтилляционного кристалла (сцинтиллятора) с ФЭУ. ФЭУ позволяют преобразовывать слабые световые вспышки от сцинтиллятора в достаточно большие электрические импульсы, которые можно зарегистрировать обычной несложной электронной аппаратурой. ФЭУ в некоторой степени можно сравнивать с пропорциональными счетчиками. В пропорциональных счетчиках для увеличения импульса используется газовое усиление, а в ФЭУ – вторичная эмиссия электронов на динодах, приводящая к значительному усилению электронного тока (коэффициент усиления фотоэлектронных умножителей достигает 10^5 – 10^{10}).

Сцинтилляционные счетчики можно применять для измерения числа заряженных частиц, γ -квантов, быстрых и медленных нейтронов; для измерения мощности дозы от β -, γ - и нейтронного излучений; для исследований спектров γ - и нейтронного излучений.

Сцинтилляционный метод имеет ряд преимуществ перед другими методами. Прежде всего, это высокая эффективность для проникающих излучений (для γ -излучения – десятки процентов). Далее, малое время высвечивания сцинтилляторов (для неорганических кристаллов – порядка 10^{-7} с, для органических – 10^{-2} – 10^{-9} с). Это обеспечивает высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных счетчиков или малое мертвое время счетчиков. Следовательно, представляется возможность проводить измерения с короткоживущими радионуклидами.

Сцинтилляционные счетчики имеют чувствительность на несколько порядков выше, чем ионизационные камеры и газовые пропорциональные счетчики.

Наконец, для ряда сцинтилляторов и для определенных излучений существует пропорциональность между амплитудой светового

импульса и энергией частицы, что удобно при использовании сцинтилляционных счетчиков для спектрометрии ионизирующих излучений.

Рассмотрим вначале схему сцинтилляционного счетчика (рис. 1.9.8), а затем процессы, происходящие в нем.

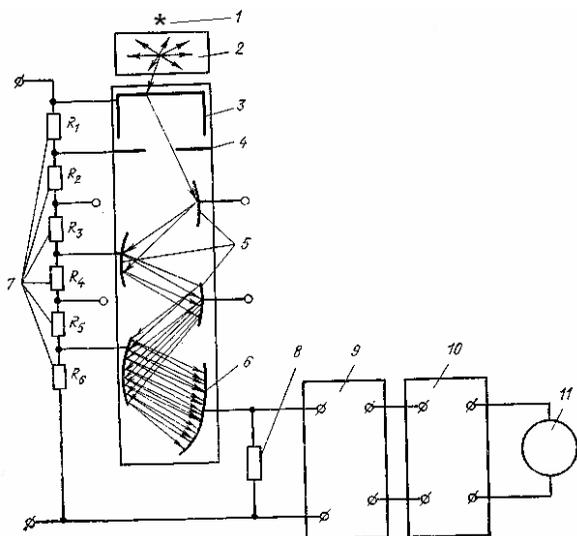


Рис. 1.9.8. Схема сцинтилляционного счетчика

Ионизирующее излучение, выходящее из источника *1*, поступает в сцинтиллятор *2* и создает в нем сцинтилляционные вспышки. Часть фотонов, испускаемых сцинтиллятором, попадает на катод ФЭУ *3*. ФЭУ представляет собой баллон, в котором создан вакуум. На один из участков внутренней поверхности ФЭУ нанесен полупрозрачный сурьмяно-цезиевый слой, служащий катодом. Под воздействием фотонов с катода вырываются фотоэлектроны, которые, пройдя фокусирующую диафрагму *4*, электрическим полем последовательно направляются на электроды-умножители (диноды или эмиттеры) *5* и собираются на аноде (коллекторе) *6*. Для питания ФЭУ используются источник стабилизированного напряжения – 1000–2200 В и R_1 – R_6 – делитель напряжения *7*. Далее через анод потечет ток и на сопротивлении *8* появится импульс напряжения, который, пройдя усилитель *9*, поступает на пересчетный прибор *10* и механический счетчик *11*. Процессы, происходящие в сцинтилляционном счетчике, можно разделить на следующие стадии: 1) поглощение излучения в

сцинтилляторе и образование заряженных частиц; 2) ионизация и возбуждение атомов и молекул сцинтиллятора заряженными частицами и излучение фотонов; 3) соби́рание фотонов на фотокатод ФЭУ; 4) поглощение фотонов на катоде ФЭУ и выход фотоэлектронов; 5) фокусировка фотоэлектронов на 1-й эмиттер и электронное умножение.

Фотографический метод дозиметрии. С помощью фотографического метода были получены первые сведения об ионизирующих излучениях радиоактивных веществ. В настоящее время этот метод используется для индивидуального контроля дозы рентгеновского, γ -, β - и нейтронного излучений, при измерении космических излучений, излучений высокоэнергетических ускорителей. В связи с этим рассмотрим только некоторые основные положения фотографического метода.

В состав светочувствительной эмульсии входит бромистое серебро AgBr или хлористое серебро AgCl , находящееся внутри слоя желатина. После нанесения эмульсии на целлулоид, стекло, бумагу образуются фотопленка, фотопластинка и фотобумага. При облучении светочувствительного слоя γ -квантами воздействие оказывают электроны, образованные при поглощении γ -квантов в пространстве, окружающем фотоэмульсию, в частности, в кассете и в самом слое фотоэмульсии.

Предположим, что на заряженную кассету падают γ -кванты, которые поглощаются, образуя вторичные электроны разной энергии. Электроны с определенной энергией взаимодействуют с AgBr , нейтрализуя положительный ион серебра и образуя, таким образом, на поверхности зерен центры проявления – атомы металлического серебра. В дальнейшем под действием проявителя эти центры способствуют восстановлению металлического серебра из зерен AgBr . При фиксировании происходят растворение и удаление из эмульсии кристаллов AgBr , не содержащих центров проявления.

Фотоэмульсии различной чувствительности используются для дозиметрических целей в широком диапазоне доз. Фотопленки помещают в специальные кассеты вместе с фильтром, предназначенным для улучшения энергетической характеристики и для дискриминации отдельных видов излучения. Способность фотоэмульсии регистрировать излучение, преобразованное различными фильтрами, позволяет получать подробные сведения о количестве измеряемого излучения.

Химически обработанная пленка имеет прозрачные и почерневшие места, которые соответствуют незасвеченным и засвеченным участкам

фотоэмульсии. Используя этот эффект для дозиметрии, можно устанавливать связь между степенью почернения пленки S и поглощенной дозой D .

В результате сенситометрических определений находится чувствительность S/D фотоматериалов к излучению. S/D обычно выражается в «обратных рентгенах», т.е. задается определенная доза D в рентгенах, необходимая для получения определенного почернения S .

1.9.3. Калориметрический метод дозиметрии

Энергия излучения, поглощаемая веществом, в конечном итоге преобразуется в тепловую энергию, если это вещество является химически инертным к излучению и в нем не возникает вторичного излучения и не происходит перестройки кристаллической решетки.

Различными калориметрическими методами можно измерить количество тепла Q (ккал), выделенного в поглощающем веществе. Эти методы, в основе которых лежит измерение повышения температуры Δt , увеличения объема ΔV поглощающего тела, а также количества вещества, перешедшего из одной фазы в другую (жидкий азот, газообразный азот и т.д.), применимы для измерения достаточно больших мощностей доз.

Количество тепла Q , выделенное радиоактивным веществом, можно также определить, если известны энергия E , освобождающаяся при одном акте распада, и активность источника C (кюри). Тогда

$$Q = 3,7 \cdot 10^{10} C (E_{\alpha} \eta_{\alpha} + E_{\beta} \eta_{\beta} + E_{\gamma} \eta_{\gamma}),$$

где E_{α} , E_{β} , E_{γ} – энергия α -, β -, γ -излучений соответственно; η_{α} , η_{β} , η_{γ} – коэффициент, показывающий долю энергии, поглощенную в калориметре от α -, β -, γ -излучений. Для α - и β -излучений этот коэффициент равен единице, а для γ -излучения он может быть меньше единицы.

Калориметрические методы используются для градуировки дозиметров, основанных на других методах определения поглощенных доз (например, для градуировки химических дозиметров), а также для измерения совместного и раздельного γ - и нейтронного излучений в ядерных реакторах, ускорителях, где мощность поглощенной дозы составляет несколько десятков рад в час. Появились новые направления: реакторная калориметрия, калориметрия пучков ускорителей, калориметрия локальных доз. Калориметры используются как измерительные приборы в радиационной химии, физике, биологии и других областях науки.

Одним из основных применений калориметрического метода является измерение активностей источников ионизирующих излучений, особенно объемных препаратов, источников с малой нестационарной удельной активностью.

Классификация калориметров. Калориметрические методы дозиметрии имеют ряд особенностей по сравнению с ионизационными и другими методами. Для измерения количества выделившегося тепла, а следовательно, и дозы облучения не нужно знать такие величины, как средняя энергия ионообразования, отношение тормозных способностей. Это значительно упрощает вычисление и измерение дозиметрических параметров. Однако калориметрические методы имеют довольно низкую чувствительность (что будет показано несколько ниже) по сравнению с другими методами, так как сложно измерить малые изменения температур и трудно исключить влияние температуры окружающей среды на температуру поглощающего вещества. Для частичного исключения влияния этих факторов можно выбрать определенный режим работы калориметра. Различают – изотермические или адиабатические калориметры.

Обозначим истинную скорость изменения температуры поглощающего вещества под действием ионизирующего излучения $(dT/d\tau)^{\text{погл}}$, а измеренную скорость изменения температуры поглотителя $(dT/d\tau)_{\text{измер}}^{\text{погл}}$. Тогда

$$\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\text{измер}}^{\text{погл}} = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\text{погл}} + K(T_{\text{погл}} - T_{\text{обол}}),$$

где $T_{\text{погл}}$ и $T_{\text{обол}}$ – температура поглощающего вещества и его оболочки; K – коэффициент, характеризующий теплообмен между поглощающим веществом и оболочкой.

Изотермические. При изотермическом режиме работы калориметра температура оболочки $T_{\text{обол}}$ должна поддерживаться постоянной. Под действием ионизирующего излучения температура поглощающего вещества будет стремиться к определенному пределу. При постоянном значении $T_{\text{обол}}$ и K температура поглотителя $T_{\text{погл}}$ будет определяться $(dT/d\tau)_{\text{измер}}^{\text{погл}}$, т.е. мощностью поглощенной дозы.

Адиабатические. При адиабатическом режиме работы калориметра теплообмена между поглощающим веществом и оболочкой не должно быть. Для этого температура оболочки должна быть равной температуре поглощающего вещества $T_{\text{обол}} = T_{\text{погл}}$, тогда $(dT/d\tau)_{\text{измер}}^{\text{погл}}$ будет определяться мощностью поглощенной дозы.

Кроме изотермических и адиабатических калориметров применяются *статические калориметры теплового потока* (теплопроводности), в которых выделившаяся тепловая энергия передается экрану калориметра.

1.9.4. Химический метод дозиметрии

Развитию химических методов способствовало применение мощных облучательных установок (с мощностью дозы до 10^5 р/мин) в сельском хозяйстве (воздействие на генетику растений), в пищевой промышленности (облучение различных продуктов и консервов в целях их длительного хранения), в металлургии (дефектоскопия), а также использование мощных источников ионизирующих излучений в научных целях: измерение доз излучения при ядерных взрывах, в мощных кобальтовых установках и ускорителях заряженных частиц, в экспериментах по исследованию влияния излучения на различные вещества (исследование радиационной стойкости веществ; физические и химические изменения, происходящие под действием излучений; поведение раковых опухолей под облучением и т.д.).

Химический метод дозиметрии основан на наблюдении необратимых химических изменений, производимых излучением в веществе. Продукты химических реакций определяются либо непосредственно по изменению цвета, либо косвенно, с помощью способов химического анализа (титрованием, измерением электропроводности, спектрофотометрией и др.).

2. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Одним из крупнейших открытий последнего десятилетия нашего века являются лазеры.

Лазеры – это квантовые генераторы оптического диапазона, или просто генераторы света. В основу их работы положено явление усиления электромагнитных колебаний при помощи вынужденного, индуцированного излучения атомов и молекул. Оно было предсказано еще в 1917 г. Альбертом Эйнштейном при изучении им равновесия между энергией атомных систем и их излучением. С этого времени и начинается история создания лазеров.

В 1940 г., анализируя спектр газового разряда, советский ученый Фабрикант В.А. указал, что, используя явление индуцированного излучения, можно добиться усиления света. В 1951 г., совместно с

учеными Ф.А. Бугаевой и М.М. Вудынским, он провел первые опыты в этом направлении.

В 1952 г. ученые трех стран одновременно – в Советском Союзе Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, в Соединенных Штатах Америки Ч. Таунс, Дж. Гордон, Х. Цайгер и в Канаде Дж. Вебер – независимо друг от друга предложили основанный на использовании явления индуцированного излучения новый принцип генерации и усиления сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний. Это позволило создать квантовые генераторы сантиметрового и дециметрового диапазонов, известные сейчас под названием лазеров, которые обладали очень высокой стабильностью частоты. Использование лазеров в качестве усилителей позволило повысить чувствительность приемной радиоаппаратуры в сотни раз. Сначала в квантовых генераторах использовались двухуровневые энергетические системы и пространственная сортировка молекул с различными энергетическими уровнями в неоднородном электрическом поле. В 1955 г. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили использовать для получения неравновесного состояния частиц трехуровневые энергетические квантовые системы и внешнее электромагнитное поле для возбуждения.

В 1958 г. была рассмотрена возможность применения этого метода для создания генераторов оптического диапазона (в СССР — Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю.М. Попов, А. Н. Прохоров; в США – Ч. Таунс и А. Шавлов).

Опираясь на результаты этих исследований, Т. Мейман (США) в декабре 1960 г. построил первый успешно работавший оптический квантовый генератор, в котором в качестве активного вещества был использован синтетический рубин. С созданием оптического квантового генератора на рубине возникло слово «лазер». Это слово составлено из первых букв английского выражения: «light amplification by stimulated emission of radiation» (laser), что в переводе означает «усиление света с помощью индуцированного излучения».

Рубиновый лазер работал в импульсном режиме. Его излучение относилось к красной области видимого диапазона. Возбуждение осуществлялось мощным источником света.

Через год, в 1961 г., американские ученые А. Джаван, В. Беннет и Д. Герриотт построили газовый лазер, в котором в качестве активного вещества применялась смесь газов гелия и неона. Возбуждение активного вещества лазера производилось электромагнитным полем высокочастотного генератора. Режим работы этого лазера был непрерывным.

В 1962 г. в Советском Союзе и в Соединенных Штатах Америки получили индуцированное излучение в полупроводниковом диоде, что означало создание полупроводникового лазера. Впервые обратили внимание на возможность использования полупроводников в качестве активного вещества ученые Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю. М. Попов. Большая заслуга в создании полупроводникового лазера принадлежит также американскому ученому Р. Холлу. Полупроводниковый лазер возбуждается непосредственно электрическим током. Он работает как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

В настоящее время в качестве рабочих веществ в лазерах используются самые различные материалы. Генерация получена более чем на ста веществах: кристаллах, активированных стеклах, пластмассах, газах, жидкостях, полупроводниках, плазме. Рабочим веществом могут служить органические соединения, активированные ионами редкоземельных элементов. Удалось получить генерацию с использованием обычных паров воды и даже воздуха. Создан новый класс газовых лазеров – так называемые ионные лазеры.

Рабочий диапазон существующих оптических квантовых генераторов изменяется от ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,3 мкм до инфракрасного с длиной волны 300 мкм.

В ближайшем будущем связь с космическими ракетами и кораблями будет осуществляться с помощью лазеров. Использование же лазеров в наземной связи приведет к подлинному перевороту в технике связи. При этом неизмеримо возрастет количество информации, передаваемой по линиям связи. Только по одному лазерному лучу практически представляется возможным осуществлять около миллиарда одновременных телефонных переговоров.

2.1. Основные свойства лазерного луча

Лазерное излучение – это электромагнитные излучения с длиной волны 0,2 – 1000 мкм: 0,2–0,4 мкм – ультрафиолетовое; свыше 0,4 до 0,75 мкм – видимая область; свыше 0,75 до 1 мкм – ближняя инфракрасная область; свыше 1,4 мкм – дальняя инфракрасная область.

Лазеры являются уникальными источниками света. Их уникальность определяют свойства, которыми не обладают обычные источники света. В противоположность, например, обычной электрической лампочке, электромагнитные волны, зарождающиеся в различных частях оптического квантового генератора, удаленных друг от друга на макроскопические расстояния, оказываются *когерентны*

между собой. Это значит, что все колебания в различных частях лазера происходят согласованно.

Чтобы разобрать понятие когерентности, нужно вспомнить понятие интерференции. *Интерференция* – это взаимодействие волн, при котором происходит сложение их амплитуд. Если удастся запечатлеть процесс этого взаимодействия, то можно увидеть так называемую интерференционную картину (она выглядит как чередование темных и светлых участков).

Интерференционную картину осуществить довольно трудно, так как обычно источники исследуемых волн порождают волны несогласованно, и сами волны при этом будут гасить друг друга. В этом случае интерференционная картина будет чрезвычайно размыта или же не будет видна вовсе. Процесс взаимного гашения схематично представлен на рис. 2.1.1, *а*. Следовательно, решение проблемы получения интерференционной картины лежит в использовании двух зависимых и согласованных источников волн. Волны от согласованных источников излучают таким образом, что разность хода волн будет равна целому числу длин волн. Если это условие выполняется, то амплитуды волн накладываются друг на друга и происходит интерференция волн (рис. 2.1.1, *б*). Тогда источники волн можно назвать *когерентными*.

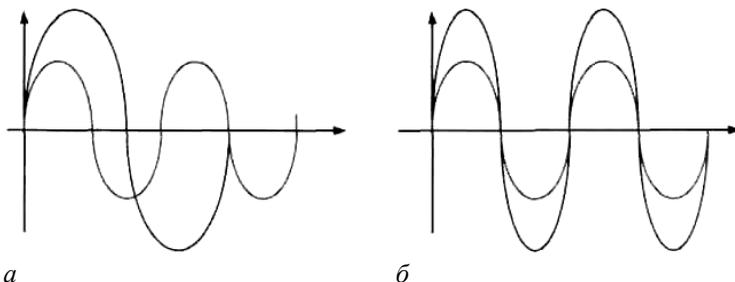


Рис. 2.1.1. Взаимодействие волн:

а – некогерентные волны (взаимное гашение); *б* – когерентные волны (сложение амплитуд волн)

С понятием когерентности связано понятие пространственной когерентности. Два источника электромагнитных волн, размеры и взаимное расположение которых позволяет получить интерференционную картину, называются пространственно когерентными.

Другой замечательной чертой лазеров, тесно связанной с когерентностью их излучения, является *способность к концентрации*

энергии – концентрации во времени, в спектре, в пространстве, по направлению распространения. Первое означает то, что излучение оптического генератора может длиться всего около сотни микросекунд.

Концентрация в спектре предполагает, что ширина спектральной линии лазера очень узка. Это *монохроматичность*.

Лазеры также способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения. Как правило, это значение достигает 10^{-5} рад. Это значит, что на Луне такой пучок, посланный с Земли, даст пятно диаметром около 3 км. Это является проявлением концентрации энергии лазерного луча в пространстве и по направлению распространения.

Для некоторых квантовых генераторов характерна чрезвычайно высокая степень монохроматичности их излучения. Любой поток электромагнитных волн всегда обладает набором частот. Излучение и поглощение атомной системы характеризуется не только частотой, но и некоторой неопределенностью этой величины, называемой шириной спектральной линии (или полосы). Абсолютно монохроматического одноцветного потока создать нельзя, однако, набор частот лазерного излучения чрезвычайно узок, что и определяет его очень высокую монохроматичность.

Нужно отметить, что линии лазерного излучения имеют сложную структуру и состоят из большого числа чрезвычайно узких линий. Применяя соответствующие оптические резонаторы, можно выделить и стабилизировать отдельные линии этой структуры, создав тем самым одночастотный лазер.

Высокая когерентность и монохроматичность излучения позволяют сфокусировать пучок света, выходящий из лазера, с помощью системы линз на площадку чрезвычайно малой величины. В пределе диаметр пятна при фокусировке пучка приближается к длине волны, излучаемой лазером. Если мы возьмем обычный источник света (допустим, что это обыкновенная электрическая лампочка), то сфокусировать его лучи в одну точку не удастся, так как от этого источника лучи распространяются в разные стороны, они не параллельны. В плоскости фокуса мы получим изображение предмета (источник света) пусть даже небольших, но далеких от геометрической точки размеров (рис. 2.1.2, *a*). Другой причиной, почему это не удастся сделать, является то, что излучение от обычного источника света содержит множество составляющих различных длин волн, которые по-разному преломляются в фокусирующей линзе. Следовательно, в плоскости фокуса можно сфокусировать только излучение какой-то

одной длины волны (рис. 2.1.2, б). Излучение же лазера строго параллельно, имеет одну определенную постоянную длину волны, поэтому его удается с помощью оптических систем сфокусировать в одну точку диаметром, близким к длине волны излучения (рис. 2.1.2, в). С этим обстоятельством и связана возможность получения чрезвычайно высокой плотности мощности излучения лазера.

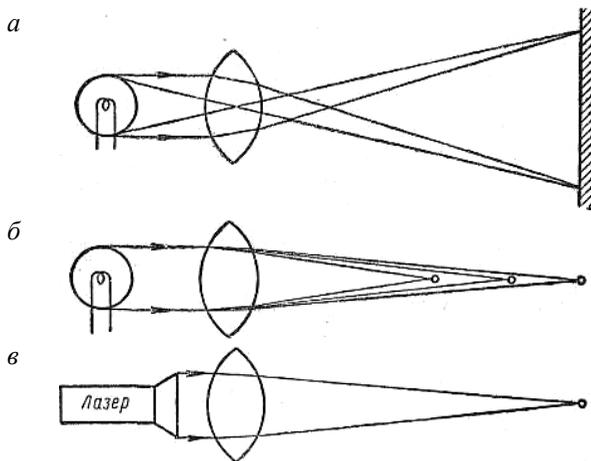


Рис. 2.1.2. Характеристика луча от обычного источника света и от лазера:
 а – световой пучок нельзя свести в одну точку вследствие непараллельности его отдельных составляющих; источник света имеет конечные размеры; б – световой пучок нельзя свести в одну точку из-за различных длин волн отдельных составляющих пучка; в – световой пучок лазера удается свести в одну точку, соизмеримую с длиной волны излучения, так как лучи лазера параллельны и монохроматичны

Для рубинового лазера минимальный диаметр светового пятна равен 0,7 мкм. В общем случае диаметр пятна определяется фокусным расстоянием линзы и угловой расходимостью луча. Если эти величины известны, то легко определить возможный минимальный диаметр пятна по следующей простой формуле:

$$d = f \cdot \theta,$$

где f – фокусное расстояние линзы, м; d – диаметр, м; θ – угловая расходимость, рад.

Если для примера взять линзу с фокусным расстоянием 5 см, а угловую расходимость луча выбрать равной 10^{-4} рад, то получим

$$d = 0,05 \cdot 10^{-4} = 5 \text{ мкм.}$$

Чем меньше фокусное расстояние, тем меньше размеры пятна. С уменьшением площади светового пятна возрастает плотность

светового потока. Если предположить, что лазер дает излучение мощностью в милливатт и диаметр на выходе лазера равен 1 см, то, сконцентрировав эту мощность на площадке диаметром 5 мкм, получим плотность светового потока $4 \cdot 10^{12}$ Вт/см². Правда, такая фантастическая плотность светового потока будет лишь в области точки фокуса. Получить сколько-нибудь протяженный тонкий пучок света не позволяет явление *дифракции* (явления, наблюдаемого при прохождении волн мимо края препятствия, связанные с отклонением волн от прямолинейного распространения при взаимодействии с препятствием).

Мощность лазера. Лазеры являются самыми мощными источниками светового излучения. В узком интервале спектра кратковременно (в течение промежутка времени, продолжительностью порядка 10^{-13} с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения порядка 10^{17} Вт/см², в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см², причём суммарно по всему спектру. На узкий же интервал $\lambda=10^{-6}$ см (это ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего лишь 0,2 Вт/см². Если задача заключается в преодолении порога в 10^{17} Вт/см², то прибегают к различным методам повышения мощности.

Для повышения мощности излучения необходимо увеличить число атомов, участвующих в усилении светового потока за счет индуцированного излучения, и уменьшить длительность импульса.

Поскольку луч лазера не обладает ни идеальной когерентностью, ни идеальной монохроматичностью, диаметр пятна практически получается в 100–150 раз больше. Соответственно уменьшается и плотность мощности светового потока. Однако есть все основания считать, что с усовершенствованием способа выращивания кристаллов, улучшением качества их обработки и повышением качества зеркал и оптической системы плотность мощности светового потока будет значительно увеличена.

В настоящее время созданы лазеры с импульсами света длительностью 10^{-8} с и энергией в несколько десятков джоулей. Это значит, что мгновенная мощность в импульсе достигает миллиарда ватт. Будучи сфокусированным в небольшое пятно, такой луч создает плотность потока в пределах тех величин, которые были уже рассмотрены: 10^{12} Вт/см² и даже выше. О такой колоссальной концентрации мощности всего лишь несколько лет назад ученые могли только мечтать. Интересно рассмотреть характер процессов, которые происходят в точке фокусирования лазерного луча. Характер этих процессов зависит от мощности луча.

Если плотность потока порядка 10^6 – 10^8 Вт/см², то происходит интенсивное испарение с поверхности образца, на которую направлен луч. Температура на поверхности достигает нескольких тысяч градусов. Например, одним импульсом с энергией около 10 Дж и длительностью в одну миллисекунду может быть прожжена пластинка толщиной 3 мм. Образовавшееся отверстие имеет небольшой угол схождения, порядка 3–4°, при длине отверстия в 5–15 раз больше его диаметра. Пары вещества успевают рассеяться, не экранируя кратера.

Если увеличить плотность светового потока до 10^8 Вт/см² и уменьшить длительность импульса до 0,01 мкс, то отверстие не получается, а в точке, куда был сфокусирован луч, появляется оплавленное пятно. Плазма, образовавшаяся в этом месте, вероятно, не успевает рассеяться, поглощает всю энергию светового импульса, а затем, разлетаясь в стороны, передает механический импульс поверхности вещества. Опыты с тонкой фольгой подтверждают такое предположение. В этом случае в фольге образуется отверстие с краями, выдавленными как бы ударной волной. При больших мощностях наступает плазменный пробой, сопровождающийся треском. Если еще увеличить мощность, то пробой происходит уже в воздухе.

Такова в общих чертах картина явлений, происходящих в сфокусированном луче лазера.

Гигантский импульс. Применительно к лазерным технологиям используется термин гигантский импульс. Таковым называют импульс, обладающей очень большой энергией при сверхмалой длительности.

Сама по себе идея создания гигантского импульса проста при использовании оптического затвора – специального устройства, которое по сигналу может переходить из открытого состояния в закрытое и наоборот. В открытом состоянии затвор пропускает через себя лазерное излучение, в закрытом – поглощает или отклоняет его в другую сторону. При создании гигантского импульса затвор переводят в закрытое состояние еще до того, как начнется высвечивание энергии накачки. Затем, по мере поглощения энергии активные центры (атомы, участвующие в генерации) переходят в массовом порядке на долгоживущий верхний уровень. Генерация в лазере пока не осуществляется, ведь затвор закрыт. В результате на рассматриваемом уровне накапливается чрезвычайно большое число активных центров – создается очень сильная инверсная заселенность уровней. В определенный момент затвор переключают в открытое состояние. В некотором отношении это похоже на то, если бы высокая плотина,

создававшая огромный перепад уровней воды, вдруг неожиданно исчезла. Происходит быстрое и очень бурное высвечивание активных центров, в результате чего и рождается короткий и мощный лазерный импульс – гигантский импульс. Его длительность составляет 10^{-8} с, а максимальная мощность 10^8 Вт.

2.2. Принцип действия лазера

В основе работы лазеров лежат процессы, подчиняющиеся законам квантовой механики. Согласно квантово-механическим представлениям, атомы, как, впрочем, и другие частицы (молекулы, ионы и др.) поглощают и излучают энергию определёнными порциями - квантами.

Как известно, свет имеет двойственную природу: с одной стороны – это волна, характеризующаяся определённой частотой, амплитудой и фазой колебаний, с другой стороны – поток элементарных частиц, называемых фотонами. Каждый фотон представляет собой квант световой энергии. Энергия фотона прямо пропорциональна частоте световой волны, которая, в свою очередь, определяет цвет светового излучения.

Поглощая фотон, атом переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий. При самопроизвольном переходе на более низкий уровень атом испускает фотон. Для атомов конкретного химического элемента разрешены только совершенно определённые переходы между энергетическими уровнями. Вследствие этого, атомы поглощают только те фотоны, энергия которых в точности соответствует энергии перехода атома с одного энергетического уровня на другой. Визуально это проявляется в существовании для каждого химического элемента индивидуальных спектров поглощения, содержащих определённый набор цветных полос. Фотон, испускаемый атомом при переходе на более низкий энергетический уровень, так же обладает совершенно определённой энергией, соответствующей разности энергий между энергетическими уровнями. По этой причине атомы способны излучать световые волны только определённых частот. Этот эффект наглядно проявляется при работе люминесцентных ламп, часто используемых в уличной рекламе. Полость такой лампы заполнена каким-либо инертным газом, атомы которого возбуждаются ультрафиолетовым излучением, которое возникает при пропускании электрического тока через специальный слой, покрывающий внутреннюю поверхность оболочки лампы. Возвращаясь в основное состояние атомы газа дают свечение

определенного цвета. Так, например, неон дает красное свечение, а аргон – зеленое.

Самопроизвольные (спонтанные) переходы атомов с более высокого энергетического уровня на более низкий носят случайный характер. Генерируемое при этом излучение не обладает свойствами лазерного излучения: параллельностью световых пучков, когерентностью (согласованностью амплитуд и фаз колебаний во времени и пространстве), монохромностью (строгой одноцветностью). Однако, еще в 1917 году Альберт Эйнштейн предсказал существование наряду с процессами обычного излучения и резонансного поглощения существование третьего процесса – вынужденного (индуцированного) излучения. Свет резонансной частоты, то есть той частоты, которую атомы способны поглощать, переходя на так называемые высшие энергетические уровни, должен вызывать свечение атомов, уже находящихся на этих уровнях, если таковые имеются в среде.

Характерная особенность этого излучения заключается в том, что испускаемый свет неотличим от вынуждающего света, то есть совпадает с последним по частоте, по фазе, поляризации и направлению распространения. Это означает, что вынужденное излучение добавляет в световой пучок точно такие же кванты света, какие уводит из него резонансное поглощение.

Атомы среды могут поглощать свет, находясь на нижнем энергетическом уровне, излучают же они на верхних уровнях. Отсюда следует, что при большом количестве атомов на нижних уровнях (по крайней мере большем, чем количество атомов на верхних уровнях), свет, проходя через среду, будет ослабляться. Напротив, если число атомов на верхних уровнях больше числа невозбужденных, то свет, пройдя через данную среду, усилится. Это значит, что в данной среде преобладает индуцированное излучение.

Квантовые усилители и генераторы света, в основу которых положено описанное явление, работают по схеме, схематично изображенной на рис. 2.2.1. Пространство между зеркалами 1 и 2 заполнено активной средой, то есть средой, содержащей большее количество возбужденных атомов (атомов, находящихся на верхних энергетических уровнях), чем невозбужденных. Среда усиливает проходящий через неё свет за счет индуцированного излучения, начало которому даёт спонтанное излучение одного из атомов. Значительное усиление света достигается тогда, когда угол α очень мал. Тогда свет испытывает множество отражений, и все лучи накладываются, усиливая друг друга. На рис. 2.2.1 этому

соответствует постепенное утолщение стрелки.

Очевидно, что индуцированное излучение может возникать только в тех системах, где число возбужденных атомов достаточно велико. На практике число возбужденных атомов должно превышать 50 % от общего числа атомов в системе. В равновесных системах достижение этого условия невозможно, так как число переходов с ниже лежащего уровня на выше лежащий равно числу обратных переходов. Для получения эффекта индуцированного излучения систему необходимо перевести в неравновесное, а, следовательно, неустойчивое состояние. Кроме того интенсивность внешнего светового потока, предоставляющего исходные фотоны для начала процесса так же должна быть достаточной.

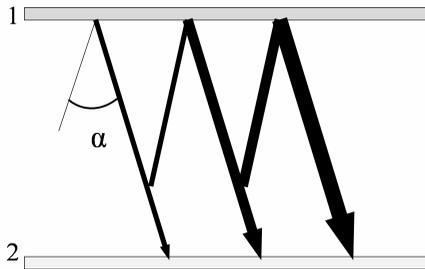


Рис. 2.2.1. Схема возникновения индуцированного излучения
(угол α сильно преувеличен)

Лазер состоит из трех основных блоков:

1. Активные вещества (активная среда);
2. Источники возбуждения;
3. Резонансные системы.

2.2.1. Активные вещества

В лазерах в качестве активной среды применяются твердые, жидкие и газообразные вещества. Чаще всего применяются твердые материалы, имеющие кристаллическую структуру, как наиболее изученные.

Не случайно, что первым активным веществом, которое использовалось в лазере, был синтетический рубин. С другой стороны, корунды (а рубин – это окрашенный благодаря наличию в нем атомов хрома корунд) нашли широкое применение в самых разнообразных областях техники, что, несомненно, стимулировало

совершенствование технологии их выращивания. Количество хрома определяет цвет рубина: чем больше хрома, тем интенсивнее окраска кристалла. Оптимальная величина примеси хрома 0,05 %. Однако используются и другие концентрации в пределах от 0,005 до 0,5 %. Окраска возникает потому, что атомы хрома в кристалле поглощают свет в широких зеленой и синей полосах видимого спектра и в ультрафиолетовой области, а пропускают его лишь в красной области. Из кристаллов изготавливаются стержни длиной от 2 до 30 см и диаметром от нескольких миллиметров до 1–2 см с круглым, шестиугольным или квадратным сечением (рис. 2.2.2). Однако стержни с круглым сечением из-за более простой технологии их изготовления практически используются чаще.

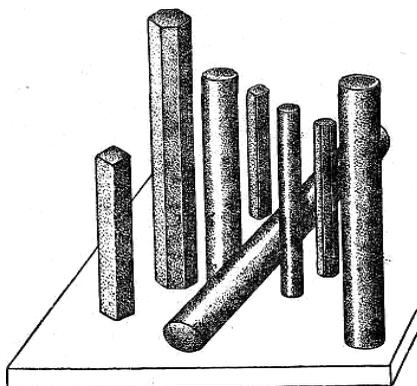


Рис. 2.2.2. Рубиновые стержни

Форма и размеры кристаллических стержней выбираются в зависимости от требуемой мощности излучения, а также определяются характеристикой источника и оптикой системы возбуждения, конструкцией держателя и способом охлаждения.

Кроме рубина, в качестве активной среды используются твердые материалы – стекло, активированное неодимом, алюминиевый гранат, пластмассы; жидкость с редкоземельными активаторами, органическими красителями; газ – He–Ne, Ar, Kr, Xe, Ne, He–Cd, CO₂ и др.

2.2.2. Способы и источники возбуждения

Возбуждение активного вещества часто называют накачкой – перевод английского слова *pumping*. Существует несколько способов накачки. Наиболее распространенный и простой – это оптическая накачка. Некоторые авторы предпочитают называть ее подсветкой.

В качестве генераторов оптической накачки чаще всего используются газоразрядные лампы-вспышки, преимущественно ксеноновые. Лампы могут быть различной конструкции. Система накачки обычно состоит из двух основных элементов: источника света и рефлектора, концентрирующего излучение на активном веществе.

Характер излучения тесно связан с мощностью накачки. В тех случаях, когда мощность накачки мала, импульсы содержат множество коротких пиков длительностью 1 мкс, разделенных интервалами в 5–10 мкс. С увеличением мощности накачки расстояние между пиками уменьшается. Амплитуда пиков растет.

В первых образцах рубиновых лазеров применялись спиральные газоразрядные лампы, охватывающие рубиновый стержень. Энергия такой системы накачки равнялась примерно 2000 Дж. Впоследствии были разработаны другие системы накачки, оказавшиеся более эффективными.

В одной из таких систем рубиновый стержень помещен между двумя лампами-вспышками, которые почти соприкасаются со стержнем. Рубин вместе с лампами обмотан слоем фольги, которая служит рефлектором (рис. 2.2.3). Пороговая накачка для этой конструкции составляет 120–200 Дж. Иногда для увеличения мощности накачки в такой системе берут четыре или шесть ламп-вспышек, расположенных аналогичным способом.

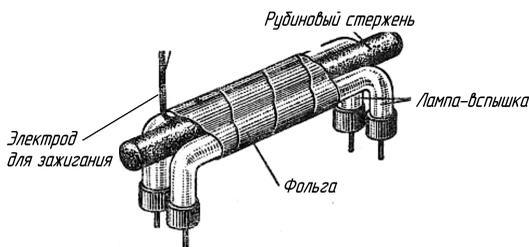


Рис. 2.2.3. Одна из схем возбуждения лазера

Рубин вместе с двумя U-образными лампами обматывается слоем фольги, которая выполняет роль рефлектора

Наряду с оптическими методами возбуждения существуют и другие, например метод солнечного возбуждения, возбуждение

энергией взрывающейся проволочки, катодно-люминесцентное возбуждение.

Сейчас разрабатываются опытные образцы систем солнечной накачки.

2.2.3. Резонансные системы

Наиболее эффективное взаимодействие электромагнитного излучения с активным веществом происходит тогда, когда это вещество помещено в резонатор. В качестве резонатора применяется обычно интерферометр Фабри-Перо, представляющий собой две пластинки, плоские поверхности которых тщательно отшлифованы, отполированы и установлены параллельно друг другу. Между ними находится слой воздуха. Внутренние поверхности этих пластинок серебрят или покрывают каким-либо другим металлом с целью обеспечения высокого коэффициента отражения лучей.

При помощи интерферометров Фабри-Перо изучаются тонкие структуры спектров. Идея такого интерферометра и используется в лазерах, с той лишь разницей, что здесь между отражающими пластинками находится не слой воздуха, а активное вещество.

В лазере с резонансной системой волна, идущая от одного зеркала к другому, усиливается, проходя через активную среду. Когда волна достигает второго зеркала, часть энергии теряется при отражении вследствие конечной проводимости зеркала, а часть – на краях зеркал. Для обеспечения генерации необходимо, чтобы общие потери энергии, обусловленные рассеянием внутри среды, дифракцией и потерями на отражение, были меньше, чем энергия, полученная при прохождении света через активную среду. Наряду с параллельными зеркалами могут применяться конфокальные сферические зеркала.

Системы резонаторов со сферическими или параболическими зеркалами имеют преимущество перед плоскопараллельным резонатором в том, что к ним предъявляются гораздо менее жесткие требования в отношении точности изготовления зеркал и их юстировки. Параметры резонатора мало меняются при небольших отклонениях радиуса кривизны зеркал и расстояния между ними.

Как было уже сказано, в качестве активного вещества в лазере используется кристаллическое вещество, то отражающими поверхностями служат обработанные поверхности торцов стержня. При этом на торцы наносится слой металла или несколько слоев диэлектрической пленки. Одно из зеркал делают слегка прозрачным. Иногда в покрытии зеркала оставляют небольшое отверстие.

По сравнению с диэлектрическим покрытием серебро имеет меньшую отражательную способность, и это приводит к большим

потерям, особенно в том случае, когда оно применяется для покрытия торцов кристалла рубина, работающего при высоких мощностях.

Кроме того, в процессе эксплуатации серебряные покрытия портятся, и их необходимо заменять, иначе выходная мощность генератора начинает падать, а энергию для генерации приходится увеличивать. Свойства же диэлектрических покрытий не ухудшаются при эксплуатации, и хотя нанесение их на поверхность кристалла более трудоемкий процесс, чем нанесение серебряного покрытия, им в настоящее время отдают предпочтение. Иногда одно из зеркал заменяют призмой, устанавливая ее так, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение.

В некоторых случаях применяют резонаторы, в которых зеркала хотя и примыкают к активному веществу, но выполняются отдельно. При этом торцы шлифуются, полируются, но не покрываются серебром и диэлектриком. Такая система позволяет быстро заменить зеркало в случае необходимости, без замены рабочего вещества. Кроме того, она обеспечивает возможность установки одного зеркала параллельно другому с помощью юстировочного приспособления с большой точностью.

2.3. Характеристики некоторых типов лазеров

В настоящее время имеется громадное разнообразие лазеров, отличающихся между собой активными средами, мощностями, режимами работы и другими характеристиками (рис. 2.3.1).

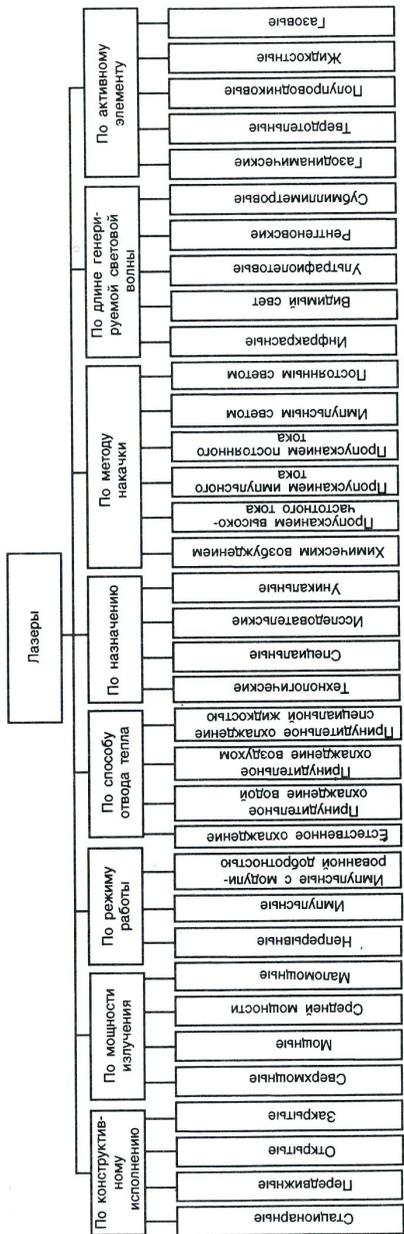
Нет необходимости все их описывать. Поэтому здесь дается краткое описание лазеров, которые достаточно полно представляют характеристики основных типов лазеров (режим работы, способы накачки и т.д.).

Рубиновый лазер. Первым квантовым генератором света был рубиновый лазер, созданный в 1960 году.

Лазер состоит из трех основных частей: активного (рабочего) вещества, резонансной системы, представляющей две параллельные пластины с нанесенными на них отражающими покрытиями, и системы возбуждения (накачки), в качестве которой обычно используется ксеноновая лампа-вспышка с источником питания (рис. 2.3.2).

Рабочим веществом является рубин, представляющий собой кристалл оксида алюминия Al_2O_3 (корунд), в который при выращивании введен в виде примеси оксид хрома Cr_2O_3 . Красный цвет рубина обусловлен положительным ионом Cr^{+3} . В решетке кристалла Al_2O_3 ион Cr^{+3} замещает ион Al^{+3} . Вследствие этого в кристалле

возникают две полосы поглощения: одна – в зеленой, другая – в голубой части спектра. Густота красного цвета рубина зависит от концентрации ионов Cr^{+3} : чем больше концентрация, тем гуще красный цвет. В темно-красном рубине концентрация ионов Cr^{+3} достигает 1 %.



2.3.1. Классификация лазеров по физико-техническим параметрам

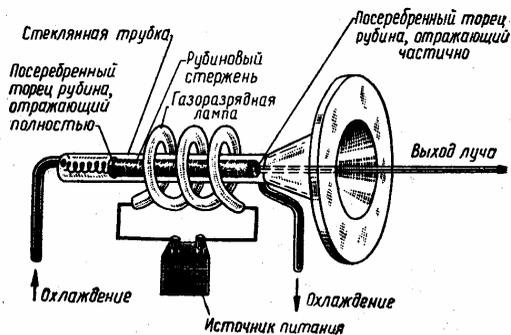


Рис 2.3.2. Схема рубинового лазера

Рубиновый кристалл выращивают в специальных печах, затем полученную заготовку отжигают и обрабатывают, придавая ей форму стержня. Длина стержня колеблется от 2 до 30 см, диаметр от 0,5 до 2 см.

Плоские торцовые концы делают строго параллельными, шлифуют и полируют с высокой точностью. Иногда отражающие поверхности наносят не на отдельные отражающие пластины, а непосредственно на торцы рубинового стержня. Поверхности торцов серебруют, причем поверхность одного торца делают полностью отражающей, другого – отражающей частично. Обычно коэффициент пропускания света второго торца составляет около 10–25 %, но может быть и другим.

Рубиновый стержень помещают в спиральную импульсную ксеноновую лампу, витки которой охватывают его со всех сторон. Вспышка лампы длится миллисекунды. За это время лампа потребляет энергию в несколько тысяч джоулей, большая часть которой уходит на нагревание прибора. Другая, меньшая часть, в виде голубого и зеленого излучения поглощается рубином. Эта энергия и обеспечивает возбуждение ионов хрома.

На рис. 2.3.3 представлена энергетическая диаграмма, поясняющая принцип работы рубинового лазера. Линии 1, 2, 3 соответствуют энергетическим уровням ионов хрома.

В нормальном, невозбужденном состоянии ионы хрома находятся на нижнем уровне 1. При облучении рубина светом ксеноновой лампы, содержащим зеленую часть спектра, атомы хрома возбуждаются и переходят на верхний уровень 3, соответствующий поглощению света длиной волны 5600 А (А – ангстрем, внесистемная единица длины 1 А = 10^{-10} м введена А.И. Ангстремом (1868 г.) применяется в оптике, атомной физике, физике твердого тела и др.). Ширина полосы поглощения этого уровня составляет около 800 А.

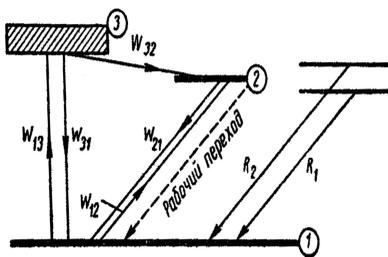


Рис. 2.3.3. Схема энергетических уровней рубинового лазера

С уровня 3 часть возбужденных атомов хрома снова возвращается на основной уровень 1, а часть переходит на уровень 2. Это так называемый безызлучательный переход, при котором ионы хрома отдадут часть своей энергии кристаллической решетке в виде тепла. Вероятность перехода с уровня 3 на уровень 2 в 200 раз больше, а с уровня 2 на уровень 1 в 300 раз меньше, чем с уровня 3 на уровень 1. Это приводит к тому, что уровень 2 оказывается более заселенным, чем уровень 1. Иными словами, заселенность получается инверсной и создаются необходимые условия для интенсивных индуцированных переходов.

Такая система крайне неустойчива. Вероятность спонтанных переходов в любой момент времени очень велика. Первый же фотон, появившийся при спонтанном переходе, по закону индуцированного излучения выбьет из соседнего атома второй фотон, переведя излучивший атом в основное состояние. Далее эти два фотона выбьют еще два, после чего их будет четыре, и т.д. Процесс нарастает практически мгновенно. Первая волна излучения, дойдя до отражающей поверхности, повернет обратно и вызовет дальнейшее увеличение числа индуцированных переходов и интенсивности излучения. Отражение от отражающих поверхностей резонатора повторится многократно, и если потери мощности при отражении, вызываемые несовершенством отражающих покрытий, а также полупрозрачностью одного из торцов стержня, через который уже в начале генерации будет вырываться поток излучения, не будут превосходить той мощности, которую приобретает в результате начавшейся генерации формирующийся в стержне лазера луч, то генерация будет нарастать, а мощность увеличиваться до тех пор, пока большинство возбужденных частиц активного вещества (ионов хрома) не отдадут свою энергию, приобретенную в момент возбуждения. Через частично посеребренный торец стержня вырвется луч очень

высокой интенсивности. Направление луча будет строго параллельно оси рубина.

Те фотоны, направление распространения которых в начале их возникновения не совпало с осью стержня, уйдут через боковые стенки стержня, не вызвав сколько-нибудь заметной генерации.

Именно многократное прохождение образованной световой волны между торцовыми стенками резонатора без какого-либо существенного отклонения от оси стержня обеспечивает лучу строгую направленность и огромную выходную мощность.

Газовые лазеры. Газовые лазеры представляют собой, пожалуй, наиболее широко используемый в настоящее время тип лазеров и, возможно, в этом отношении они превосходят даже рубиновые лазеры. Газовым лазерам также посвящена большая часть выполненных исследований. Среди различных типов газовых лазеров всегда можно найти такой, который будет удовлетворять почти любому требованию, предъявляемому к лазеру, за исключением очень большой мощности в видимой области спектра в импульсном режиме. Большие мощности необходимы для многих экспериментов при изучении нелинейных оптических свойств материалов. В настоящее время большие мощности в газовых лазерах не получены по той простой причине, что плотность атомов в них недостаточно велика. Однако почти для всех других целей можно найти конкретный тип газового лазера, который будет превосходить как твердотельные лазеры с оптической накачкой, так и полупроводниковые лазеры. Много усилий было направлено на то, чтобы эти лазеры могли конкурировать с газовыми лазерами, и в ряде случаев был достигнут определенный успех, однако он всегда оказывался на грани возможностей, в то время как газовые лазеры не обнаруживают никаких признаков уменьшения популярности.

Особенности газовых лазеров большей частью обусловлены тем, что они, как правило, являются источниками атомных или молекулярных спектров. Поэтому длины волн переходов точно известны, они определяются атомной структурой и обычно не зависят от условий окружающей среды. Стабильность длины волны генерации при определенных усилиях может быть значительно улучшена по сравнению со стабильностью спонтанного излучения. В настоящее время имеются лазеры с монохроматичностью, лучшей, чем в любом другом приборе. При соответствующем выборе активной среды может быть осуществлена генерация в любой части спектра, от ультрафиолетовой ($\sim 2000 \text{ \AA}$) до далекой инфракрасной области ($\sim 0,4 \text{ мм}$), частично захватывая микроволновую область. Нет также оснований сомневаться, что в будущем удастся создать лазеры для

вакуумной ультрафиолетовой области спектра. Разреженность рабочего газа обеспечивает оптическую однородность среды с низким коэффициентом преломления, что позволяет применять простую математическую теорию для описания структуры мод резонатора и дает уверенность в том, что свойства выходного сигнала близки к теоретическим. Хотя к.п.д. превращения электрической энергии в энергию вынужденного излучения в газовом лазере не может быть таким большим, как в полупроводниковом лазере, однако благодаря простоте управления разрядом газовый лазер оказывается для большинства целей наиболее удобным в работе как один из лабораторных приборов. Что касается большой мощности в непрерывном режиме (в противоположность импульсной мощности), то природа газовых лазеров позволяет им в этом отношении превзойти все другие типы лазеров.

В первом газовом лазере, разработанном Джаваном, Беннетом и Гарриотом, был использован принцип резонансной передачи энергии возбуждения в газовом разряде. Газовый лазер представляет собою кварцевую трубку диаметром около 1,5 см и длиной 80 см. Эта трубка заполняется смесью неона (Ne) при давлении 0,1 мм рт. ст. и гелия (He) при давлении 1 мм рт. ст. Трубка заканчивается металлическими камерами, в которых размещаются плоские отражательные пластины.

Вследствие того, что при однократном прохождении луч в активной смеси He–Ne усиливается немного (порядка 2 % на метр длины), уделяется большое внимание качеству отражательных пластин. Поверхности пластин обрабатываются с точностью 0,01 длины волны, на которой работает лазер. Для получения лучших условий отражения используются также многослойные диэлектрические пленки. Пленка, состоящая из 13 чередующихся слоев сульфида цинка и фтористого магния, позволяет получить для волн в области 11 000–12 000 Å коэффициент отражения 98,9 %, коэффициент пропускания 0,3 %, потери на поглощение и рассеяние 0,8 %.

Все детали активной части лазера отжигаются и обезгаживаются в условиях ультравысокого вакуума. Конденсация хотя бы одной капли воды на диэлектрических отражающих слоях в начале откачки или наличие атмосферного воздуха в системе после отжига приводит к порче слоев. Положение отражательных пластин регулируется микрометрическим устройством с использованием гибких сильфонов. Начальная юстировка пластин производится до включения генератора.

Система зеркал образует объемный резонатор типа Фабри-Перо. С его помощью обеспечивается обратная оптическая связь, наличие

которой создает условия для самовозбуждения и обеспечивает генерацию.

Для возбуждения активной смеси используется высокочастотный генератор с частотой несколько десятков мегагерц и потребляемой мощностью около 50 Вт. Электромагнитное поле в газовой смеси создается с помощью внешних электродов, охватывающих стеклянную трубку лазера.

В гелий-неоновом лазере активной средой является газообразная смесь гелия и неона. Генерация осуществляется за счет переходов между энергетическими уровнями неона, а гелий играет роль посредника, через который энергия передается атомам неона для создания инверсной заселенности.

Неон, в принципе, может генерировать лазерное излучение в результате более 130 различных переходов. Однако наиболее интенсивными являются линии с длиной волны 632,8 нм, 1,15 и 3,39 мкм. Волна 632,8 нм находится в видимой части спектра, а волны 1,15 и 3,39 мкм - в инфракрасной.

Лазер может оперировать в непрерывном режиме. Излучение гелий-неонового лазера линейно поляризовано. Обычно давление гелия в камере составляет 332 Па, а неона – 66 Па. Постоянное напряжение на трубке около 4 кВ. Одно из зеркал имеет коэффициент отражения порядка 0,999, а второе, через которое выходит лазерное излучение, – около 0,990. В качестве зеркал используют многослойные диэлектрики, поскольку более низкие коэффициенты отражения не обеспечивают достижения порога генерации.

Лазеры непрерывного излучения. Мы рассмотрели кристаллические лазеры, работающие в импульсном режиме. В некоторых случаях желательно, чтобы режим работы лазера был непрерывным. Газовые лазеры, которые дают непрерывное излучение, имеют небольшую выходную мощность. Полупроводниковые лазеры, способные работать в непрерывном режиме, дают недостаточно монохроматичное излучение.

Одной из причин, затрудняющих работу лазеров в непрерывном режиме излучения, является необходимость постоянного отвода тепла из-за возможного перегрева кристалла и источника возбуждения. Известно, что только небольшая часть излучения источника накачки используется непосредственно для возбуждения активного вещества – значительная часть энергии тратится на бесполезное нагревание прибора.

Для того чтобы лазер работал в заданном режиме, необходимо принимать специальные меры по постоянному отводу тепла. Отвод

тепла осуществляется предусмотренной для этого системой охлаждения. Однако при больших мощностях накачки все же требуется некоторое время после каждого акта возбуждения, чтобы система возвратилась к начальным температурным условиям. Так обеспечивается равновесие между количеством получаемого системой и отводимого от нее тепла. В настоящее время имеется несколько вариантов лазеров, работающих в непрерывном режиме на кристаллических веществах. В одном из них используется рубиновый стержень, к торцу которого примыкает конус из бесцветного сапфира. В качестве источника накачки используется ртутно-дуговая лампа, спектр излучения которой богат зеленым и фиолетовым лучами, необходимыми для возбуждения. Излучение ртутной лампы фокусируется на поверхность уширенной части конуса из сапфира сферическим зеркалом. Конус служит для конденсации излучения накачки. Рубиновый кристалл охлаждается жидким азотом. Кристалл имеет очень небольшие размеры: диаметр 0,061 см и длину 1,15 см. Сапфировый конус имеет длину 1,05 см, диаметр широкой части 0,15 см. Поверхность стержня оптически полирована. Параллельность плоскостей торцов обеспечивается с точностью до 0,1 длины волны, на которой работает лазер. При мощности накачки 930 Вт мощность непрерывного лазерного излучения составляет 4 Вт. В другом варианте лазера непрерывного действия (рис. 2.3.4) в качестве активного вещества используется вольфрамат кальция с примесью трехвалентных ионов неодима ($\text{CaWO}_4; \text{Nd}^{3+}$). Этот материал имеет относительно низкую величину пороговой мощности накачки.

Кристалл, вырезанный в форме стержня с конфокальными сферическими концами, помещен в одной из фокусных осей эллиптического цилиндра и окружен фильтром из жидкости, не пропускающим ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, испускаемые ртутной лампой накачки, которая помещена в другой фокусной оси.

В конструкции предусмотрено охлаждение кристалла жидким кислородом. Кроме того, источник возбуждения и рефлектор имеют систему водяного охлаждения. Все это предохраняет прибор от перегрева. Мощность, потребляемая лампой, составляет около 900 Вт, мощность излучения лазера 3–5 Вт. Излучение происходит на волне 1,065 мкм. Для обеспечения работы лазера в импульсном режиме внутри отражателя имеется кроме ртутной лампы ксеноновая лампа-вспышка.

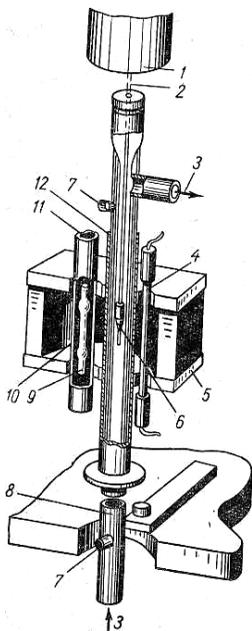


Рис. 2.3.4. Конструкция лазера, работающего в непрерывном режиме:

1 – индикатор излучения; 2 – луч лазера; 3 – жидкий кислород; 4 – ксеноновая лампа-вспышка; 5 – водяное охлаждение эллиптического отражателя; 6 – кристалл активного вещества; 7 – жидкостный фильтр; 8 – сосуд Дьюара; 9 – ртутная лампа; 10 – эллиптический отражатель; 11 – водяная рубашка; 12 – теплоэкранирующая заслонка

Существуют лазеры подобной конструкции, в которых при мощности накачки порядка 600 Вт может быть получена выходная мощность от 0,5 до 1 Вт. В таких лазерах применяют кристаллы длиной 38 и диаметром 3 мм.

Для увеличения выходной мощности предпринимаются попытки разработать конструкции с более мощными источниками возбуждения. В одной из таких конструкций использована дуговая печь мощностью 500 кВт, наполненная газом под давлением. Излучение электрической печи фокусируется на поверхности кристалла с помощью двух сферических зеркал. Кристалл рубина помещен в сферической полости из пирекса, наполненной раствором металлической меди, который поглощает инфракрасный, красный и ультрафиолетовый свет и пропускает свет в интервале 4500–6000 А. Кроме того, раствор способствует охлаждению рубина. Непрерывное излучение происходило в течение 0,2–1,2 с. При более длительном возбуждении кристалл от перегрева разрушается.

Кроме рассмотренных для создания непрерывного излучения используются и другие кристаллы. В настоящее время известно около десяти кристаллов, наиболее подходящих для этой цели.

Стекланные лазеры. Большой интерес представляет создание лазеров, в которых в качестве активного вещества используется стекло с примесью трехвалентных редкоземельных элементов неодима, иттербия, гадолиния, гольмия, тербия. По конструкции стекланные лазеры ничем не отличаются от кристаллических. Достоинством стекланных лазеров является то, что стекланные стержни сравнительно легко изготовить любых требуемых размеров и формы. Это позволяет создать лазеры с большой выходной мощностью. Стекланные образцы можно изготовить в виде волокон и использовать их в качестве оптических волноводов.

Одним из первых стекланных лазеров, получивших в настоящее время широкое распространение, был лазер, в котором в качестве активной среды использовалось бариевое стекло с примесью ионов неодима. Концентрация неодима в стекле может быть различной – от 0,13 до 10 %. Индуцированное излучение происходит на волне 1,06 мкм. В данной системе используется четырехуровневая схема.

В первых стекланных лазерах использовались образцы бариевого стекла в виде тонких стержней длиной 76 мм, покрытых слоем стекла с близким, но несколько меньшим коэффициентом преломления, чем у материала стержня. Это улучшало просвечивание образца и обеспечивало более эффективное возбуждение. Однако вследствие сильного поглощения ионами неодима энергия накачки все же плохо проникала в глубь стекла и ее оказывалось недостаточно для возбуждения внутренних слоев, поэтому стержни изготовляли небольшого диаметра. Первые образцы стержней были диаметром 0,3 и 0,032 мм. Параллельные торцы стержней полировали и покрывали серебряным слоем с коэффициентом пропускания 2 %. Лазер работал в импульсном режиме при комнатной температуре. Накачка осуществлялась ксеноновой лампой-вспышкой. Однако существенным недостатком первых лазеров, в которых в качестве активного вещества использовались тонкие стекланные стержни, была их низкая выходная мощность.

В настоящее время разработано несколько видов стекланных лазеров, которые имеют большую энергию излучения. Так, созданы стекланные лазеры со стержнем, имеющим длину около полуметра и диаметр несколько сантиметров. Выходная энергия таких лазеров превышает 100 Дж.

Если пропустить луч стеклнного лазера через кристалл с определенными нелинейными оптическими характеристиками, то в результате возникновения гармоник излучения получают на выходе кристалла зеленый луч.

Стекланные лазеры с использованием других ионов редкоземельных элементов отличаются от рассмотренного длиной волны индуцированного излучения. Так, лазеры с ионами иттербия дают излучение на волне 1,015 мкм, с ионами гольмия – порядка 1,95 мкм, гадолиния – 0,3125 мкм, тербия – в интервале 0,535–0,55 мкм.

В табл. 2.3.1 приведены некоторые типы и характеристики лазеров.

Таблица 2.3.1

Типы и характеристики лазеров

Рабочее вещество (активная среда, тип лазера)	Длина волны, мм	Режим работы	Мощность, Вт	Частота следования импульсов, Гц	Длительность импульсов	Область применения
Эксимерные лазеры	< 0,4	Импульсный	10	$1-10^4$	10 нс	Фотофизика, фотохимия, спектроскопия
Аргон	0,48	Непрерывный	1–30	–	–	Испарение
	0,51	Импульсный	1–25	$1-10^3$	5–100 мкс	
Гелий-неон	0,63	Непрерывный	0,0001–0,03	–	–	Юстировка, нивелирование
Рубин	0,69	Импульсный	1–20	1	0,3–6 мс	Сварка, сверление
Углекислый газ	10,6	Непрерывный	$10-10^4$	–	–	Резание, сварка, термообработка
		Импульсный	1–250	$1-10^3$	50–150 мс	Легирование, сверление, сварка
		С модуляцией добротности	$10-10^4$	200–500	30–300 мкс	Испарение, сварка

Примечание. Непрерывное лазерное излучение – излучение, существующее в любой момент времени наблюдения. Импульсное излучение – излучение, существующее в ограниченном интервале времени, меньшем времени наблюдения.

2.4. Применение лазерного луча в промышленности и технике

Оптические квантовые генераторы и их излучение нашли применение во многих отраслях промышленности.

Начиная с 1964 года, малопроизводительное механическое сверление отверстий стало заменяться лазерным сверлением. Термин лазерное сверление не следует понимать буквально. Лазерный луч не сверлит отверстие: он его пробивает за счет интенсивного испарения материала в точке воздействия. Пример такого способа сверления - пробивка отверстий в часовых камнях, которая сейчас уже является обычным делом. Для этой цели применяются твердотельные импульсные лазеры, например, лазер на стекле с неодимом. Отверстие в камне (при толщине заготовки около 0,1–0,5 мм) пробивается серией из нескольких лазерных импульсов, имеющих энергию около 0,1–0,5 Дж и длительностью около 10^{-4} с. Производительность установки в автоматическом режиме составляет 1 камень в секунду, что в 1000 раз выше производительности механического сверления.

Вскоре после своего появления лазер нашел следующее применение – сверление (пробивание) отверстий в алмазных фильерах. Для получения очень тонкой проволоки из меди, бронзы, вольфрама используется технология протягивания металла сквозь отверстие соответствующего диаметра. Такие отверстия высверливают в материалах, обладающих особо высокой твердостью, – ведь в процессе протягивания проволоки диаметр отверстия должен сохраняться неизменным. Наиболее тверд, как известно, алмаз. Поэтому лучше всего протягивать тонкую проволоку сквозь отверстие в алмазе – сквозь так называемые алмазные фильеры. Лишь с помощью алмазных фильер удастся получать сверхтонкую проволоку, имеющую диаметр всего 10 мкм (рис. 2.4.1). Как же просверливается тонкое отверстие в таком сверхтвердом материале, как алмаз?

Так, сверление отверстия в алмазной фильере обычным способом длится более двух часов. Лазерный станок, созданный Московским экспериментальным научно-исследовательским институтом при участии физического института Академии наук СССР им. П.Н. Лебедева, выполняет эту работу менее чем за 0,1 с. Такие станки для обработки сверхтвердых материалов начал изготавливать завод «Станкоконструкция». Создана установка типа К-3, представляющая собой лазер на рубине, излучение которого фокусируется с помощью совершенной оптической системы. Установка позволяет получать через каждые двадцать секунд импульсы света длительностью 0,5 или 5 мс. Мощность импульса достигает двух киловатт и контролируется специальным измерительным устройством. Наводка луча на обрабатываемую деталь обеспечивается с точностью до нескольких

микрон. Луч можно сфокусировать в пятно диаметром от десятых долей миллиметра до 2–3 мкм. Установка К-3 (рис. 2.4.2) имеет небольшие размеры и может быть незаменимой в лабораторных исследованиях там, где не требуется высокой производительности.

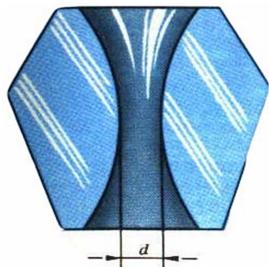


Рис. 2.4.1. Разрез отверстия в алмазной фильере. Лазерными импульсами пробивают черновой канал в алмазной заготовке. Затем, обрабатывая канал ультразвуком, шлифуя и полируя, придают ему необходимый профиль. Проволока, получаемая при протягивании через фильеру, имеет диаметр d

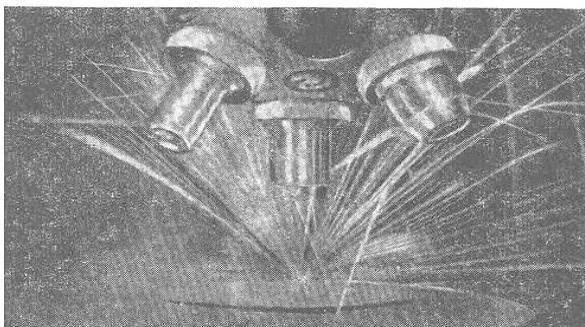


Рис. 2.4.2. Лазер К-3 в действии:
луч света пробивает металл

Другая установка, К-4, более совершенна и более производительна. В ней применяется водяное охлаждение, и поэтому частота импульсов может быть увеличен на до одного импульса в секунду с длительностью 0,5 мс. Установка имеет такую же оптическую систему, что и описанная выше.

Установки К-3 и К-4 уже выпускаются промышленностью. Было высказано предложение, использовать лазер в операции балансировки деталей точных механизмов, быстро вращающихся магнитных дисков памяти для вычислительных машин и т.п.

С помощью лазера можно убирать лишний металл непосредственно с вращающихся деталей, в результате чего сокращается время балансировки. К тому же деталь не подвергается действию больших

механических усилий, как это бывает при высверливании лишнего металла.

Сегодня лазерное сверление широко применяется не только для особо твердых материалов, но и для материалов, отличающихся повышенной хрупкостью. Лазерное сверло оказалось не только мощным, но и весьма деликатным «инструментом». Пример: применение лазера при сверлении отверстий в подложках микросхем, изготавливаемых из глиноземной керамики (рис. 2.4.3). Керамика необычайно хрупка. По этой причине механическое сверление отверстий в подложке микросхемы производили, как правило, на «сыром» материале. Обжигали керамику уже после сверления. При этом происходила некоторая деформация изделия, искажалось взаимное расположение высверленных отверстий. Проблема была решена с появлением лазерных сверл. Используя их, можно работать с керамическими подложками, которые уже прошли обжиг. С помощью лазеров пробивают в керамике очень тонкие отверстия – диаметром всего 10 мкм. Механическим сверлением такие отверстия получить нельзя.

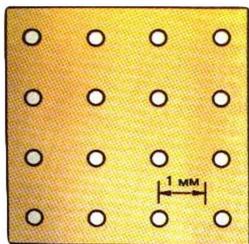


Рис. 2.4.3. Пластика из глиноземной керамики толщиной 0,7 мм
Эти аккуратные отверстия диаметром 0,3 мм пробиты с помощью CO_2 -лазера

Лазерным лучом можно резать решительно все: ткань, бумагу, дерево, фанеру, резину; пластмассу, керамику, листовой асбест, стекло, листы металла (рис. 2.4.4). При этом можно получать аккуратные разрезы по сложным профилям.

При резке возгорающихся материалов место разреза обдувают струей инертного газа; в результате получается гладкий, необожженный край среза. Для резки обычно используют непрерывно генерирующие лазеры. Нужная мощность излучения зависит от материала и толщины заготовки. Например, для резки досок толщиной 5 см применялся CO_2 -лазер мощностью 200 Вт. Ширина разреза составляла всего 0,7 мм; опилок, естественно, не было.

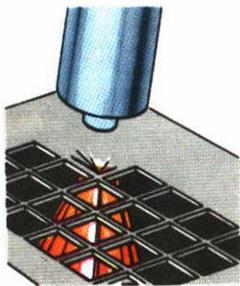


Рис. 2.4.4. Процесс вырезания квадратных отверстий в листе нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с помощью CO_2 -лазера. Скорость резания примерно 2 м/мин. Если длина стороны одного отверстия равна 10 мм, то за 1 мин лазерный луч может вырезать до 5–10 отверстий

Для резки металлов нужны лазеры мощностью в несколько киловатт. Требуемую мощность можно снизить, применяя метод *газолазерной резки* – когда одновременно с лазерным лучом на разрезаемую поверхность направляется сильная струя кислорода (рис. 2.4.5). При горении металла в кислородной струе (за счет происходящих в этой струе реакций окисления металла) выделяется значительная энергия; в результате может использоваться лазерное излучение мощностью всего 100–500 Вт. Кроме того, струя кислорода сдувает и уносит из зоны разрезания расплав и продукты сгорания металла.

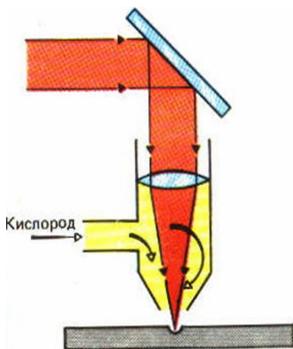


Рис. 2.4.5. Газолазерная резка. При газолазерной резке луч работает совместно с сильной струей кислорода. Место разреза подвергается одновременно воздействию сфокусированного лазерного луча и кислородной струи

Первый пример такого рода резки – лазерный раскрой тканей на ткацкой фабрике. Установка включает CO_2 -лазер мощностью 100 Вт, систему фокусировки и перемещения лазерного луча, ЭВМ, устройство для натяжения и перемещения ткани. В процессе раскроя луч перемещается по поверхности ткани со скоростью 1 м/с. Диаметр сфокусированного светового пятна равен 0,2 мм. Перемещениями луча и самой ткани управляет ЭВМ. Установка позволяет, например, в течение часа раскроить материал для 50 костюмов. Раскрой

выполняется не только быстро, но и весьма точно; при этом края разреза оказываются гладкими и упрочненными. Вторым примером – автоматизированное разрезание листов алюминия, стали, титана в авиационной промышленности. Так, CO₂-лазер мощностью 3 кВт разрезает лист титана толщиной 5 мм со скоростью 5 см/с. Применяя кислородную струю, получают примерно тот же результат при мощности излучения 100–300 Вт.

В развитии лазерной сварки выделяют два этапа. Вначале развивалась *точечная* сварка – на основе импульсных лазеров на рубине и на стекле с неодимом. С появлением мощных CO₂-лазеров и лазеров на гранате с неодимом, дающих непрерывное излучение или последовательность часто повторяющихся импульсов, стала развиваться *шовная* сварка.

Примеры точечной лазерной сварки: соединение никелевого контакта с зажимом из никелевого сплава на основании транзистора, приваривание тонких медных проводов друг к другу или к зажимам, взаимное соединение микроселектронных компонентов. Шовная лазерная сварка непрерывным излучением мощностью около 100 Вт применяется для герметизации корпусов приборов, приваривания наконечников к лопастям газовых турбин и кромок из закаленной стали к полотнам металлорежущих пил и т.д. С помощью киловаттных лазеров производят автоматизированную шовную сварку кузовов автомобилей, корпусов судов, труб газопроводов и т.д. Для сварки деталей из стекла используются лазеры мощностью 100 Вт, для сварки кварца – мощностью до 300 Вт.

Лазерная сварка успешно конкурирует с известными способами сварки, например с электродуговой и сваркой электронным лучом. Она обладает весомыми преимуществами. При лазерной сварке нет контакта со свариваемым образцом, а значит, нет опасности загрязнения его какими-либо примесями. В отличие от электронно-лучевой сварки, для которой нужен вакуум, лазерная сварка производится в обычных условиях. Она позволяет производить быстро и с высокой точностью проплавление локально: в данной точке или вдоль данной линии. Зона, подвергающаяся тепловому воздействию, имеет очень малые размеры. Это важно, в частности, в тех случаях, когда сварка выполняется в непосредственной близости от элементов, чувствительных к нагреву.

Лазеры с плавной перестройкой частоты служат основой для спектральных приборов с исключительно высокой разрешающей силой. Например, пусть требуется исследовать спектр поглощения какого-либо вещества. Измерив величину лазерного потока,

падающего на изучаемый объект, и прошедшего через него, можно вычислить значение коэффициента поглощения. Перестраивая частоту лазерного излучения, можно, следовательно, определить коэффициент поглощения как функцию от длины волны. Разрешающая способность этого метода совпадает, очевидно, с шириной линии лазерного излучения, которую можно сделать очень малой

Лазеры позволили осуществить светолокатор, с помощью которого расстояние до предметов измеряется с точностью до нескольких миллиметров. Такая точность недоступна для радиолокаторов.

В настоящее время в мире существует несколько десятков лазерных локационных систем. Многие из них уже имеют космическое значение. Они осуществляют локацию Луны и геодезических искусственных спутников Земли. В качестве примера можно назвать лазеро-локационную систему Физического института имени П.Н. Лебедева. Погрешность измерения при использовании данной системы составляет 40 см.

Проведение таких исследований организуется для того, чтобы точнее узнать расстояние до Луны в течение некоторого периода времени, например, в течение года. Исследуя графики, описывающие изменение этого расстояния со временем, ученые получают ответы на ряд вопросов, имеющих научную важность.

Импульсные лазерные локаторы сегодня применяются не только в космонавтике, но и в авиации. В частности, они могут играть роль научных измерителей высоты. Лазерный высотомер применялся также в космическом корабле «Аполлон» для фотографирования поверхности Луны.

Современная радиоэлектронная промышленность выпускает большое число разнообразных приборов и устройств от простого радиоприёмника до сверхсовременных компьютеров. Основу этих устройств составляют полупроводниковые блоки и интегральные схемы, имеющие очень небольшие размеры и тонкую структуру. Соединение отдельных блоков в единое целое часто сопряжено с определенными трудностями. И здесь на выручку приходят лазерные технологии, позволяющие соединить между собой и с изолирующей подложкой эти тонкие узлы. Лазерный луч можно сконцентрировать в очень тонкий пучок, имеющий на малых расстояниях практически нулевую расходимость. Это позволяет сконцентрировать излучаемую энергию на очень малой площади, например, соответствующей площади контакта между блоками электронной схемы.

Другой важной областью применения лазеров в промышленности можно считать использование их в различных контрольно-

измерительных приборах. Луч лазера представляет собой электромагнитную волну со строго определенной длиной. Зная, какое количество длин волн данного лазера укладывается в определенном отрезке, например, в одном метре, всегда можно вычислить расстояние от источника лазерного излучения до того или иного объекта. На практике это определяется по потере мощности лазерного излучения при отражении его от объекта. Отраженный луч лазера воспринимается фотоэлементом, в результате чего в анализирующей электрической цепи возникает ток, пропорциональный интенсивности отраженного луча. Лазерные установки могут быть так же использованы для контроля степени чистоты обработки поверхности материала и даже внутренней структуры этих материалов.

Известно, что в радиоэлектронике сейчас наметилась тенденция к миниатюризации и микроминиатюризации аппаратуры. Многие радиотехнические устройства совмещают в себе столько различных функций, что если строить по старому способу, то они будут и громоздки, и иметь значительный вес. Миниатюризация и микроминиатюризация позволяет создать компактные блоки в сотни, тысячи раз меньше ныне существующих, но выполняющих те же функции.

Трудность при сборке таких блоков заключается в соединении отдельных его элементов. С обычным электрическим паяльником в этом случае нечего делать. Выручает и на этот раз всемогущий луч лазера. С его помощью можно собирать и соединять самые тонкие узлы. Применение лазеров улучшит технологию производства и повысит надежность работы радиоэлектронных схем.

Принцип сборки и соединения блоков полупроводниковых схем на изоляционной подложке с помощью лазера показан на рис. 2.4.6.

Соединительные провода осаждаются напылением металла на соответствующие блоки схемы. На стеклянную подложку таким же образом наносится схема межблочных соединений.

Подложку помещают в шаблон напыленной схемой вниз. Блоки полупроводниковой схемы, у которых контакты разводки расположены сверху, располагают ниже подложки. С помощью микроманипулятора и микроскопа их соединяют с соответствующей частью схемы, нанесенной на подложку. Контакт между блоком полупроводниковой схемы и схемой разводки обеспечивается давлением. Затем с помощью микроскопа луч лазера фокусируют через стекло на площадь контакта. Выходную мощность луча выбирают такой, чтобы сплавить металл подложки с металлом блока схемы. После полной сборки систему помещают в металлический

кожух. Достоинством этого метода является надежность соединений. Он позволяет обеспечить высокую плотность монтажа элементов схемы.

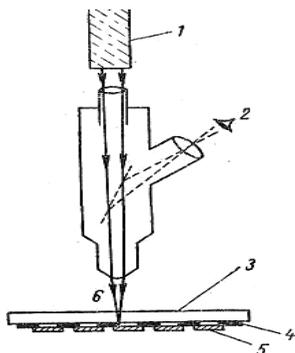


Рис. 2.4.6. Схема, использующая лазер для соединения полупроводниковых интегральных схем:
1 – лазер; 2 – визуальная настройка;
3 – стеклянная подложка; 4 – осажденная металлическая пленка; 5 – блоки полупроводниковой интегральной схемы;
6 – лазерный луч

2.5. Использование лазеров в информационных технологиях

Поскольку лазерное излучение является электромагнитной волной, логично было бы предположить, что лазерный луч можно использовать для передачи информации примерно так же как мы передаем информацию с помощью радиоволн. С теоретической точки зрения никаких препятствий этому нет. Но на практике такая передача информации сталкивается с существенными трудностями. Эти трудности связаны с особенностями распространения света в атмосфере. Такое распространение, как известно, в значительной степени зависит от атмосферных помех: тумана, наличия пыли, атмосферных осадков и т.п. Не смотря на то, что лазерное излучение обладает совершенно уникальными свойствами, оно так же не лишено этих недостатков.

Одним из решений проблемы нейтрализации влияния атмосферных помех на распространение лазерного луча стало использование волоконно-оптических линий. Основу таких линий составляют тончайшие стеклянные трубочки (оптические волокна), уложенные в специальную непрозрачную оболочку. Конфигурация оптических волокон рассчитывается таким образом, чтобы при прохождении по ним лазерного луча возникал эффект полного отражения, что практически полностью исключает потери информации при ее передаче. Волоконно-оптические линии обладают огромной пропускной способностью. По одной нитке такой линии можно

одновременно передавать в несколько раз больше телефонных разговоров, чем по целому многожильному кабелю, составленному из традиционных медных проводов. Кроме того на распространение лазерного луча по волоконно-оптическим линиям не оказывают влияние практически никакие помехи. В настоящее время волоконно-оптические линии используются при передаче сигналов кабельного телевидения высокого качества, а так же для обмена информацией между компьютерами через интернет по выделенным линиям. Существуют уже и телефонные линии, построенные с использованием оптических волокон.

С появлением полупроводниковых лазеров появилась возможность использования их для записи и чтения информации на информационных носителях – лазерных компакт-дисках. Как мы знаем, в аудио- и видеокассетах, которые до недавнего времени были, пожалуй, самым распространенным средством сохранения данных, использовались магнитные явления. В компакт-диске же применен другой подход.

Лазерный диск (в иностранной литературе – CD-ROM) представляет собой круглую пластинку, изготовленную из алюминия, покрытую прозрачным пластмассовым защитным слоем. Вначале изготавливается так называемый мастер-диск, на который с помощью луча лазера наносится информация в двоичном представлении. Лазерный импульс возникает только тогда, когда через записывающее устройство проходит логическая единица. В момент прохождения логического нуля импульс не возникает. В результате в некоторых местах поверхности диска, которые теперь соответствуют логическим единицам в массиве информации, алюминий испаряется. Мастер-диск служит матрицей, с которой печатаются многочисленные копии, причем на копии в тех местах, где на мастер-диске были светоотражающие участки, возникают выемки, рассеивающие свет, а в тех местах, где на мастер-диске были выемки, на копии остаются светоотражающие островки. Чтение информации с компакт-диска осуществляется так же лазером, только значительно меньшей мощности. Луч лазера небольшой мощностью (как правило 0,14 мВт при длине волны 790 нм) направляется на вращающийся с большой скоростью диск под некоторым углом. Частота лазерных импульсов синхронизирована со скоростью вращения диска. Луч лазера, попадая на светоотражающий островок, отражается от него и улавливается фотоэлементом. В результате в электрической цепи считывающего устройства возникает ток, и сигнал воспринимается как логическая единица. Если же луч лазера попадает на рассеивающую свет выемку,

то отраженный луч проходит мимо фотоэлемента и электрического тока в цепи считывающего устройства не возникает. В этом случае сигнал интерпретируется как логический ноль. В настоящее время лазерные компакт-диски широко используются как для хранения компьютерной информации, так и для хранения и распространения музыкальных программ, предназначенных для воспроизведения на лазерных проигрывателях.

Другое направление в сохранении информации – голография – метод, позволяющий сохранить информацию о внешнем виде любого объемного тела с очень высокой точностью.

2.6. Лазеры в вычислительной технике

Совершенствование современных электронно-вычислительных машин идет по пути увеличения быстродействия и надежности их работы. При этом используются буквально все достижения современной физики. Наряду с увеличением быстродействия ведутся работы по миниатюризации вычислительной техники.

Когда появились лазеры, сразу же возникла идея об использовании их принципов в конструировании вычислительных машин. При осуществлении, этой идеи решалось сразу два вопроса: увеличение быстродействия и устранение взаимных помех.

Любая современная вычислительная машина состоит в основном из логических схем, системы памяти (запоминания) и средств передачи обрабатываемой информации. Оказалось, что существует реальная возможность создания электронно-вычислительных машин с принципиально новым решением их схем на лазерах.

Оптические вычислительные машины (ОВМ) на лазерах будут иметь очень большое быстродействие. Можно создать устройства, которые будут работать со значительно большей скоростью, чем существующие электронные устройства, и в целом увеличить производительность будущих систем обработки информации.

Для передачи световых импульсов между внутренними элементами оптической вычислительной машины можно применять материалы, по которым распространение света происходит с малым затуханием. Наиболее интересным проводником из таких материалов являются стеклянные волокна, имеющие очень, незначительные потери. Если покрыть такое оптическое волокно тонким слоем стекла с коэффициентом преломления меньшим, чем у самого волокна, то можно полностью исключить взаимную интерференцию между двумя соседними линиями передачи.

Оптические волокна, которые используются в качестве световодов, могут быть очень тонкими. Так, в жгуте сечением 10 мкм укладывается до 100 оптических световодов.

2.7. Лазерное оружие

В середине 80-х годов был получен ряд сообщений о том, что на американских полигонах было испытано несколько образцов лазерного оружия, часть из которого была изготовлена в виде пистолета, часть – в виде ружья. В сообщениях подчеркивалось, что оно было создано для борьбы с живой силой противника на поле боя. Действие оружия основано на использовании большой пиковой мощности лазера. Для чего применялся твердотельный (рубиновый или на стекле с неодимом) лазер с модуляцией добротности. В результате длительность импульса составляла всего 10^{-9} с, что при использовании энергии в 1 Дж приводило к мощности в 10^9 Вт. В первую очередь действие такого оружия, по замыслам создателей, должно состоять в поражении глаз, вызывая в них обратимые или необратимые процессы. Предположения основаны на том, что, попадая на хрусталик человеческого глаза, лазерное излучение не должно поражать сам хрусталик, так как он прозрачен для этого излучения. Но хрусталик, как всякая оптическая система, фокусирует излучение в очень маленькое пятно на сетчатке. В этом пятне плотность энергии возрастает настолько, что приводит к кровоизлиянию. Человек либо не успевает моргнуть – настолько короткой является вспышка, либо даже не видит излучение – если оно на волне 1,06. В качестве источника излучения используется лазер на рубине, помещенный внутри съемного патрона. В этом же патроне находится источник возбуждения, представляющий собой химический элемент, питаемый от батареи. Оно наводится на объект поражения, нажимается спусковой курок, чем подается импульс от батареи на химический элемент, который дает питание на рубиновый стержень. Излучаемая энергия выбрасывается в сторону цели. Разработчики считают, что для поражения органов зрения нет необходимости наведения луча точно в глаз противника. Достаточно облучить голову или весь корпус человека. Но если он будет расположен лицом в сторону источника излучения, то поражение органов зрения обеспечено. В сообщении отмечается, что даже если объект поражения находится к источнику излучения под некоторым углом, все же он может потерять зрение. С появлением лазеров на CO_2 , работающих в непрерывном режиме, работы по созданию наземного оружия были форсированы. Были

созданы лазерные «пушки». Если первые пистолеты и ружья предназначались в основном против человека и только в отдельных случаях – для поджога легко воспламеняющихся материалов, то лазерные пушки предполагали, в основном, борьбу с техникой.

В печати сообщалось, что для повышения интереса Пентагона к лазерам американские инженеры выполнили следующий эксперимент. Создали лазерную пушку для борьбы с низколетящими объектами. Затем запустили модель беспилотного самолета, который на малой высоте прошел над позицией, где размещалась эта пушка. На глазах наблюдавших была отрезана часть плоскости беспилотного самолета. Самого луча никто не видел, но самолет был сбит. В опубликованных материалах, носящих рекламный характер, ничего не говорится о мощности излучения пушки, о высоте, на которой пролетел самолет, о материале, из которого были сделаны плоскости самолета, а также о покраске крыла самолета. После этого эксперимента, как сообщается, работы по созданию лазерного оружия развернулись с новой силой.

Помимо использования так называемого прямого воздействия лазерного излучения на объекты поражения, высокая направленность лазерного излучения применяется за рубежом и для создания лазерных имитаторов стрельбы и тренажеров. Использование лазеров для тренировки стрелков и наводчиков танковых пушек обосновывают тем, что лазер, имея малую расходимость пучка, повышает реальность имитации попадания в цель, обеспечивает «безопасность» стрельбы, дает возможность проводить тренировки в любое время суток и года. В сообщении делают вывод, что лазерные имитаторы, которыми предполагают оснастить танковые подразделения, позволят разыгрывать танковые бои в условиях, максимально приближенных к боевым.

Так как имитаторы стрельбы и тренажеры соответствуют по дальности стрельбы тем видам оружия, которые они имитируют, т.е. в пределах от сотни метров до нескольких километров, то предполагают применить маломощные твердотельные лазеры, газовые и полупроводниковые лазеры, простые по конструкции, надежные в эксплуатации, безопасные для «противника». И как отмечают, влияние тумана и дымки на прохождение лазерного излучения в атмосфере дает положительный эффект для тренировок. Условия стрельбы ухудшаются, но если наводчик видит цель в пределах возможностей своего оружия, то и излучение лазера достигнет цели. Быстродействие лазерных имитаторов дает возможность использовать их для имитации стрельбы любых средств поражения, обладающих любой начальной скоростью. Сообщают, что в такие имитаторы приходится вводить

специальные устройства, рассчитанные на задержку «выстрела» в целях приведения его в соответствие с полетным временем снаряда или пули, а также при стрельбе по движущимся целям с упреждением. Схема лазерного тренажера представлена на рис. 2.7.1.

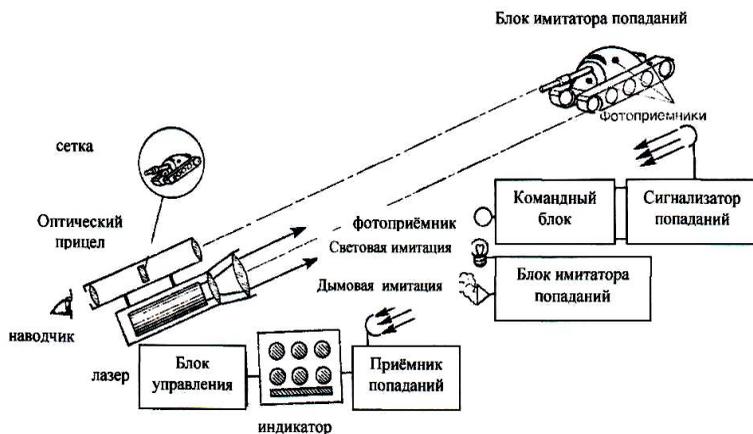


Рис. 2.7.1. Схема лазерного тренажера

Она включает в себя два варианта аппаратуры. Первым оборудуется наводчик, вторым – объект поражения: танк, самолет, вертолет и т.п. Аппаратура наводчика содержит оптический прицел, через который наводчик наблюдает объект поражения и удерживает перекрестье прицела на цели, лазерный источник излучения и блок управления его работой, пульт регистрации попадания и приемник попадания. На объекте поражения устанавливается блок имитатора попадания. Он состоит из набора фотоприемников, размещенных на объекте в различных его точках (на башне, на защитном щитке водителя, на баке с топливом и т.д.), и командного устройства, включающего в работу световой, звуковой или дымовой имитатор, который указывает экипажу о поражении танка, а также наводчику – о попадании в объект поражения. На основе такой схемы за рубежом был разработан ряд тренажеров. Некоторые из них используют штатные средства с небольшими изменениями. Проведенные испытания позволяют сделать вывод, что существенно сокращается стоимость учебных стрельб за счет экономии боеприпасов, за счет многократного использования мишеней и упрощения тренировочного оборудования.

Сообщается, что экспертная комиссия дала свою оценку и показала, что качество подготовки стрелков и наводчиков повышается, однако и тренажеры продолжают совершенствоваться. Если в первых сериях тренажеров в качестве источника излучения применялся рубиновый лазер, то впоследствии он был заменен лазером полупроводникового типа на арсениде галлия.

Затем изменениям подверглась прицельная система. В ней были установлены дополнительные линзы и зеркала, которые имитируют введение упреждения при стрельбе по движущимся целям, установку требуемого угла возвышения. Установка прицела производится по результатам измерения дальности с помощью дальномерной приставки, которая вводит в логическую схему величину коррекции направления луча с тем, чтобы установка прицела соответствовала истинному расстоянию до цели и баллистике данного снаряда. Имитация вспышки производится ксеноновым прожектором, который включается в момент излучения лазерного импульса. Внутри башни танка смонтирован блок управления, с помощью которого подаются команды имитатора стрельбы. Панели управления имеются у командира танка и заряжающего. На панели последнего имеются красная и зеленая кнопки, которые включаются в зависимости от того, какой вид боеприпаса используется. Приемники лазерного излучения расположены по периметру башни танка. Их пять штук. Каждый из них по углу поля зрения перекрывает 36° по азимуту и $\pm 15^\circ$ по углу места. При попадании луча лазера, имитирующего выстрел орудия, на один из приемных фотодетекторов, включается блок радиостанции, который посылает стреляющему танку сигнал о поражении цели. Одновременно в танке-цели включается сигнальное устройство, информирующее экипаж о поражении их танка. Кроме того, баллон, смонтированный на башне танка, начинает дымить в течение 30 с. Иногда вместо одного баллона устанавливают ряд петард, что дает гораздо больший эффект.

2.7.1. Применение лазеров в военной технике (лазерная локация)

Наземная локация. Как сообщает печать, за рубежом разрабатывается ряд стационарных лазерных локоаторов. Эти локоаторы предназначены для слежения за ракетами на начальном этапе полета, а также для слежения за самолетами и спутниками. Большое значение придается лазерному локоатору, включенному в систему ПРО и ПКО. По проекту американской системы именно оптический локоатор

обеспечивает выдачу точных координат головной части или спутника в систему лазерного поражения цели. Локатор типа «ОПДАР» предназначен для слежения за ракетами на активном участке их полета. Тактические требования определяют незначительную дальность действия локатора, поэтому на нем установлен газовый лазер, работающий на гелий-неоновой смеси, излучающий электромагнитную энергию на волне 0,6328 мкм при входной мощности всего 0,01 Вт. Лазер работает в непрерывном режиме, но его излучение модулируется с частотой 100 МГц. Передающая оптическая система собрана из оптических элементов по схеме Кассагрена, что обеспечивает очень незначительную ширину расходимости луча. Локатор монтируется на основании, относительно которого он может с помощью следящей системы устанавливаться в нужном направлении с высокой точностью. Эта следящая система управляется сигналами, которые поступают через кодирующее устройство. Разрядность кода составляет 21 единицу двоичной информации, что позволяет устанавливать локатор в нужном направлении с точностью около одной угловой секунды. Приемная оптическая система имеет диаметр входной линзы 300 мм. В ней установлен интерференционный фильтр, предназначенный для подавления фоновых помех, а также устройство, обеспечивающее фазовое детектирование отраженной ракетой сигналов. В связи с тем, что локатор работает по своим объектам, то с целью увеличения отражательной способности ракеты на нее устанавливается зеркальный уголкового отражатель, который представляет собой систему из пяти рефлекторов, обеспечивающих распределение упавшей на них световой энергии таким образом, что основная ее часть идет в сторону лазерного локатора. Это повышает эффективность отражающей способности ракеты в тысячи раз. Локатор имеет три устройства слежения по углам: точный и грубый датчики по углам и еще инфракрасную следящую систему. Технические данные первого датчика определяются в основном оптическими характеристиками приемо-передающей системы. А так как диаметр входной оптической системы равен 300 мм и фокусное расстояние равно 2000 м, то это обеспечивает угловую разрешающую способность 80 угловых секунд. Сканирующее устройство имеет полосу пропускания 100 Гц. Второй датчик имеет оптическую систему с диаметром 150 мм и меньшее фокусное расстояние. Это дает разрешающую способность по углу всего 200 угловых секунд, т.е. обеспечивает меньшую точность, чем первый. В качестве приемников излучения оба

канала оснащены фотоумножителями, т.е. наиболее чувствительными элементами из имеющихся. Перед приемником излучения располагается интерференционный фильтр с полосой пропускания всего в 1,5 ангстрема. Это резко снижает долю приходящего излучения от фона. Полоса пропускания согласована с длиной волны излучения лазера, чем обеспечивается прохождение на приемник только своего лазерного излучения. Локатор позволяет работать в пределах от 30 до 30 000 м. Предельная высота полета ракеты 18 000 м. Сообщается, что этот локатор обычно располагается от ракеты на расстоянии около 1000 м и на линии, составляющей с плоскостью полета ракеты 45 градусов. Измерение параметров движения ракеты с такой высокой точностью на активном участке полета дает возможность точно рассчитать точку ее падения.

Лазеры при слежении. В настоящее время просторы околоземного космического пространства бороздят многочисленные космические спутники. Назначение их самое различное. Среди них есть и геодезические, которые служат для уточнения конфигурации Земли.

Скорость и высота спутников не являются постоянными величинами, а меняются во времени. Эти характеристики спутников очень важны для уточнения параметров нашей планеты. Например, недавно сообщалось о том, что на основании обработки данных полета спутников уточнена глубина в одном из районов Индийского океана.

Применение лазеров в космической технике – одна из основных задач, поставленных перед многими фирмами и исследовательскими организациями, Военно-воздушными силами и другими видами вооруженных сил США.

В настоящее время следить за искусственными спутниками Земли с помощью пассивных оптических средств можно только в тех случаях, когда спутник освещен Солнцем, а наземные станции слежения находятся в тени. Для того чтобы получить необходимую геодезическую информацию, например о распределении поля тяготения Земли, нужно знать параметры всей орбиты спутника, а не ограничиваться ее отрезком, когда спутник освещен Солнцем. Использование лазеров позволяет получить информацию о параметрах орбиты как днем, так и ночью, что в значительной степени расширяет диапазон измерений.

На оптическом телескопе, направленном на летательный космический аппарат, размещен лазер, периодически освещающий спутник. Установленный на спутнике рефлектор из зеркальных уголкового отражателей отражает излучение лазера в сторону системы слежения. Излучение воспринимается фотоэлектронным множителем

(ФЭУ). По детектированному сигналу определяют расстояние до спутника и ошибку слежения.

В экспериментах использовался спутник S-66, который был запущен на орбиту, удаленную от Земли на 1000 км. Спутник был оборудован системой магнитной стабилизации, удерживающей его таким образом, чтобы ось спутника всегда была направлена параллельно магнитному полю Земли. Спутник медленно вращался вокруг своей оси. Зеркальный уголкового отражатель на поверхности спутника был направлен в сторону Земли, когда спутник находился в северном полушарии.

Отражатель собран из 360 зеркальных уголков сечением 2,6 см. Излучение от искусственного спутника Земли отражалось под очень малым углом (в пределах 10^{-4} рад, рис. 2.7.2).

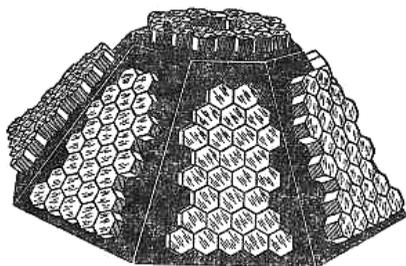


Рис. 2.7.2. Зеркальный уголкового рефлектор, установленный на спутнике

Лазерные гироскопы. Известно, что для определения курса на кораблях, самолетах, ракетах применяются гироскопы. Основу гироскопа составляет быстро вращающийся маховик. Ось маховика гироскопа относительно заданного положения в пространстве имеет очень высокую устойчивость. Чем быстрее вращается маховик, тем сильнее проявляются его гироскопические свойства. Поэтому скорость его вращения достигает 30 000 об/мин и более.

Недостатком механических гироскопов является наличие в них вращающихся частей, что отрицательно сказывается на их надежности. Вопросу же надежности оборудования летательных аппаратов уделяется, как известно, исключительное внимание. Не всегда удовлетворяет и чувствительность существующих гироскопов.

Исследования последнего времени показали, что лазер можно использовать в качестве такого навигационного прибора, как гироскоп.

Лазерный гироскоп – прибор нового типа, в основу его работы положен известный эффект Доплера. Лазерный гироскоп не имеет движущихся частей и теоретически должен обладать большим сроком службы, высокой чувствительностью и стабильностью. Выходной

сигнал может быть выражен в цифровой форме, и поэтому его удобно применять в сочетании с электронно-вычислительной машиной.

Лазерные дальномеры. В последнее время остро ощущается необходимость создания прибора, с помощью которого можно было бы определять расстояния до различных объектов в разных условиях с высокой точностью. Желательно, чтобы этот прибор был свободным от тех недостатков, которые присущи локационным и оптическим дальномерам. Известно, что основным недостатком локатора является большая диаграмма направленности, вследствие чего возникают помехи от соседних объектов. Кроме того, излучение локатора легко обнаружить. Чтобы измерить с большой точностью расстояние с помощью оптического дальномера, величина базы должна быть очень большой.

От всех этих недостатков свободен лазерный дальномер, имеющий большую мощность сигнала, монохроматичный и тонкий луч. Принцип действия дальномера аналогичен принципу действия обычного локатора, хотя в конструкции, несомненно, есть свои особенности.

Лазерный луч через передающий телескоп направляется на объект и, попав на его поверхность, отражается от нее. Часть отраженного сигнала улавливается приемным телескопом, на выходе которого расположен узкополосный оптический фильтр. С помощью этого фильтра удается выделить отраженный сигнал даже на фоне излучения Солнца. Затем сигнал поступает на вход фотоумножителя. Усиленный сигнал запускает генератор стробоскопических импульсов. По числу импульсов, поступивших на вход прибора за какой-то период времени, определяется расстояние до объекта.

Конструктивно лазерный дальномер состоит из двух блоков: головки и блока питания. Головка имеет визир, приемник и передатчик. В передатчике помещается рубиновый лазер. Накачка осуществляется ксеноновой лампой. В головке расположены также индикатор, вычислительное устройство, фотоумножитель. Общий вид одной из конструкций лазерного дальномера показан на рис. 2.7.3.

Действие прибора рассчитано на расстояние до 6 км, а в условиях хорошей видимости – до 10 км. Точность измерений равна 10 м независимо от измеряемого расстояния. Управлять прибором несложно: оператору достаточно выбрать объект, нажать кнопку, и расстояние до объекта мгновенно высвечивается в виде цифр в окне индикатора.

Имеются сообщения о том, что лазерный дальномер при соответствующей модификации может работать как альтиметр, т.е. определять высоту над местностью.

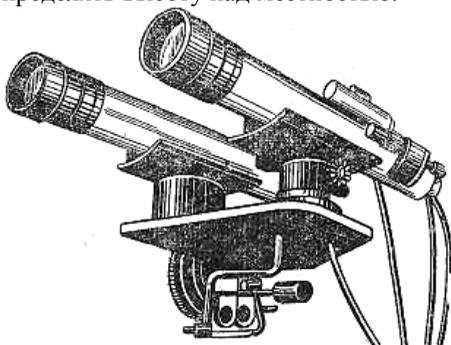


Рис. 2.7.3. Лазерный дальномер

Он также может применяться для прецизионной калибровки и проверки существующих обычных альтиметров в различных условиях полета и при различном характере земной поверхности.

Экспериментальные полеты показали, что с помощью специально для этой цели построенного лазерного альтиметра, установленного на самолете, может быть измерена высота вплоть до 300 м с точностью до 1,5 м. Интересно отметить, что если поверхность Земли покрыта лесом, то отраженный сигнал имеет характер «двойного эха». Это обусловлено отражением от вершин деревьев и от поверхности Земли. Эффект двойного эха позволяет измерить абсолютную высоту деревьев и дает возможность применять лазерные альтиметры в условиях, при которых обычный локационный альтиметр бесполезен. На рис. 2.7.4 показан один из образцов отечественных лазерных дальномеров ГД-314. Прибор предназначен для точного измерения расстояний в пределах до 2000 м. Точность измерений во всем диапазоне 2 см. Мощность излучения 0,5 мВт.

Дальномер состоит из оптической приемо-передающей части весом 6 кг, измерительного блока весом 5 кг и блока питания 15 кг. Батареи обеспечивают непрерывную работу дальномера в течение 50 ч.

Лазеры в бортовой аппаратуре космических кораблей. В период, предшествовавший полету космического корабля «Джеминей-7» с космонавтами на борту, в США были закончены разработка и испытание лазерной системы связи «воздух–земля». Эта система предусматривает связь космического корабля с наземной станцией при помощи лазерного луча. Данную систему предполагалось использовать при запусках космических кораблей по программам

«Джеминай» и «Аполлон» для передачи речи и связи через плазменный экран при посадке. Кроме того, по мнению специалистов, с помощью такой системы можно определять особенности прохождения когерентного луча через атмосферу и возможности бортовой аппаратуры по определению местонахождения наземной станции связи.



Рис. 2.7.4. Отечественный лазерный дальномер ГД-314

Испытания системы проводились с реактивным самолетом. Лазерная система связи состояла из трех частей: наземного лазерного маяка, бортового лазерного передатчика и наземного приемника. Лазерный маяк служил для нацеливания передатчика на самолете на наземную приемную станцию. Чтобы обеспечить непрерывное сопровождение приемником лазерного передатчика, лазерный маяк и приемник были смонтированы на основании следящего типового устройства, связанного с установленной поблизости от него антенной радиолокационной станции.

Самолет во время испытаний лазерной системы связи обычно совершал полеты над наземной станцией в направлении против часовой стрелки по эллиптическим траекториям общей протяженностью примерно 1100 км на высоте от 3 до 12 км, так что наклонная дальность до приемной станции составляла 8–24 км. Скорость самолета была от 500 до 1300 км/ч. Каждый день проводилось до шести полетов, обычно перед самым заходом Солнца.

Поскольку лазерная система связи предназначалась, в конечном счете, для применения на пилотируемом орбитальном космическом корабле, полеты самолета совершались таким образом, чтобы

имитировать углы слежения и скорости полета корабля по близкой к Земле орбите. Одной из задач испытаний системы было выяснить, сможет ли космонавт обнаружить лазерный маяк и затем нацелить на него луч своего передатчика с достаточной точностью, чтобы обеспечить надежную одностороннюю телефонную связь.

Другая задача проводимых испытаний преследовала цель оценить качество речевых сигналов, переданных по инфракрасному лучу, последовательность неотфильтрованных импульсов и фонового шума. На основе данных этих испытаний американские специалисты надеялись определить влияние земной атмосферы на распространение колебаний оптического диапазона.

В первых испытаниях сигналы, принятые наземной станцией, были неразборчивыми. При повторных испытаниях записи оказались понятными, но имели невысокое качество. Однако этим была доказана возможность работы лазеров в системе связи «воздух–земля».

По мнению специалистов, занимавшихся этим проектом, для создания практической системы связи необходимо разработать более надежную систему нацеливания и стабилизации.

Голографические индикаторы на лобовом стекле. Для использования в прицельно-навигационной системе ночного видения, предназначенной для истребителя F-16 и штурмовика A-10 был разработан голографический индикатор на лобовом стекле. В связи с тем, что габариты кабины самолетов невелики, то с тем, чтобы получить большое мгновенное поле зрения индикатора разработчиками было решено разместить коллимирующий элемент под приборной доской. Оптическая система включает три отдельных элемента, каждый из которых обладает свойствами дифракционных оптических систем: центральный изогнутый элемент выполняет функции коллиматора, два других элемента служат для изменения положения лучей. Разработан метод отображения на одном экране объединенной информации: в форме раstra и в штриховой форме, что достигается благодаря использованию обратного хода луча при формировании раstra с интервалом времени 1,3 мс, в течении которого на ТВ-экране воспроизводится информация в буквенно-цифровой форме и в виде графических данных, формируемых штриховым способом. Для экрана ТВ-трубки индикатора используется узкополосный люминофор, благодаря чему обеспечивается хорошая селективность голографической системы при воспроизведении изображений и пропускание света без розового оттенка от внешней обстановки. В процессе этой работы решалась проблема приведения наблюдаемого изображения в соответствие с

изображением на индикаторе при полетах на малых высотах в ночное время (система ночного видения давала несколько увеличенное изображение), которым летчик не мог пользоваться, поскольку при этом несколько искажалась картина, которую можно бы было получить при визуальном обзоре. Исследования показали, что в этих случаях летчик теряет уверенность, стремится лететь с меньшей скоростью и на большой высоте. Необходимо было создать систему, обеспечивающую получение действительного изображения достаточно большого размера, чтобы летчик мог пилотировать самолет визуально ночью и в сложных метеоусловиях, лишь изредка сверяясь с приборами. Для этого потребовалось широкое поле индикатора, при котором расширяются возможности летчика по пилотированию самолета, обнаружению целей в стороне от маршрута и производству противозенитного маршрута и маневра атаки целей. Для обеспечения этих маневров необходимо большое поле зрения по углу места и азимуту. С увеличением угла крена самолета летчик должен иметь широкое поле зрения во вертикали. Установка коллимирующего элемента как можно выше и ближе к глазам летчика была достигнута за счет применения голографических элементов в качестве зеркал для изменения направления пучка лучей. Это хотя и усложнило конструкцию, однако дало возможность использовать простые и дешевые голографические элементы с высокой отдачей.

В США разрабатывается голографический координатор для распознавания и сопровождения целей. Основным назначением такого коррелятора является выработка и контроль сигналов управления наведения ракеты на среднем и заключительном участках траектории полета. Это достигается путем мгновенного сравнения изображений земной поверхности, находящейся в поле зрения системы в нижней и передней полусфере, с изображением различных участков земной поверхности по заданной траектории, хранимым в запоминающем устройстве системы. Таким образом, обеспечивается возможность непрерывного определения местонахождения ракеты на траектории с использованием близко лежащих участков поверхности, что позволяет проводить коррекцию курса в условиях частичного затемнения местности облаками. Высокая точность на заключительном этапе полета достигается с помощью сигналов коррекции с частотой меньше 1 Гц. Для системы управления ракетой не требуется инерциальная система координат и координаты точного положения цели. Как сообщается, исходные данные для данной системы должны обеспечиваться предварительной аэро- или космической разведкой и состоять из серии последовательных кадров, представляющих собой

Фурье-спектр изображения или панорамные фотографии местности, как это делается при использовании существующего площадного коррелятора местности. Применение этой схемы, как утверждают специалисты, позволит производить пуски ракет с носителя, находящегося вне зоны ПВО противника, с любой высоты и точки траектории, при любом ракурсе, обеспечит высокую помехоустойчивость, наведения управляемого оружия после пуска по заранее выбранным и хорошо замаскированным стационарным целям. Образец аппаратуры включает в себя входной объектив, устройство преобразования текущего изображения, работающего в реальном масштабе времени, голографической линзовой матрицы, согласованной с голографическим запоминающим устройством, лазера, входного фотодетектора и электронных блоков. Особенностью данной схемы является использование линзовой матрицы из 100 элементов, имеющих формат 10×10 . Каждая элементарная линза обеспечивает обзор всей входной аппаратуры и, следовательно, всего сигнала от поступающего на вход изображения местности или цели. На заданной фокальной плоскости образуется соответственно 100 Фурье спектров этого входного сигнала. Таким образом, мгновенный входной сигнал адресуется одновременно к 100 позициям памяти. В соответствии в линзовой матрице изготавливается голографическая память большой емкости с использованием согласованных фильтров и учетом необходимых условий применения. Сообщается, что на этапе испытания системы был выявлен ряд ее важных характеристик.

1. Высокая обнаружительная способность как при низкой, так и при высокой контрастности изображения, способность правильно опознать входную информацию, если даже имеется только часть ее.

2. Возможность плавного автоматического перехода сигналов сопровождения при смене одного изображения местности другим, содержащимся в запоминающем устройстве.

3. Возможность расширения зоны пуска ракеты путем запоминания несколько близко расположенных участков местности, из которых каждая имеет соответствующую ориентацию на цель. В процессе полета ракета может быть быстро переведена на заданную траекторию, зависящую от динамики ракеты.

2.8. Применение лазеров в медицине и биологии

Практическое применение лазеров в хирургии началось в СССР в 1966 году в институте имени А.В. Вишневского. Лазерный скальпель

был применен в операциях на внутренних органах грудной и брюшной полостей.

В начале развития лазерной техники медиков привлекла возможность использования лазеров в хирургии. Уже в середине 60-ых годов XX века были построены лазерные установки, которые с успехом использовались при хирургических операциях. Излучение лазера поступает в шарнирный световод – систему полых раздвигающихся трубок, внутри которых свет распространяется, отражаясь от зеркал. По световоду излучение попадает в выходную трубку, которую держит в своей руке хирург. Он может перемещать ее в пространстве, свободно поворачивая в разных направлениях и тем самым посылая лазерный луч в нужное место. На конце выходной трубки есть маленькая указка; она служит для наведения луча – ведь сам луч невидим. Луч фокусируется в точке, которая находится на расстоянии 3–5 мм от конца указки. Это и есть *лазерный хирургический скальпель*.

В фокусе лазерного луча концентрируется энергия, достаточная для того, чтобы быстро нагреть и испарить биологическую ткань. Перемещая «лазерный скальпель», хирург рассекает ткань. Глубина разреза зависит от скорости резания и от степени кровенаполнения ткани. В среднем она составляет 2–3 мм. Часто рассечение тканей выполняют не в один, а в несколько приемов, рассекая как бы послойно. В отличие от обычного скальпеля, лазерный скальпель не только рассекает ткани, но может также сшивать края разреза, иными словами, может производить *биологическую сварку*.

Рассечение производят сфокусированным излучением (рис. 2.8.1), хирург должен держать выходную трубку на таком расстоянии от ткани, чтобы точка, в которой фокусируются лучи, оказалась на поверхности ткани. При мощности излучения 20 Вт и диаметре сфокусированного светового пятна 1 мм достигается интенсивность (плотность мощности) $2,5 \text{ кВт/см}^2$. Излучение проникает в ткань на глубину около 50 мкм. Следовательно, объемная плотность мощности, идущая на нагрев ткани, достигает 500 кВт/см^3 . Для биологических тканей это очень много. Происходит их быстрое разогревание и испарение – налицо эффект рассечения ткани лазерным лучом. Если же луч расфокусировать (для чего достаточно немного отодвинуть конец выходной трубки от поверхности ткани) и тем самым снизить интенсивность, скажем, до 25 Вт/см^2 , то ткань испаряться не будет, а будет происходить поверхностная *коагуляция* («заваривание»). Вот этот-то процесс и используют для сшивания разрезанной ткани. Биологическая сварка осуществляется за счет коагуляции жидкости,

содержащейся в рассекаемых стенках оперируемого органа и специально выдавливаемой в промежуток между соединяемыми участками ткани.

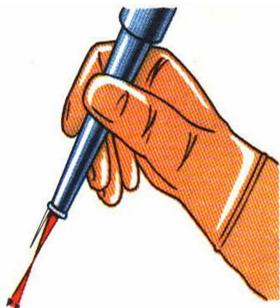


Рис. 2.8.1. Лазерный скальпель в руке хирурга. Хорошо видна маленькая указка на конце выходной трубки. Условно показан выходящий из трубки лазерный пучок (в действительности он невидим)

Лазерный луч делает относительно бескровный разрез, так как одновременно с рассечением ткани коагулирует края раны, «заваривая» встречающиеся на пути разреза кровеносные сосуды. Правда, сосуды должны быть не слишком крупными; крупными сосуды необходимо предварительно перекрыть специальными зажимами. В силу своей прозрачности лазерный луч позволяет хирургу хорошо видеть оперируемый участок. Лезвие обычного скальпеля всегда в какой-то мере загораживает хирургу рабочее поле. Лазерный луч рассекает ткань как бы на расстоянии, не оказывая на нее механического давления. В отличие от операции обычным скальпелем, хирург в данном случае может не придерживать ткань рукой или инструментом. Лазерный скальпель обеспечивает абсолютную стерильность – ведь с тканью взаимодействует здесь только излучение.

Луч лазера действует локально; испарение ткани происходит только в точке фокуса. Прилегающие участки ткани повреждаются при этом значительно меньше, чем при использовании обычного скальпеля. Как показала клиническая практика, рана от лазерного скальпеля относительно быстро заживает.

Лазерный луч от генератора в этом случае перелается по гибкому световоду изготовленным из тончайших стеклянных или пластмассовых трубок (все те же оптические волокна). На конце световода закреплена головка с фокусирующей линзой. Световод вводится внутрь организма через небольшой разрез или другим доступным способом. Манипулируя световодом, хирург направляет луч лазера на оперируемый объект, оставляя нетронутыми соседние органы и ткани. При этом достигается высокая точность и

стерильность оперативного вмешательства. При таких операциях значительно сокращается кровопотеря, что облегчает протекание послеоперационной реабилитации.

Особенно широкое применение нашли лазерные инструменты в хирургии глаза. Глаз, как известно, представляет орган, обладающий очень тонкой структурой. В хирургии глаза особенно важны точность и быстрота манипуляций. Кроме того выяснилось, что при правильном подборе частоты излучения лазера оно свободно проходит через прозрачные ткани глаза, не оказывая на них никакого действия. Это позволяет делать операции на хрусталике глаза и глазном дне, не делая никаких разрезов вообще. В настоящее время успешно проводятся операции по удалению хрусталика путём испарения его очень коротким и мощным импульсом. При этом не происходит повреждение окружающих тканей, что ускоряет процесс заживления, составляющий буквально несколько часов. В свою очередь, это значительно облегчает последующую имплантацию искусственного хрусталика.

Другая успешно освоенная операция – приваривание отслоившейся сетчатки. Для этого был использован прозрачный хрусталик. Именно через него было предложено проводить операцию. Для технической реализации операции был разработан прибор, называемый офтальмокоагулятор марки ОК-1. Прибор состоит из основания, на котором размещены источники питания и электрическая часть аппаратуры с органами управления. На основании на специальном шланге с помощью гибкого соединения подвешена излучающая головка с рубиновым лазером. На одной оптической оси с лазером располагается система прицеливания, которая позволяет через зрачок тщательно исследовать глазное дно, найти пораженное место и навести на него (прицельно) луч лазера. Для этого служат две рукоятки, находящиеся в руках хирурга. Вспышка обеспечивается нажатием кнопки, расположенной на одной из рукояток. Выдвигающаяся шторка предохраняет глаза хирурга во время вспышки. Для удобства работы врача-оператора и обслуживающего персонала прибор снабжен световой и звуковой сигнализацией. Энергия импульсов регулируется от 0,02 до 0,1 Дж, длительность 0,1 с. Сама техника операции состоит в следующем. Сначала врач с помощью оптического визира исследует глазное дно больного и, определив границы заболевшего участка, рассчитывает необходимое количество вспышек и потребную энергию каждой вспышки. Затем, следуя по границам заболевшего участка, производит их облучение. Фокусирую излучение на отслоившемся участке последнюю

«приваривают» к главному дну за счет коагуляции. Операция проходит быстро и совершенно безболезненно.

На рис. 2.8.2 показаны отечественный лазерный офтальмокоагулятор, предназначенный для проведения сложных глазных операций. Источником излучения служит рубиновый стержень диаметром 6,5 мм, длиной 65 мм. В одну минуту лазер дает 4 вспышки длительностью 1 или 5 мс. Энергия излучения в импульсе принимает значение от сотых долей до 1 Дж. Минимальный диаметр светового пятна около 100 мкм. Прибор питается от обычной сети (220 В). Потребляемая мощность 300 Вт.

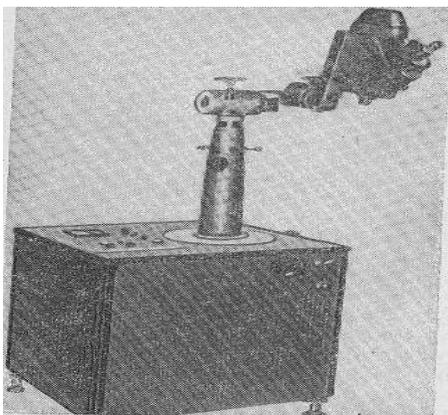


Рис. 2.8.2. Отечественный лазерный офтальмокоагулятор

Лазеры довольно успешно применяются и в лечении таких распространенных сейчас заболеваний глаза как близорукость и дальнозоркость. Одной из причин этих заболеваний является изменение в силу каких-либо причин конфигурации роговицы глаза. С помощью очень точно дозированных облучений роговицы лазерным излучением можно исправить ее изъяны, восстановив нормальное зрение.

Трудно переоценить значение применения лазерной терапии при лечении многочисленных онкологических заболеваний, вызванных неконтролируемым делением видоизмененных клеток. Точно фокусируя луч лазера на скоплении раковых клеток, можно полностью уничтожить эти скопления, не повреждая здоровые клетки. У одного больного была злокачественная опухоль (меланома) с метастазами в кожу и подкожные слои. Размеры метастазов достигали 1 см в диаметре. Эти опухоли облучали серией импульсов с суммарной энергией, достигавшей 360 Дж. Через 20 дней после облучения

опухоли исчезли. Эффект был более значительным, когда на опухоль воздействовали, сфокусированным излучением при обеспечении достаточной плотности энергии на поверхность опухоли. Так, в проводившемся опыте энергия фокусировалась в пятно диаметром 2 мм при плотности энергии 1500 Дж/см².

Разнообразные лазерные зонды широко используются при диагностике заболеваний различных внутренних органов, особенно в тех случаях, когда применение других методов невозможно или сильно затруднено.

Лазерный луч найдет применение в качестве прижигающего инструмента для обработки кожных новообразований и повреждений. В этом случае лазер имеет то превосходство перед обычными прижигающими средствами, что он является абсолютно чистым инструментом и не вносит вторичной инфекции.

В настоящее время проводятся большие исследования биологического действия лазеров на живые организмы, в частности действия излучения на отдельные клетки, на центральную нервную систему. Ученым в экспериментах на мышах удалось вызвать тяжелые поражения различных отделов головного мозга с помощью сфокусированного излучения лазера. В зависимости от точки фокусирования излучения удавалось разрушать разные участки мозга, начиная с коры полушарий и до глуболежащих слоев – белого вещества продолговатого мозга и других его отделов. Удивительным в этой операции было то, что кости черепа и твердая мозговая оболочка при этом оставались неповрежденными. Животных во время опыта облучали с помощью рубинового лазера, энергия излучения в импульсе составляла не более 40 Дж. Расстояние от торца лазера до головы животного составляло 2 м. Большинство животных во время эксперимента погибало. Поражение вызывалось, очевидно, резким повышением температуры в точке фокусировки луча.

Исследования в этом направлении продолжают.

2.9. Лазеры в химии

Лазеры могут оказать большую помощь химии. Они позволяют ускорить химические процессы, активизировать и заставить их протекать в определенном направлении, которое еще вчера казалось невозможным.

По мнению многих специалистов, применение в химии лазеров вызовет целый переворот, подобный тому, какой был вызван в свое время открытием атомной энергии.

Известно, что химические соединения состоят из молекул. Молекулы в свою очередь состоят из атомов. Как молекулы в соединениях, так и атомы в молекулах связаны друг с другом. Прочность связи зависит от энергии связи. Атомы в молекулах находятся в колебательном состоянии. Они совершают колебания около определенных точек, соответствующих среднему энергетическому состоянию частиц. Если такую молекулу (группу молекул) облучить мощным пучком обыкновенного света, то амплитуда колебаний атомов в ней относительно среднего состояния увеличится. Так как энергетический спектр обыкновенного света соответствует электромагнитным колебаниям самой различной частоты, то будет увеличена амплитуда колебаний многих атомов. При достаточно большой интенсивности облучения может наступить разрыв некоторых связей, и молекула разрушится. Но от этого немного пользы. Гораздо больший интерес представляет разрыв только некоторых, определенных связей. Тогда можно было бы легко менять структуру молекул, строить их по своему плану. Но как это сделать? На помощь и на этот раз приходит всемогущий луч лазера.

Если молекулу, входящую в состав химического соединения, облучить мощным лучом лазера, имеющим одну частоту, то эта частота будет воздействовать только на определенную связь. Частота излучения лазера должна в этом случае соответствовать энергии связи молекулы. Если интенсивность облучения достаточно высока, связь разорвется. Другие же связи в молекуле не будут нарушены.

Именно эта особенность и открывает химикам широчайшие перспективы. Можно избирательно рвать химические связи и вести химическую реакцию в нужном направлении. Вероятно, для того чтобы получить необходимую реакцию, надо уметь изменять частоту лазера. Вместо одного лазера с изменяющейся частотой можно иметь набор лазеров различной частоты. Возможно, что потребуется вести облучение химического соединения одновременно несколькими лазерными пучками света, каждый со своей частотой.

Трудности заключаются в том, что частота, которая необходима для разрушения связей атома, может быть получена только путем использования такого же атома в качестве рабочего вещества в лазере, что не всегда возможно. Получить те же частоты, используя другие атомы или молекулы в качестве рабочего вещества, практически нельзя: одинаковых частот различные атомы или молекулы, как правило, не излучают. Следовательно, необходимо научиться получать требуемые частоты. Кроме того, лазер должен обладать достаточно большой мощностью.

Эти трудности со временем, надеемся, будут преодолены и наша химическая промышленность, наши научно-исследовательские институты будут располагать мощным инструментом в создании новых химических соединений.

2.10. Лазеры и фотография

За сто лет, прошедших со дня изобретения фотографии, в ней принципиально ничего не изменилось, кроме методов обработки и улучшения качества фотоматериалов. Процесс фотографирования известен каждому. Изображение интересующего нас объекта с помощью объектива, представляющего систему линз, фокусируется на светочувствительную поверхность, превращаясь из трехмерного в двухмерное.

С появлением лазеров открываются новые, очень интересные возможности в фотографии. Принципиально меняется техника фотографирования. Новый метод, применение которого стало возможным в связи с получением когерентного источника света, связан с процессом восстановления волнового фронта.

Процесс восстановления волнового фронта был открыт в 1947 г. английским ученым Деннисом Габором.

Однако добиться успехов в эффективном использовании этого метода в то время было очень трудно из-за отсутствия необходимого источника когерентного излучения. Американцы Эммет Лейт и Джурис Унайтникс возродили оригинальный метод Габора. Изобретение лазера создало условия для успешного его осуществления. В настоящее время уже удалось получить высококачественное трехмерное изображение предметов. Лейт и Унайтникс получили трехмерное изображение игрушечного паровоза длиной 0,5 м. В опытах использовался аргоновый лазер мощностью 5 Вт.

Новый метод фотографирования не нуждается в линзах или объективах.

Луч от лазера (лучше, чтобы это был газовый лазер, обеспечивающий наиболее высокую монохроматичность) направляется (рис. 2.10.1) на оптическую систему, которая формирует и делает его более широким. Когерентность луча при этом не нарушается. Широкий луч лазера здесь нужен для того, чтобы он мог захватить большую площадь, включающую фотографируемый объект. Далее луч лазера направляется на предмет. Часть излучения, попадающая на предмет, называется опорным лучом. Другая часть,

пройдя мимо предмета, попадает на зеркало. Эта часть светового потока является эталонным лучом. Волны эталонного луча имеют, как известно, одинаковые амплитуду, длину и характеризуются равным соотношением фаз. Лучи, отраженные как от фотографируемого объекта, так и от зеркала, попадают на фотопластинку.

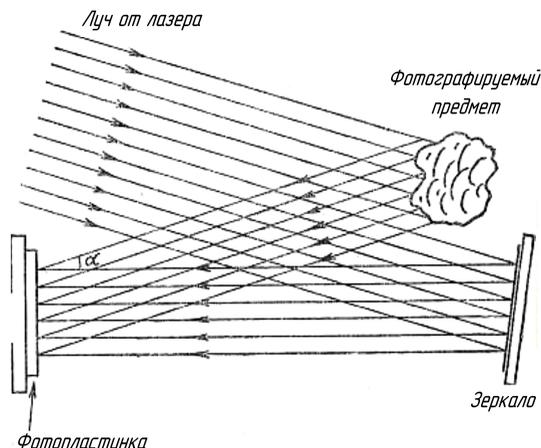


Рис. 2.10.1. Фотографирование с помощью лазера методом восстановления волнового фронта:
эталонный луч создается с помощью зеркала

Регистрация такой интерференционной картины дает голограмму.

После проявления на фотопластинке можно увидеть интерференционную картину. Это так называемая голограмма. Название «голограмма» произошло от греческого слова *holos* – весь. Интерференционная картина является результатом взаимодействия волн, отраженных от предмета, и волн эталонного луча (т.е. восстановленная волна идентичная первоначальной). Она содержит в себе всю информацию, которую содержала первоначальная волна. Поэтому метод был назван голографией, то есть методом полной записи волны.

Идея голографии была выдвинута еще в 1920 году польским физиком М. Вольфке (1883–1947), но была забыта. В 1947 году независимо от Вольфке идею

голографии предложил и обосновал английский физик Д. Габор, удостоенный за это в 1971 году Нобелевской премии.

Совокупность серий сферических волн, возникновение каждой из которых соответствует определенной точке поверхности отражающего предмета, имеет в высшей степени сложный характер.

Эту сложную картину надо запечатлеть на фотопластинку. Амплитуда волны отмечается потемнением светочувствительного слоя пластинки. Зарегистрировать же фазу волны, пришедшей к фотопластинке, помогает эталонный луч, волны которого, складываясь с отраженными от предмета, образуют интерференционный эффект, проявляющийся в виде интерференционных полос на фотопластинке. В одной точке, где волны отраженного и эталонного лучей проходят в фазе, они усиливаются, в другой, где волны приходят в противофазе, они гасят друг друга. Там, где сдвиг между волнами отличается от этих двух предельных случаев, интенсивность будет промежуточной.

Плотность расположения интерференционных полос на ней зависит от величины угла между направлением распространения волн, несущих информацию о предмете, и направлением распространения эталонных волн (угол α на рис. 2.10.1).

Таким образом, вся информация, которую несут световые волны, отраженные от объекта, оказывается запечатленной в виде интерференционных полос на фото пластинке. Но полученная голограмма не имеет абсолютно ничего общего с предметом.

Для того чтобы получить изображение предмета, необходимо осветить полученную голограмму лучом лазера с частотой, соответствующей эталонному лучу. Схема воспроизведения фотографируемого объекта показана на рис. 2.10.2. Эталонный луч лазера, пройдя через голограмму, будет вести себя точно так же, как вел себя опорный луч при отражении от объекта съемки, когда на его пути стояла фотопластинка. Процесс восстановления изображения при прохождении эталонного луча через голограмму является обратным по отношению к процессу образования интерференционной картины при получении голограммы. Сходство этих двух процессов служит тем принципом, который положен в основу восстановления волнового фронта.

Если на пути распространения лучей в плоскости формирования изображения поставить фотографическую пластинку, то она воспроизведет изображение предмета с очень высокой точностью. Действительное изображение формируется сферическими волнами, преобразованными при восстановлении расходящихся волн в

сходящиеся, возникновение, которых соответствовало в момент получения голограммы определенным точкам поверхности предмета.

Если посмотреть на голограмму со стороны линзы (на рисунке показано стрелкой), то мы увидим мнимое изображение предмета.

Голограмма обладает многими интересными свойствами. Она, например, совершенно не похожа на объект съемки. По ее внешнему виду никак нельзя догадаться, что на ней изображено. Точное сходство восстановленных и первичных волн, которые падали на голограмму при ее изготовлении, позволяют воспроизвести трехмерное изображение предмета. Если взглянуть на голограмму, освещенную лучом лазера, со стороны стрелки, то мы увидим натуральное трехмерное изображение. Причем это достигается без применения стереофотографии или каких-либо других дополнительных устройств.

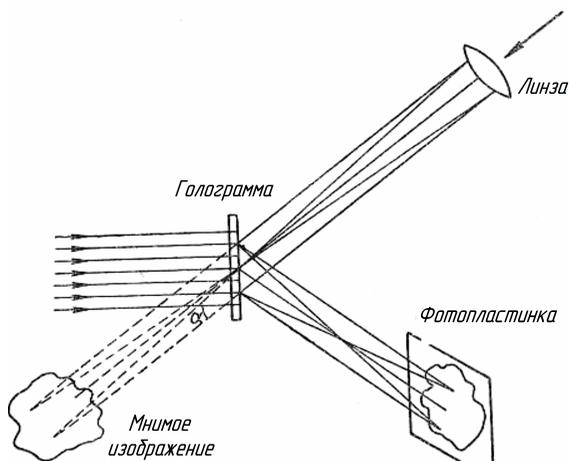


Рис. 2.10.2. Воспроизведение фотографируемого объекта

Восстановленное изображение обладает всеми особенностями объемности. При изменении своего положения наблюдатель увидит скрытые до этого детали предмета. Если один предмет заслонил другой, можно, меняя положение головы, заглянуть за заслонивший предмет.

Если фотопластинку с нанесенной на ней голограммой разбить, то каждый осколок способен воссоздать все изображение полностью. Это объясняется тем, что каждая точка голограммы воспринимает свет от всех точек предмета и поэтому в закодированной форме содержит всю

информацию о предмете. Правда, чем меньше осколок, тем хуже изображение.

Имеется еще одна интересная особенность голограммы. На одну голограмму, оказывается, можно нанести несколько изображений (до 150), причем эти изображения совершенно не мешают друг другу при их воспроизведении.

Голограммы с большим количеством изображений получают двумя способами. Можно расположить объекты в разных местах перед голограммой и одновременно освещать их одним опорным лучом. Это метод когерентного наложения, так как свет, рассеянный двумя объектами, когерентен и может интерферировать.

При другом методе предусматривается многократная экспозиция. Объекты экспонируются по очереди, каждый раз при этом необходимо менять либо положение объекта в пространстве, либо наклон опорного луча, либо поворачивать голограмму. Этот метод называется *некогерентным наложением*.

Эксперименты показали удовлетворительное качество воспроизводимых изображений как в первом, так и во втором случае. Если при воспроизведении применить расходящийся пучок света (в рассматриваемых нами случаях он был параллельным), то можно получить большое увеличение предмета без помощи линз. Освещая предмет тремя различными монохроматическими источниками, соответствующими трем основным цветам, можно получить цветное трехмерное (объемное) изображение.

Однако получением трехмерных изображений не исчерпываются возможности лазеров. Этот метод найдет применение в микроскопии с высокой разрешающей способностью, в объемных измерениях при помощи стереоскопических и интерферометрических методов, для записи, хранения, поиска и обработки данных оптическими методами, для создания объемных цветных кино и телевидения.

Совершенно очевидно, что в скором времени на основе сверхмощных и высокостабильных лазеров будет создан проектор трехмерного изображения для больших аудиторий. Объемное кино можно получить, если на киноленту нанести ряд последовательных голограмм, а затем просвечивать ее пучком когерентного света с одновременной подсветкой экрана.

Впервые такой кинофильм, снятый на стандартную 35-мм киноленту, был показан участникам ежегодной конференции по электронике в Станфордском университете в августе 1965 г.

В будущем, очевидно, удастся создать объемное телевидение. Правда, для этого нужно во много раз повысить разрешающую

способность телевизионной аппаратуры, что потребует увеличения частотной полосы для телевизионного канала в десятки раз. Но на помощь опять-таки придет лазер – он позволит создать каналы света с практически неограниченной полосой частот.

Сегодня современная техника еще не позволяет создать системы цветного объемного кино и телевидения, можно не сомневаться в том, что в недалеком будущем такие системы будут созданы.

Голографические принципы открывают возможность оптического хранения информации. Хранить информацию в отличие от существующих методов можно не в тонком слое, а в трехмерной среде. Экспериментальные проверки подтверждают огромную возможность этого принципа. Используя когерентные источники света, можно в малом объеме записать в виде интерференционных картин чрезвычайно большое количество сведений и затем воспроизвести их с относительно слабыми искажениями.

Опыты показали, что удельная емкость такой записи достигнет величины 10^{12} – 10^{13} дв. ед/см³. Это означает, что в каждом кубическом сантиметре кристалла можно поместить информацию, которую содержит библиотека из 5 млн. томов по 200 страниц каждый, если считать, что на каждой странице 1000 слов, состоящих из 7 букв!

2.11. Применение голографии

Как уже было указано, первоначальная задача голографии заключалась в получении объемного изображения. С развитием голографии на толстослойных пластинах возникла возможность создания объёмных цветных фотографий. На этой базе исследуются пути реализации голографического кино, телевидения и т.д.

Один из методов прикладной голографии, именуемый *голографической интерферометрией*, нашел очень широкое распространение. Суть метода в следующем. На одну фотопластинку последовательно регистрируются две интерференционные картины, соответствующие двум разным, но мало отличающимся состояниям объекта, например, при деформации. При просвечивании такой «двойной» голограммы образуются, очевидно, два изображения объекта, измененные относительно друг друга в той же мере, что и объект в двух его состояниях. Восстановленные волны, формирующие эти два изображения, когерентны, интерferируют, и на новом изображении наблюдаются интерференционные полосы, которые и характеризуют изменение состояния объекта.

В другом варианте голограмма изготавливается для какого-то

определенного состояния объекта. При просвечивании ее объект не удаляется и производится его повторное освещение, как на первом этапе голографирования. Тогда опять получается две волны, одна формирует голографическое изображение, а другая распространяется от самого объекта. Если теперь происходят какие-то изменения в состоянии объекта (в двух последовательных волнами возникает разность сравнении с тем, что было во время экспонирования голограммы), то между указанными хода, и изображение покрывается интерференционными полосами.

Описанный способ применяется для исследования деформаций предметов, их вибраций, поступательного движения и вращений, неоднородности прозрачных объектов и т.п.

Интересно применение голографии в качестве носителя информации. Часто необходимо получить объемное изображение предмета, которого еще не существует, и, следовательно, нельзя получить голограмму такого предмета оптическими методами. В этом случае голограмма рассчитывается на ЭВМ (цифровая голограмма) и результаты расчета соответствующим образом переносятся на фотопластинку. С полученной таким способом машинной голограммы объемное изображение предмета восстанавливается обычным оптическим способом. Поверхность предмета, полученного по машинной голограмме, используется как эталон, с которым методами голографической интерференции производится сравнение поверхности реального предмета, изготавливаемого соответствующими инструментами. Голографическая интерферометрия позволяет произвести сравнение поверхности изготовленного предмета и эталона с чрезвычайно большой точностью до долей длины волны. Это дает возможность изготавливать с такой же большой точностью очень сложные поверхности, которые было бы невозможно изготовить без применения цифровой голографии и методов голографической интерферометрии. Само собой разумеется, что для сравнения эталонной поверхности с изготавливаемой не обязательно восстанавливать оптическим способом машинную голограмму. Можно снять голограмму предмета, перевести ее на цифровой язык ЭВМ и сравнить с цифровой голограммой. Оба эти пути в принципе эквивалентны.

Особенности голограмм как носителей информации делают весьма перспективными разработки по созданию голографической памяти, которая характеризуется большим объемом, надежностью, быстротой считывания и т.д.

2.12. Классификация лазеров по степени опасности

По степени опасности лазеры в соответствии с СанПиН 5804–91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» разделяют на четыре класса: I – выходное излучение не представляет опасности для глаз и кожи; II – оно представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением; III – существует опасность облучения глаз прямым, зеркально отраженным и диффузно отраженным излучением на расстоянии 0,1 м от диффузно отражающей поверхности, а также опасность облучения кожи прямым и зеркально отраженным излучением; IV – выходное излучение представляет опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 0,1 м от диффузно отражающей поверхности.

Классификацию лазеров по степени опасности осуществляют на основе временных, энергетических и геометрических (точечный или протяженный источник) характеристик источника излучения и предельно допустимых уровней лазерного излучения.

В табл. 2.12.1 приведены опасные и вредные производственные факторы, подлежащие контролю в зависимости от класса лазерных установок.

Таблица 2.12.1

Опасные и вредные производственные факторы, возникающие при эксплуатации лазеров

Опасные и вредные производственные факторы	Класс лазера			
	1	2	3	4
Лазерное излучение:				
прямое зеркально отраженное	–	+	+	+
диффузно отраженное	–	–	+	+
Повышенная напряженность электрического поля	– (+)	+	+	+
Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны	–	–	– (+)	+
Повышенный уровень ультрафиолетовой радиации	–	–	– (+)	+
Повышенная яркость света	–	–	– (+)	+
Повышенные уровни шума и вибрации	–	–	– (+)	+
Повышенный уровень ионизирующих излучений	–	–	–	+
Повышенный уровень электромагнитных излучений ВЧ- и СВЧ-диапазонов	–	–	–	– (+)
Повышенный уровень инфракрасной радиации	–	–	– (+)	+
Повышенная температура поверхностей оборудования	–	–	– (+)	+
Химические опасные и вредные производственные	При работе с токсичными			

факторы	веществами
---------	------------

Примечание. Обозначение «+» имеют место всегда; «-» отсутствуют; «- (+)» наличие зависит от конкретных технических характеристик лазера и условий его эксплуатации. Диффузно отраженное лазерное излучение это излучение, отраженное от поверхности, соизмеримой с длиной волны по всевозможным направлениям в пределах полусферы. Зеркально отраженное – лазерное излучение, отраженное под углом равным углу падения излучения.

2.13. Гигиеническое нормирование лазерного излучения

Нормирование лазерного излучения (ЛИ) осуществляется по санитарным нормам и правилам устройства и эксплуатации лазеров – СанПиН 5804–91. Предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения установлены для двух условий облучения – однократного и хронического при облучении глаз и кожи.

ПДУ ($H_{\text{ПДУ}}$ и $E_{\text{ПДУ}}$) – уровни лазерного облучения, которые при ежедневной работе не вызывает у работающего заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследования в процессе работы или в отдельные сроки. ПДУ относятся к спектральному диапазону от 0,2 до 20 мкм и регламентируется на роговице, сетчатке и коже в зависимости от длины волны λ , мкм; длительности импульсов f , Гц; длительности воздействия Δt , с. В диапазоне 0,4–1,4 мкм ПДУ зависит от углового размера источника излучения θ , рад, или диаметра пятна засветки на сетчатке глаза d , см; диаметра зрачка глаза – d_3 , см. в диапазоне 0,4–0,75 мкм ПДУ зависит от фоновой освещенности роговицы E , лк.

Нормируются также энергия W (Дж) и мощность P (Вт) излучения, прошедшего через ограничивающие апертуры указанного выше диаметра. Ограничивающая апертура – круглая диафрагма, ограничивающая поверхность, по которой происходит усреднение.

В качестве ПДУ принимается энергетическая экспозиция H , под которой понимается отношение энергии излучения, падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади этого участка, единицей измерения которой является Дж/см²; облученность E , Вт/м². Облученность – это отношение потока излучения, падающего на малый участок поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого участка.

Для определения ПДУ ($H_{\text{ПДУ}}$ и $E_{\text{ПДУ}}$) при воздействии лазерного излучения на кожу усреднение производится по ограничивающей апертуре диаметром $1,1 \cdot 10^{-3}$ м (площадь апертуры $S_a = 10^{-6}$ м²). Для определения $H_{\text{ПДУ}}$ и $E_{\text{ПДУ}}$ при воздействии лазерного излучения на глаза в диапазонах 180–390 нм и 1400–1000000 нм усреднение

производиться также по апертуре (зрочка) диаметром $1,1 \cdot 10^{-3}$ м, в диапазоне 380–1400 нм – по апертуре диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м.

Формулы расчета значений предельно допустимых уровней лазерного излучения с учетом перечисленных характеристик приведены в таблице 2.13.1.

Таблица 2.13.1

Предельно допустимые уровни лазерного излучения

Длина волны, мкм	Длительность импульса, с	ПДУ, Дж·см ⁻²		Примечание
		Воздействие на		
		кожу	роговицу глаза	
1	2	3	4	5
0,2–0,4	Более 10 ⁻¹	$H_{уф} = f(\lambda)$		$H_{уф}$ – ПДУ энергетической экспозиции на роговице глаза и при облучении в течение рабочего дня
0,2–0,4	Менее 10 ⁻¹	$H_{уф}^{и} = \frac{H_{уф}}{ft}$		$H_{уф}^{и}$ – ПДУ импульсного облучения; f – частота повторения импульса, Гц; t – длительность воздействия, с
0,4–0,75	Более 10 ⁻¹	–	$H_{п} = H_1 K_1$	$H_{п}$ – ПДУ, не вызывающий первичных эффектов; H_1 – энергетическая экспозиция в зависимости от длительности воздействия и углового размера источника (см. табл. 2.13.3); K_1 – поправочный коэффициент (см. табл. 2.13.5)
0,4–0,75	То же	–	$H_{в} = 10^{-1} H_2 \Phi_0$	$H_{в}$ – ПДУ, не вызывающий вторичных эффектов; H_2 – энергетическая экспозиция в зависимости от длительности воздействия и углового размера источника (см. табл. 2.13.6); Φ_0 – фоновая освещенность, лк (см. табл. 2.13.4) В качестве ПДУ принимается наименьшее из значений НП и НВ
0,4–0,75	Менее 10 ⁻¹	–	$H_{п}^{и} = H_{п} K_2$	K_2 – коэффициент, учитывающий частоту повторений импульсов и длительность их воздействия (см. табл. 2.13.8)
0,4–0,75	То же	–	$H_{п}^{и} = \frac{H_{в}}{ft}$	В качестве ПДУ принимается наименьшее из значений НИП и НИВ

0,4–1,4	Более 10 ⁻¹	$H = f(r, \lambda)$	–	H – ПДУ; r – длительность импульса; λ – длина волны (см. табл. 2.13.7)
0,4–1,4	Менее 10 ⁻¹	$H = HK_2$	–	См. табл. 2.13.8

Окончание табл. 2.13.1

1	2	3	4	5
0,75–1,4	Более 10 ⁻¹	–	$H_{II} = H_1 K_1$	См. табл. 2.13.5
0,75–1,4	Менее 10 ⁻¹	–	$H_{II}^u = H_{II} K_2$	См. табл. 2.13.8
1,4–20	Более 10 ⁻¹	$H = f(r, \lambda)$		H – ПДУ в зависимости от длительности импульса r и длины волны λ
1,4–20	Менее 10 ⁻¹	$H^u = HK_3$		H^u – ПДУ импульсного облучения; K_3 – коэффициент, учитывающий повторения импульсов f и длительность воздействия t (см табл. 2.13.9)

Количественные значения характеристик и поправочных коэффициентов, используемых для расчета ПДУ, указаны в табл. 2.13.2–2.13.9.

Таблица 2.13.2

ПДУ энергетической экспозиции при обучении ультрафиолетовой областью спектра

Длина волны, мкм	0,200–0,210	0,210–0,215	0,215–0,290	0,290–0,300	0,300–0,370	Св. 0,370
ПДУ, Дж·см ⁻²	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.13.3

Энергетическая экспозиция H_1 на роговице глаза в зависимости от длительности воздействия τ и углового размера источника излучения α при максимальном диаметре зрачка глаза

τ, c	$\alpha, \text{рад}$			
	До 10 ⁻³ точный	10 ⁻³ –5·10 ⁻³	5·10 ⁻³ –10 ⁻²	10 ⁻² –5·10 ⁻²
10 ⁻⁹	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
10 ⁻⁷	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
10 ⁻⁵	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$
10 ⁻³	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
10 ⁻¹	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
1	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

10^{-2}	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
10^4	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
$3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$

Окончание табл. 2.13.3

τ, c	$\alpha, \text{рад}$			
	$5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1} - 1$	1-2,5
10^{-9}	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
10^{-7}	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
10^{-5}	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
10^{-1}	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$
1	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-1}$
10^2	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$9,8 \cdot 10^{-1}$	2,3
10^4	$3,0 \cdot 10^{-1}$	1,2	3,0	7,0
$3 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	1,6	4,0	1,2 \cdot 10

Таблица 2.13.4

Зависимость диаметра зрачка глаза d_z от фоновой освещенности роговицы глаза Φ_0 , измеряемой при работающем лазере

$\Phi_0, \text{лк}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
$d_z, \text{см}$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2

Таблица 2.13.5

Поправочный коэффициент K_1 на длину волны лазерного излучения и диаметр зрачка глаза d_z

$d_z, \text{см}$	$\lambda, \text{мкм}$						
	0,4-0,42	0,42-0,45	0,45-0,9	0,9-1,10	1,10-1,20	1,20-1,30	1,30-1,40
0,8	2,3	1,4	0,8	1,0	2,3	7,0	$2,3 \cdot 10^1$
0,7	3,0	1,8	1,0	1,3	3,0	9,1	$3,0 \cdot 10^1$
0,6	4,1	2,5	1,4	1,8	4,1	1,3	$4,1 \cdot 10^1$
0,5	6,0	3,6	2,1	2,6	6,0	$1,8 \cdot 10^1$	$6,0 \cdot 10^1$
0,4	9,2	5,6	3,2	4,0	9,2	$2,8 \cdot 10^1$	$9,2 \cdot 10^1$
0,3	$1,6 \cdot 10^1$	9,9	5,7	7,1	$1,6 \cdot 10^1$	$5,0 \cdot 10^1$	$1,6 \cdot 10^1$
0,2	$3,7 \cdot 10^1$	$2,2 \cdot 10^1$	$1,3 \cdot 10^1$	$1,6 \cdot 10^1$	$4,7 \cdot 10^1$	$1,1 \cdot 10^1$	$3,7 \cdot 10^1$

Устройство лазеров IV класса позволяет исключить возможность присутствия персонала в лазерно-опасной зоне, т.е. в зоне, в пределах которой уровень лазерного излучения превышает предельно допустимый. Для этого все системы наблюдения изготавливаются из материалов, снижающих интенсивность излучения до ПДУ. Предусмотрены возможности дистанционного управления и используется ключевой тумблер.

Таблица 2.13.6

**Энергетическая экспозиция H_2 на роговице глаза
в зависимости от длины волны излучения и диаметра зрачка**

d_3 , см	λ , мкм						
	0,4–0,44	0,44–0,48	0,48–0,62	0,62–0,67	0,67–0,71	0,71–0,73	0,73–0,75
0,8	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	2,6
0,7	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-1}$	3,4
0,6	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	1,1	4,7
0,5	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-2}$	1,6	6,8
0,4	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	2,5	$1,6 \cdot 10^1$
0,3	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	4,4	$1,8 \cdot 10^1$
0,2	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-1}$	9,9	$4,2 \cdot 10^1$

Таблица 2.13.7

**Значения ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза
при лазерном излучении с длиной волны свыше 1,4 мкм и кожи
при излучении с длиной волны свыше 0,4 мкм в зависимости
от длины волны λ и длительности импульса t**

t , с	λ , мкм				
	от 0,4 до 0,73	св. 0,73 до 2,4	св. 2,4 до 5,6	св. 5,6 до 9,3	св. 9,3 до 20
10^{-9}	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
10^{-8}	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$
10^{-7}	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
10^{-6}	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
10^{-5}	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
10^{-4}	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
10^{-3}	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	$1 \cdot 10^0$	$5 \cdot 10^0$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
10^{-1}	$4 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$
10^0	10^1	$6 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^0$	$6 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
10^1	$4 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^0$	$8 \cdot 10^{-1}$
10^2	$2 \cdot 10^2$	10^3	10^2	10^1	$4 \cdot 10^0$
10^3	$8 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$
10^4	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^1$
$3 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$

Лазерные установки III–IV класса, генерирующие излучение видимого спектра, и лазеры II–IV класса, работающие в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах, снабжаются сигнализаторами начала и окончания работы. В конструкции этих же лазеров предусмотрены экран для кратковременного перекрытия прямого лазерного излучения и для ограничения его распространения за пределы зоны размещения обрабатываемого материала. Экран

изготавливается из огнестойкого, неплавящегося и светопоглощающего материала.

Таблица 2.13.8

Поправочный коэффициент K_2 на частоту повторения импульсов f и длительность воздействия серии импульсов t

t, с	Частота f , Гц					
	до 10	св.10 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 250	св. 250 до 500	св. 500 до 1000
10^{-1}	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
1	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
10^1	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
10^2	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
103	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
10^4	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
$3 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.13.9

Поправочный коэффициент K_3 на частоту повторения импульсов f и длительность воздействия серии импульсов t

t, с	Частота f , Гц					
	до 10	св. 10 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 250	св. 250 до 500	св. 500 до 1000
10^{-1}	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
1	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
10^1	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
10^2	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
103	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10^4	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
$3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Лазеры IV класса размещают в отдельных помещениях. Отделка внутренних поверхностей стен, потолка и оборудования производится из расчета максимального поглощения излучения и исключения его зеркального отражения (матовая поверхность). При выделении вредных веществ в воздух рабочей зоны (в результате лазерной обработки мишени) рабочее помещение оборудуется с учетом класса опасности выделяемых вредных веществ. Входные двери помещений для лазеров III–IV класса оборудуются внутренними замками, знаком лазерной опасности (рис. 2.13.1) и табло «Посторонним вход воспрещен».



Рис. 2.13.1. Предупредительный знак – знак лазерной опасности

В технологических процессах, как правило, используются установки с экранированным пучком лазерного излучения (закрытого типа). При этом не допускается в помещениях для лазеров IV класса производить работы, не предусмотренные инструкцией по эксплуатации.

Подбор лазеров для технологических операций производится, исходя из минимального уровня излучения, обеспечивающего требуемый технологический режим. При расстановке лазерного оборудования предусматриваются места для средств защиты, съемных принадлежностей к установке и переносной измерительной аппаратуры; кроме того, определяется зона возможного распространения лазерного излучения. Расстановка лазеров II–IV класса производится с учетом нормативов однорядном размещении лазеров и 2 м – при двухрядном. С задней и боковых сторон должно быть обеспечено пространство шириной не менее 1 м.

Лазеры II–III класса снабжаются экранами для отражения от лазерно опасной зоны или для экранирования пучка излучения. Материалы для экранов имеют низкий коэффициент отражения на длине волны генерации лазера, огнестойки и не выделяют токсичных веществ при лазерном облучении.

Рабочие места оборудуются местной вытяжной вентиляцией для локализации и удаления загрязненного воздуха.

Эксплуатация лазеров II–IV класса разрешается после приемочных испытаний комиссией, назначенной администрацией учреждения, в присутствии представителя Госсаннадзора. Разрешение на ввод лазерной установки в эксплуатацию оформляется актом. В процессе испытаний комиссия знакомится со следующей документацией: паспортом лазера; планом установки лазера и оборудования (лазеры II–IV класса); инструкцией по эксплуатации и технике безопасности (лазеры II–IV класса); протоколом наладки лазера; инструкцией противопожарной и взрывобезопасности (лазеры IV класса и при использовании в технологическом процессе огнеопасных и взрывоопасных веществ); протоколом измерения уровней лазерного

излучения на рабочих местах (лазеры II–IV класса); протоколом измерения опасных и вредных факторов (ионизирующего излучения, шума, электромагнитных излучений и др.).

Перечень сопутствующих опасных и вредных факторов определяется с учетом конструкции лазера и особенностей технологического процесса. Аналогичная работа производится при изменении технических параметров лазера, приводящих к изменению его класса.

К обслуживанию лазеров допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие противопоказаний по медицинским показаниям. Персонал, допускаемый к работе с лазерами, проходит инструктаж и обучение безопасным методам работ. Лица, занятые на монтаже, наладке и ремонте лазерной установки (кроме указанного обучения), имеют соответствующую «ПТЭ и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей» квалификационную группу по технике безопасности. В процессе эксплуатации на администрацию возложены обязанности контроля за безопасным ведением работ, а также за предотвращением использования персоналом запрещенных приемов работ, к которым относятся: визуальная юстировка лазеров II–IV класса без средств защиты глаз и кожи; визуальный контроль попадания луча в мишень в момент генерации излучения (лазеры III–IV класса); направление излучения на человека; обслуживание лазеров одним человеком (лазеры III–IV класса); присутствие в зоне наблюдения лиц, не связанных с настройкой, испытанием и эксплуатацией лазеров; отключение блокировки и сигнализации во время работы лазера и зарядки конденсаторных батарей; наблюдение без средств защиты глаз (лазеры II–IV класса).

2.14. Воздействие лазерного излучения на человека

Биологическое действие лазерного излучения зависит от длины волны лазерного излучения, времени облучения, длительности импульса, частоты повторения импульса, площади облучаемого участка, аналитических и функциональных особенностей облучаемых тканей (рис. 2.14.1).

Основные энергетические характеристики лазерного излучения приведены в табл. 2.14.1.

Основным фактором, определяющим эффект биологического воздействия является его интенсивность. Под интенсивностью лазерного излучения понимаются высокие значения величин, описывающих энергетические параметры излучения.

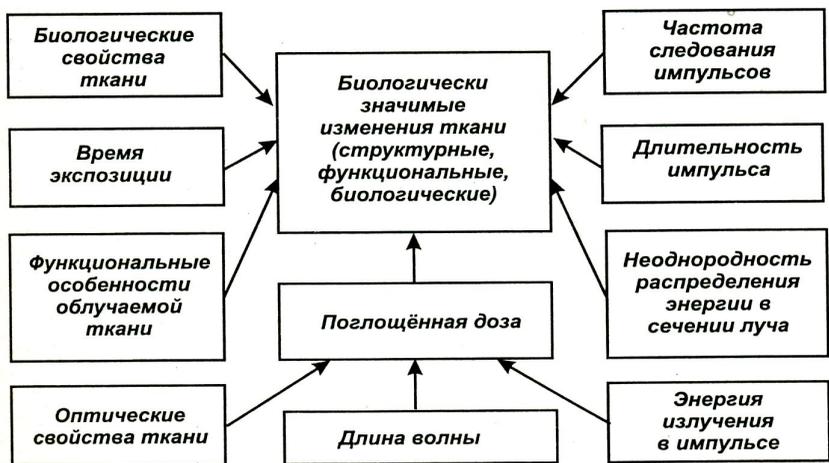


Рис. 2.14.1. Факторы, определяющие биологическое действие лазерного излучения

Таблица 2.14.1

Энергетические характеристики излучения

Характеризуемый объект	Показатель	Обозначение	Единицы измерения
Пучок лазерного излучения	Энергия лазерного излучения	E	Дж
	Энергия импульса лазерного излучения	E_H	Дж
	Мощность лазерного излучения	P	Вт
	Плотность энергии (мощность) лазерного излучения	W_e, W_p	Дж/см ² (Вт/см ²)
Поле излучения	Поток излучения	Φ, F, P	Вт
	Поверхностная плотность потока излучения	E_3	Вт/м ²
	Интенсивность излучения	I, S	Вт/м ²
Источник излучения	Излучательная способность	R_3	Вт/м ²
	Энергетическая сила излучения	I_3	Вт/ср
	Энергетическая яркость	L_3	Вт/м ² ·ср
Приемник излучения	Облученность (энергетическая освещенность)	E_e	Вт/м ²
	Энергетическое количество освещения	H_e	Дж/м ²

Различают термическое, нетермическое, акустическое воздействие переходных эффектов и общее действие излучения.

Термическое действие излучений лазеров непрерывного действия имеет много общего с обычным нагревом. На коже возникает ожог, а при энергии свыше 100 Дж сразу образуется кратерообразный участок некроза из-за разрушения и испарения биоткани.

У лазеров, работающих в импульсном режиме, имеются некоторые особенности. При действии импульсного лазерного излучения (длительность импульса менее 10^{-3} с) в облучаемых тканях происходит быстрый нагрев, мгновенное вскипание жидкости (плазмо- и парообразование), вследствие этого происходит резкое повышение давления, возникновение ударной волны и, в конечном счете – механическое повреждение тканей. Отличительной чертой лазерного ожога является резкая ограниченность пораженной области.

Нетермическое действие в основном обусловлено процессами, возникающими в результате избирательного поглощения тканями электромагнитной энергии, а также электрическим и фотохимическим эффектами. Лица, длительно работающие с лазерами, жалуются на повышенную общую утомляемость, головные боли, повышенную возбудимость, нарушение сна и т.п. местное действие может выражаться в поражении различных отделов глаз, кожи. Глаз человека различает свет в видимой части спектра от длины волны 0,4 мкм до 0,76 мкм. Оптические среды глаза пропускают излучения в более широких пределах спектра – от 0,4 до 1,4 мкм. Особенно хорошо проходят через оптические среды глаза излучения с длиной волны от 0,4 до 0,9 мкм. Излучения наиболее широко распространенных рубинового, неодимового и гелий-неонового проходят почти без потерь через оптические среды глаза и практически полностью достигают его наиболее чувствительной части – сетчатой оболочки, которая является особенно важной в обеспечении функции зрения. Повреждение глаз может возникнуть не только от попадания луча прямого лазера, но и от отраженного, даже если отражающая поверхность не является зеркальной. Характер поражения зависит от длины волны. В ультрафиолетовой области, прежде всего, возникает разрушение белка роговой оболочки и ожог слизистой оболочки. При больших плотностях энергии это ведет к полной необратимой слепоте. В видимой области излучение воздействует главным образом на светочувствительные клетки сетчатки, вызывая или временную слепоту, или ожог с последующей потерей зрения в данной области зрительного пространства. В ближней и средней инфракрасных областях (свыше 0,75 до 1,4 мкм) при больших плотностях энергии также возможна обратимая слепота из-за помутнения хрусталика. Лазерное излучение может вызвать повреждения кожи. Степень

воздействия определяется как параметрами излучения лазера, так и пигментацией кожи, состояния кровообращения. Пигментированная кожа значительно больше поглощает лазерных лучей, чем светлая кожа. Однако отсутствие пигментации способствует более глубокому проникновению лучей лазера в кожу и под кожу вследствие чего поражения могут носить более выраженный характер. Повреждение кожи напоминают термический ожог, который имеет четкие границы, окруженные небольшой зоной покраснения.

Акустические переходные эффекты, связанные с длительностью импульса, могут произойти в короткий срок импульсов (до 1 мс) в зависимости от конкретной длины волны лазера. Акустическое воздействие переходных эффектов плохо изучено, но оно может вызвать повреждение сетчатки, которая отлична от термической травмы сетчатки.

Потенциальные места повреждения глаза (рис. 2.14.2) напрямую связаны с длиной волны лазерного излучения.

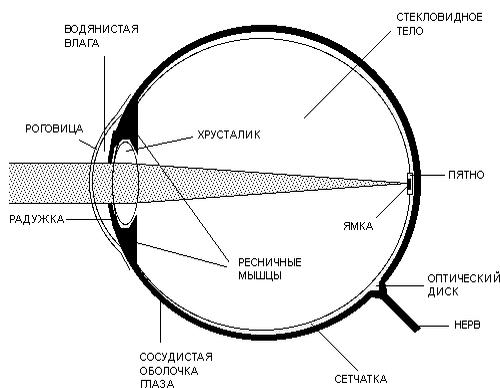


Рис. 2.14.2. Потенциальный вред глазу

Воздействие лазерного излучения на глаз:

- длины волн короче 300 нм или более 1400 нм, воздействуют на роговицу
- длины волн между 300 и 400 нм, воздействуют на воднистую влагу, радужную оболочку глаза, хрусталик и стекловидное тело.
- длины волн от 400 нм и 1400 нм, направлены на сетчатку.

Общее действие излучения лазера на организм работающего также связано с параметрами лазерного излучения. При этом возможны функциональные расстройства в деятельности центральной нервной системы и сердечнососудистой, невроты астенического типа,

патология вегетативно-сосудистой системы в виде вегетативно-сосудистых дисфункций и астеновегетативных синдромов.

Кроме лазерного излучения (прямого, рассеянного и отраженного) работающих в зависимости от конструкции лазера и условий его эксплуатации могут возникать и другие опасные и вредные производственные факторы, связанные с работой лазера, таких как световое излучение от импульсных ламп «накачки» и зоны взаимодействия лазерного излучения с материалом мишени; ультрафиолетовое излучения от ламп накачки или кварцевых и газоразрядных трубок; шум и вибрация, возникающие при работе лазера; ионизирующее излучение; высокое напряжение в электрической цепи питания ламп накачки, поджога, или газового разряда; электромагнитные поля ВЧ – и СВЧ – диапазонов от генераторов накачки; инфракрасные излучения и тепловыделения от оборудования и нагретых поверхностей; запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны продуктами взаимодействия лазерного луча с мишенью и радиолиза воздуха; агрессивные и токсические вещества, используемые в конструкции лазера (см. табл. 2.12.1).

2.15. Защита от лазерного излучения

При работе с оптическими квантовыми генераторами (ОКГ) должны быть приняты те или иные меры для обеспечения лазерной безопасности, зависящие от класса лазера.

Под *лазерной безопасностью* понимается совокупность технических, санитарно-гигиенических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасные условия труда персонала при использовании лазеров.

Назначение технических средств защиты является снижение уровней лазерного излучения, действующего на человека до величины ниже ПДУ. Вместе с тем они не должны уменьшать эффективность технологического процесса и работоспособность человека. Они классифицируются на средства коллективной и индивидуальной защиты.

К средствам *коллективной защиты* относятся:

- оградительные устройства (экраны, щиты, смотровые окна, световоды, перегородки, камеры, кожухи, козырьки, бленды и др.), подразделяемые по принципу и степени ослабления;
- предохранительные устройства;
- устройства автоматического контроля и сигнализации;

– устройство дистанционного управления.

Наиболее эффективным методом защиты является экранирование. Луч передается к мишени по волноводу (световоду) или по огражденному экраном пространству.

Для снижения уровня отраженного излучения линзы, призмы и другие твердые с зеркальной поверхностью предметы на пути луча снабжаются блендами, а от облученного объекта устанавливаются защитные экраны диафрагмы с отверстием, диаметр которого несколько превышает диаметр луча (рис. 2.15.1). В этом случае через отверстие проходит только прямое излучение, отраженные излучения от объекта попадают на экран, который его частично поглощает и рассеивает.

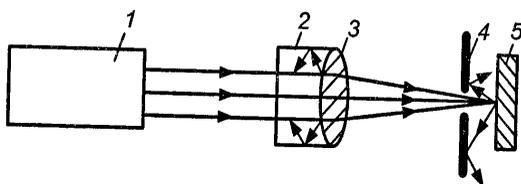


Рис. 2.15.1. Схема экранирования отраженного излучения лазера блендами и диафрагмами:

1 – лазер; 2 – бленда; 3 – линза; 4 – диафрагма; 5 – мишень

Непрозрачные экраны или ограждения, препятствующие выходу лазерного излучения, изготавливаются из металлических листов (стальных, дюралюминиевых и др.), гитенакса, пластика, текстолита, пластмасс.

Прозрачные экраны изготавливаются из специальных стекол светофильтров или неорганического стекла с соответствующей спектральной характеристикой.

К средствам *индивидуальной защиты* от воздействия лазерного излучения, используемым только в комплексе со средствами коллективной защиты, относятся защитные очки и маски со светофильтрами. Светофильтры обеспечивают снижение уровней облучения до нормативных требований. Их выбор в каждом отдельном случае осуществляется с учетом длины волны генерируемого излучения (табл. 2.15.1).

Защитные очки от лазерного излучения, выпускаемые промышленностью, представлены в табл. 2.15.2.

Когда лазерное излучение представляет опасность не только для глаз, но и для кожи лица, следует применять защитные лицевые щитки.

Таблица 2.15.1

Марки стекол для СИЗ от лазерного излучения

Нормативный документ	Марки стекол при длине волны, мкм						
	0,48–0,51	0,53	0,69	0,84	1,06	1,54	10,6
ГОСТ 9411–81*Е	ОС-12 ОС-13 ОС-23-1	ОС-12 ОС-13 ОС-23-1	СЗС-21 СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22 СЗС-24	СЗС-24 СЗС-25 СЗС-26	БС-15

Примечание: ОС – оранжевое стекло; СЗС – сине-зеленое стекло; БС – бесцветное стекло.

Таблица 2.15.2

Защитные очки от лазерного излучения

Марка очков	Марка светофильтра	Диапазон защиты, нм	Оптическая плотность
ЗН22-72-СЭС 22	СЭС 22	630–680	3
		680–1200	6
		1200–1400	3
ЗНД4-72-СЭС22-ОС23-1	СЭС 22	630–680	3
		680–1200	6
		1200–1400	3
	ОС23-1	400–530	6
ЗН62-Л17	Л17	600–1100	2
		530	1
ЗН62-ОЖ	ОЖ	200–510	3

Индивидуальные средства защиты применяются в тех случаях, когда коллективные средства защиты не обеспечивают безопасность.

Средства защиты от лазерного излучения в зависимости от класса опасности лазера приведены в табл. 2.15.3.

На открытых площадках, где размещены лазерные установки обозначаются опасные зоны, устанавливаются экраны, предотвращающие распространение излучений за пределы площадки.

Расчет границ лазерно-опасной зоны. Достаточно надежным и простым методом определения границы лазерно-опасной зоны может быть расчет плотности потока излучения (облученности) в различных точках пространства вокруг лазерных установок. При проведении такого расчета необходимо знать выходные характеристики лазерного излучения и коэффициент отражения (альбедо) излучения от мишени ρ . Наиболее

важными характеристиками лазерного излучения, определяющими его воздействие на биологические объекты, являются: длина волны, диаметр и расходимость пучка, длительность и частота повторения импульсов, энергия (мощность) излучения. Как правило, эти параметры известны из паспортных данных лазерной установки с достаточной точностью.

Таблица 2.15.3

Средства защиты от лазерного излучения

Средства защиты	Класс опасности лазера				Примечание
	1	2	3	4	
Оградительные устройства (кожухи, экраны и т.д.)	-	- (+)	+	+	Должны снижать уровни опасных и вредных производственных факторов до безопасных значений
Дистанционное управление	-	-	+	+	Применяется во всех возможных случаях
Устройства сигнализации	-	-	+	+	Для лазеров видимого диапазона спектра
	-	- (+)	+	+	Для лазеров УФ диапазона спектра
	-	-	-	+	Для лазеров ИК диапазона спектра
Маркировка знаком лазерной опасности	-	+	+	+	Лазеры, зона прохождения луча, граница ЛОЗ
Кодовый замок	-	-	+	+	На дверях помещений, пульте управления
Защитные очки, снижающие уровень диффузионного излучения на роговице глаза до ПДУ	-	+	+	+	При времени воздействия больше 0, 2, 5 с
	-	-	+	+	Всегда, когда средства коллективной защиты не обеспечивают безопасных условий труда
Защитная одежда	-	-	-	+	При соответствующей опасности
Юстировочные очки, снижающие уровень коллимированного излучения на роговице до ПДУ	-	+	+	+	Ограничено – при выполнении юстировки, наладки и ремонтно-профилактических работах

Примечание. ЛОЗ (лазерно-опасная зона) – часть пространства, в пределах которого уровень лазерного излучения превышает ПДУ. Юстировка лазера – это совокупность операций по регулировке оптических элементов лазерного изделия для получения требуемых пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

При определении границ лазерно-опасной зоны исходят из предположения, что воздействие на человека прямых и зеркально отраженных лучей исключено конструкцией установки. Расчет лазерно-опасной зоны начинают с определения границ зоны R_1 , внутри которой источник излучения (отражающая поверхность) является для глаза протяженным. Отражающая поверхность будет протяженным источником в том случае, если она видна под углом большим или равным α_{\min} . Угол α_{\min} определяется из условия, когда поверхность с энергетической яркостью, равной ПДУ для диффузно отраженного излучения, создает на роговице глаза энергетическую освещенность, соответствующую ПДУ для коллимированного излучения, т.е.

$$\alpha_{\min} = \sqrt{\frac{4E'_0 \cos \theta}{\pi L_e}}, \quad (2.15.1)$$

где θ – угол между направлением визирования и нормалью к поверхности.

Значения α_{\min} для различных длительностей экспозиций приведены в табл. 2.15.4.

Таблица 2.15.4

Предельный угол видения протяженного источника

Длительность экспозиции, с	α_{\min} , рад	Длительность экспозиции, с	α_{\min} , рад	Длительность экспозиции, с	α_{\min} , рад
10^{-9}	8,0	10^{-4}	2,2	10^1	24
10^{-8}	5,4	10^{-3}	3,6	10^2	24
10^{-7}	3,7	10^{-2}	5,7	10^3	24
10^{-6}	2,5	10^{-1}	9,2	10^4	24
10^{-5}	1,7	10^0	15		

Угол видения отражающей поверхности α вычисляется по формуле:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{4S_q \cos^2 \theta}{\pi R^2}}, \quad (2.15.2)$$

где S_q – площадь пятна на отражающей поверхности; R – расстояние от поверхности до наблюдателя.

Подставив в формулу (2.15.1) выражение для α_{\min} (2.15.2), определим значение R_1 :

$$R_1 = \sqrt{\frac{L'_e}{E'_3} S_q \cos \theta}, \quad (2.15.3)$$

где E'_3 – энергетическая освещенность на роговице глаза, равная ПДУ для коллимированного излучения; L'_e – энергетическая яркость поверхности, равная ПДУ для диффузионно-отраженного излучения.

Граница лазерно-опасной зоны определяется в каждом конкретном случае по следующей схеме:

1) рассчитывается угол видения отражающей поверхности по формуле (2.15.2);

2) полученное по формуле (2.15.2) значение угла α сравнивается с предельным углом видения протяженного источника α_{\min} , при этом могут возникнуть две ситуации:

а) угол видения отражающей поверхности меньше α_{\min} (точечный источник); в этом случае граница лазерно-опасной зоны вычисляется по формуле:

$$R_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{L_e S_q \cos \theta}{E'_3}}; \quad (2.15.4)$$

б) угол видения отражающей поверхности больше α_{\min} (протяженный источник). В этом случае повреждение органов зрения определяется энергетической яркостью отражающей поверхности L_e . Если энергетическая яркость диффузно отражающей поверхности меньше ПДУ, то источник является безопасным. Если энергетическая яркость равна ПДУ, то граница лазерно-опасной зоны совпадает с границей зоны I (рис. 2.15.2), вычисляемой по формуле (2.15.3). И наконец, если энергетическая яркость превышает ПДУ, то граница лазерно-опасной зоны вычисляется по формуле (2.15.4).

Лазерное излучение может представлять опасность и для кожи. В этом случае опасность лазерного излучения определяется величиной облученности кожных покровов и не зависит от геометрических размеров источников излучения. Граница зоны, внутри которой необходимо использовать средства защиты кожи, вычисляется по формуле (2.15.4), в которую необходимо вместо ПДУ для глаз подставить значение ПДУ для кожи.

Расчет лазерно-опасной зоны при длине волны излучения, находящейся вне интервала 0,4–1,4 мкм, проводится по формуле (2.15.4) независимо от геометрических размеров источника излучения.

Расчетный метод оценки границ лазерно-опасной зоны является ориентировочным (рис. 2.15.2), так как он требует знаний энергетических характеристик лазерного излучения, коэффициента отражения излучения, закона отражения и не учитывает дополнительно отраженного от различных предметов (оптических элементов и т.п.) излучения. Более точным является экспериментальный метод, позволяющей по Результатам измерений строить истинную картину поля излучения вокруг лазерных установок.

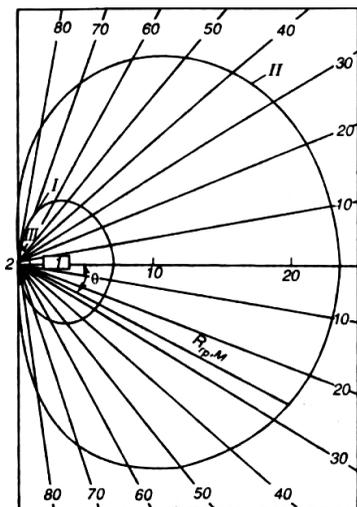


Рис. 2.15.2. Схема к расчету лазерно-опасной зоны:

I – граница зоны *I*; *II* – граница лазерно-опасной зоны; *III* – граница зоны, внутри которой излучение представляет опасность для кожи; *1* – лазер; *2* – мишень

2.16. Приборы для контроля лазерного излучения

Для контроля лазерного излучения и определения границ опасной зоны в условиях производства применяют ряд приборов. В зависимости от типа приемника излучения приборы разделяют на калориметрические, фотоэлектрические, фотохимические, механические и др. Наибольшее распространение получили первые два вида приборов. Калориметрический метод основан на поглощении энергии излучения приемником прибора и превращении ее в тепловую энергию. Однако этот метод не точен вследствие наложения на показания колебаний температуры внешней среды. При фотоэлектрическом методе измерений происходит преобразование энергии излучения в электрическую энергию. Этот метод позволяет достичь высокой чувствительности и поэтому в настоящее время является основным при дозиметрии лазерного излучения. На этом

принципе основаны приборы «Измеритель-1», ИЛД-2. Прибор «Измеритель-1» предназначен для измерения службами охраны труда непосредственно на рабочих местах плотностей мощности и энергии отраженного лазерного излучения с длинами волн 0,53; 0,63; 0,69 и 1,069 мкм. Прибор ИЛД-2 измеряет энергетические характеристики направленного или отраженного лазерного излучения с длиной волны 0,49–1,15 и 2–11 мкм в заданной точке пространства. Величину лазерного излучения определяют на рабочих местах на уровне глаз работающего и открытых частей его тела.

По результатам измерений строится диаграмма направленности уровней плотности отраженной энергии, что дает возможность оценить опасность и разработать комплекс защитных мероприятий.

Для измерения энергетической экспозиции и облученности рассеянного и отраженного лазерного излучения с целью определения опасности для организма человека предназначен дозиметр ЛД-4. Базовая модель предназначена для измерений излучений следующих типов лазеров: гелий неоновых, рубиновых, полупроводниковых, неодимовых, CO₂. По дополнительному заказу прибор может быть оснащен опциями измерения в других спектральных диапазонах.

Дозиметр

ЛД-4Э (рис. 2.16.1) может быть также использован в качестве средства поверки лазерных дозиметров других типов. Диапазоны измерений лазерных дозиметров позволяют осуществлять дозиметрический контроль лазерного излучения в соответствии с нормативами по лазерной безопасности, установленными стандартом МЭК 825-1-93 и санитарными нормами и правилами СанПиН 5804-91. Дозиметры имеют автономное электропитание, просты и надежны в эксплуатации, имеют малые габариты и массу.



Рис. 2.16.1. Лд-4, Лд-4Э дозиметр лазерного излучения

Различают две формы дозиметрического контроля: предупредительный (оперативный) и индивидуальный.

Предупредительный дозиметрический контроль заключается в определении максимальных уровней энергетических параметров лазерного излучения на границе рабочей зоны.

На рис. 2.16.2 показана типовая схема лазерной установки. Максимальный уровень энергетической экспозиции ($\text{Дж}/\text{см}^2$) отраженного от мишени лазерного излучения на границе рабочей зоны можно оценить по формуле:

$$H = \frac{0,122W_{\text{и}}}{L^2},$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия импульса излучения, Дж; L – кратчайшее расстояние от мишени до границы рабочей зоны, см.

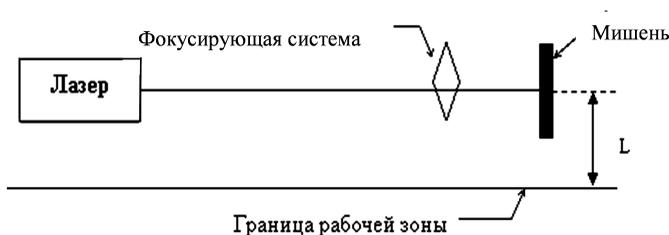


Рис. 2.16.2. Типовая схема лазерной установки

Предупредительный контроль проводится в соответствии с регламентом, утвержденным администрацией предприятия, но не реже одного раза в год в порядке текущего санитарного надзора, а также в следующих случаях:

- при приемке в эксплуатацию новых лазерных изделий II–IV классов;
- при внесении изменений в конструкцию действующих лазерных изделий;
- при изменении конструкции средств коллективной защиты;
- при проведении экспериментальных и наладочных работ;
- при аттестации рабочих мест;
- при организации новых рабочих мест.

Предупредительный дозиметрический контроль проводят при работе лазера в режиме максимальной отдачи мощности (энергии), определенной в паспорте на изделие и конкретными условиями эксплуатации.

Индивидуальный дозиметрический контроль заключается в измерении уровней энергетических параметров излучения,

воздействующего на глаза (кожу) конкретного работающего в течение рабочего дня.

Индивидуальный дозиметрический контроль проводят при работе на открытых лазерных установках (экспериментальные стенды), а также в тех случаях, когда не исключено случайное воздействие лазерного излучения на глаза или кожу.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

3.1. Общая характеристика электромагнитных полей

В современных условиях научно-технического прогресса в результате развития различных видов энергетики и промышленности электромагнитные излучения (ЭМИ) занимают одно из ведущих мест по своей экологической и производственной значимости среди других факторов окружающей среды.

В целом общий электромагнитный фон состоит из источников естественного (электрические и магнитные поля Земли, радиоизлучения Солнца и галактик) и искусственного (антропогенного) происхождения (телевизионные и радиостанции, линии электропередач, электробытовая техника и т.д.) излучений. Уровень естественного электромагнитного фона в некоторых случаях бывает на несколько порядков ниже уровней электромагнитных излучений, создаваемых антропогенными источниками. Электромагнитные излучения космического, околоземного и биосферного пространств играют определенную роль в организации жизненных процессов на Земле, и в ряде случаев выявляется их биологическая значимость.

Электромагнитное поле (ЭМП) – это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Оно характеризуется взаимосвязанными переменными электрического поля и магнитного поля. 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, электромагнитное поле распространяется от точки к точке пространства в виде

электромагнитных волн (ЭМВ), бегущих от источника. Благодаря конечности скорости распространения электромагнитное поле может существовать автономно от породившего его источника и не исчезает с устранением источника (например, радиоволны не исчезают с прекращением тока в излучившей их антенне).

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

Электромагнитные волны представляют собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды (рис. 3.1.1). Существование электромагнитных волн предсказано английским физиком М. Фарадеем в 1832 г. Другой английский ученый, Дж. Максвелл, в 1865 г. теоретически показал, что электромагнитные колебания не остаются локализованными в пространстве, а распространяются во все стороны от источника. Теория Максвелла позволила единым образом подойти к описанию радиоволн, оптического излучения, рентгеновского излучения, гамма-излучения. Оказалось, что все эти виды излучения – электромагнитные волны с различной длиной волны λ , т.е. родственны по своей природе. Каждое из них имеет свое определенное место в единой шкале электромагнитных волн (рис. 3.1.2).

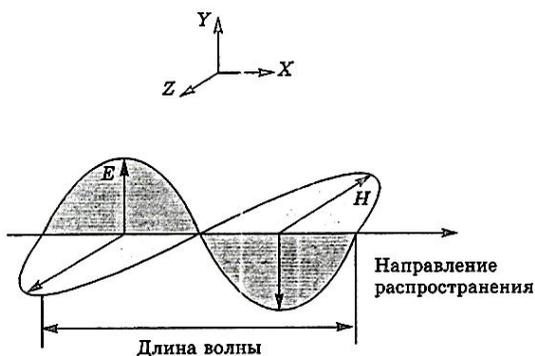


Рис. 3.1.1. Электромагнитные волны

Распространяясь в средах, электромагнитные волны, 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.

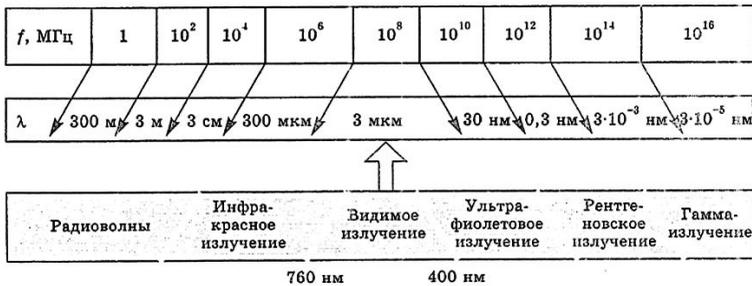


Рис. 3.1.2. Шкала электромагнитных волн

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

Основными параметрами ЭМВ являются длина волны (λ), частота (f), напряженность магнитного поля (H), напряженность электрического поля (E), скорость распространения ЭМВ (c) и вектор плотности потока энергии (ППЭ) (S).

Длина волны и частота колебаний связаны соотношением:

$$f = c / \lambda,$$

где c – скорость распространения ЭМВ в вакууме (воздухе), $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Частоты колебаний ЭМВ измеряются в герцах (Гц): 1 килогерц (кГц) = 10^3 Гц, 1 мегагерц (МГц) = 10^6 Гц, 1 гигагерц (ГГц) = 10^9 Гц. Частота f – количество полных изменений магнитно и электрического полей за секунду, выражается в герцах (Гц). Длина волны λ – это расстояние между двумя последовательными гребнями или впадинами волны (максимумами или минимумами), измеряется в метрах (м). Напряженность электрического (E) и магнитного (H) поля при частотах ниже 300 МГц определяется соответственно в вольтах на метр (В/м) (или киловольтах на метр (кВ/м): $1 \text{ кВ/м} = 10^3 \text{ В/м}$) и амперах на метр (А/м); магнитное поле часто выражается в терминах магнитной индукции (В), единицей измерения – тесла (Тл). $1 \text{ Тл} = 7,965 \text{ А/м}$; $1 \text{ А/м} = 1,256^{-1} \text{ Тл}$. Внесистемная единица магнитной индукции – гаусс (Гс): $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$. При частотах выше 300 МГц ЭМП оценивается плотностью потока энергии (ППЭ) выражается в ваттах на квадратный метр (Вт/м^2). Классификация электромагнитных полей приведена в табл. 3.1.1 и 3.1.2.

Таблица 3.1.1

Классификация электромагнитных излучений по частоте

Частотный диапазон	Частота	Наименование частот		
		Международное	Принятое в гигиенической практике	
–	3 Гц и менее	нет	ИЗЧ (инфразвуковая частота)	
1	3–30 Гц	КНЧ (крайне низкая частота)	ЗЧ (звуковая частота)	
2	30–300 Гц	СНЧ (сверхнизкая частота)		
3	0,3–3 кГц	ИНЧ (инфра-низкая частота)		
4	3–30 кГц	ОНЧ (очень низкая частота)		
5	30–300 кГц	НЧ (низкая частота)		ВЧ (высокая частота)
6	0,3–3 МГц	СЧ (средняя частота)		
7	3–30 МГц	ВЧ (высокая частота)		
8	30–300 МГц	ОВЧ (очень высокая частота)	УВЧ (ультравысокая частота)	
9	0,3–3 ГГц	УВЧ (ультравысокая частота)	СВЧ (сверхвысокая частота)	
10	3–30 ГГц	СВЧ (сверхвысокая частота)		
11	30–300 ГГц	КВЧ (крайне высокая частота)		

Таблица 3.1.2

Классификация электромагнитных излучений по длине волны

Длина волны	Наименование волн	
	Международное	Принятое в гигиенической практике
Более 10^5 км	–	нет
10^5 – 10^4 км	–	нет
10^4 – 10^3 км	мегаметровые	нет
10^3 – 10^2 км	гектокилометровые	нет
100–10 км	мериаметровые	нет
10–1 км	километровые	ДВ (длинные волны)
1–0,1 км	гектометровые	СВ (средние волны)
100–10 м	декаметровые	КВ (короткие волны)
10–1 м	метровые	УКВ (ультракороткие волны)
1–0,1 м	дециметровые	МКВ (микроволны)
10–1 см	сантиметровые	
10–1 мм	миллиметровые	

Электромагнитные излучения промышленной частоты не являются каким-то особенным лучевым фактором, а представляют лишь частный случай электромагнитных излучений сверхнизкочастотного диапазона (СНЧ) – 50/60 Гц.

3.1.1. Электрические поля

Электрическое поле представляет собой частную форму проявления электромагнитного поля. 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.

Основная количественная характеристика электрического поля – напряженность электрического поля E (В/м).

Электрическое поле в среде наряду с напряженностью характеризуется вектором электрической индукции D . В общем случае электрическое поле описывается уравнениями Максвелла.

3.1.2. Магнитные поля

Магнитное поле представляет собой частную форму электромагнитного поля. 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 (рис. 3.1.3). 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.

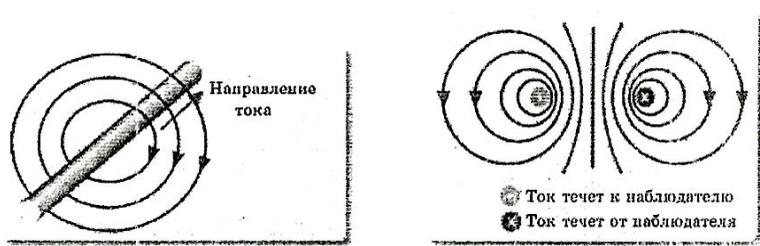


Рис. 3.1.3. Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику

В материальных средах для магнитного поля вводится дополнительная характеристика – напряженность магнитного поля H

(А/м), которая связана с магнитной индукцией B , единица измерения – тесла (Тл) соотношением: $H = B/\mu$, где μ – магнитная проницаемость среды, для воздуха равна 1. Магнитное поле может быть постоянным, импульсным и переменным.

В ЭМП различаются три зоны, которые формируются на различных расстояниях от источника ЭМИ.

Первая зона – *зона индукции (ближняя зона)* охватывает промежуток от источника излучения до расстояния, равного примерно $\frac{\lambda}{2\pi} \approx \frac{1}{6}\lambda$. В этой зоне электромагнитная волна еще не сформирована и поэтому электрическое и магнитное поля не взаимосвязаны и действуют независимо.

Вторая зона – *зона интерференции (промежуточная зона)* располагается на расстояниях примерно от $\frac{\lambda}{2\pi}$ до $2\pi\lambda$. В этой зоне происходит формирование ЭМВ и на человека действует электрическое и магнитное поля, а также оказывается энергетическое воздействие.

Третья зона – *волновая зона (дальняя зона)* располагается на расстояниях свыше $2\pi\lambda$. В этой зоне ЭМВ сформирована, электрическое и магнитное поля взаимосвязаны. На человека в этой зоне воздействует энергия волны

3.2. Источники электромагнитных полей

Источники электромагнитных полей в зависимости от происхождения делятся на естественные и антропогенные.

Естественные источники. Электромагнитная биосфера нашей планеты определяется, в основном, электрическим и квазистатическими полями Земли, атмосферным электричеством (грозовыми разрядами, в частности, молниями), радиоизлучением Солнца и галактик.

Геомангнитное поле Земли (ГМП). Состоит ГМП из постоянного (основного) и переменного поля. Постоянное магнитное поле существует за счет процессов, протекающих в жидком металлическом ядре Земли. Его вклад 99 %. У полюсов напряженность ГМП составляет 55,7 А/м, в средних широтах – 40 А/м. Переменное геомагнитное поле порождается токами в магнитосфере и ионосфере.

Электрическое поле Земли направлено нормально к земной поверхности (заряженной отрицательно относительно верхних слоев атмосферы). Напряженность электрического поля у поверхности земли $E_{\text{зем}} \approx 130$ В/м, убывает с высотой по экспоненциальному закону. Годовые изменения $E_{\text{зем}}$ сходны по характеру на всем земном шаре: максимум в январе-феврале (до 150–250 В/м) и минимум в июне-июле (100–120 В/м).

Напряженность магнитного поля Земли характеризуется двумя параметрами. Горизонтальная составляющая максимальна у экватора (20–30 А/м), убывает к полюсам (до единиц А/м). Вертикальная составляющая у полюсов составляет около 50–60 А/м, уменьшаясь у экватора до пренебрежимо малой величины. На земном шаре существуют отдельные области, где величина вертикальной составляющей намного выше («положительные аномалии») или ниже («отрицательные аномалии») среднего значения.

Частотный спектр атмосфериков (электрические сигналы, создаваемые радиоволнами, излучаемыми разрядами молний) простирается в диапазоне от сотен герц до десятков мегагерц. Максимум их интенсивности находится вблизи 10 кГц и убывает с частотой.

Спектр радиоизлучения Солнца и галактик занимает область приблизительно от 10 МГц до 10 ГГц. В «спокойном» состоянии интенсивность солнечного излучения находится в пределах от 10^{-10} до 10^{-8} Вт/м². Во время вспышек излучение усиливается в несколько десятков раз. Спектр и интенсивность радиоизлучения галактик близки. Напряженность магнитного поля Земли характеризуется двумя параметрами. Горизонтальная составляющая максимальна у экватора (20–30 А/м), убывая к полюсам (до единиц А/м). Вертикальная составляющая у полюсов составляет около 50–60 А/м, уменьшаясь у экватора до малой величины. На земном шаре существуют отдельные области, где величина вертикальной составляющей намного выше («положительные аномалии») или ниже («отрицательные аномалии») среднего значения.

Антропогенные источники. Антропогенными источниками 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 электромагнитное излучение. 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).

Непосредственными источниками электромагнитного излучения являются те части технических изделий, которые способны создавать в пространстве электромагнитные волны. В радиоаппаратуре это антенные системы, генераторные лампы, катодные выводы магнетронов, места неплотного сочленения фидерных трактов, разэкранированные места генераторных шкафов, экраны электронных визуальных средств отображения информации; на установках по термообработке материалов – рабочие индукторы и конденсаторы, согласующие трансформаторы, батареи конденсаторов, места разэкранирования фидерных линий.

3.2.1. Микроволновая печь

Микроволновая печь (или СВЧ-печь) в своей работе использует для разогрева пищи электромагнитное излучение, называемое также микроволновым излучением или СВЧ- излучением. Рабочая частота СВЧ- излучения микроволновых печей составляет 2,45 ГГц. Именно этого излучения и боятся многие люди. Однако современные микроволновые печи оборудованы достаточно совершенной защитой, которая не дает электромагнитному излучению вырваться за пределы рабочего объема. Вместе с тем, нельзя говорить, что излучение совершенно не проникает вне микроволновой печи. По разным причинам часть электромагнитного излучения проникает наружу, особенно интенсивно, как правило, в районе правого нижнего угла дверцы.

3.2.2. Радары

Радиолокационные станции оснащены, как правило, антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль «оптической оси».

Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими ЭМ-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 плотность потока энергии (ППЭ) – 100 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 – $0,5 \text{ Вт/м}^2$ 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, создаваемая на расстоянии нескольких метров, не превышает 10 Вт/м^2 . Сравнение уровней создаваемых радаром излучений с другими источниками СВЧ-диапазона приведено на рис. 3.2.1.

3.2.3. Системы спутниковой связи

Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции на Земле и спутника, находящегося на орбите. ППЭ может достигать нескольких сотен Вт/м^2 вблизи антенны, создавая также значительные уровни излучения на большом удалении.

Расчетный график распределения ППЭ на высоте 2 м от поверхности земли в районе размещения антенны спутниковой связи приведен на рис. 3.2.2.

Существуют два основных опасных случая облучения:

- непосредственно в районе размещения антенны;
- при приближении к оси главного луча на всем его протяжении.

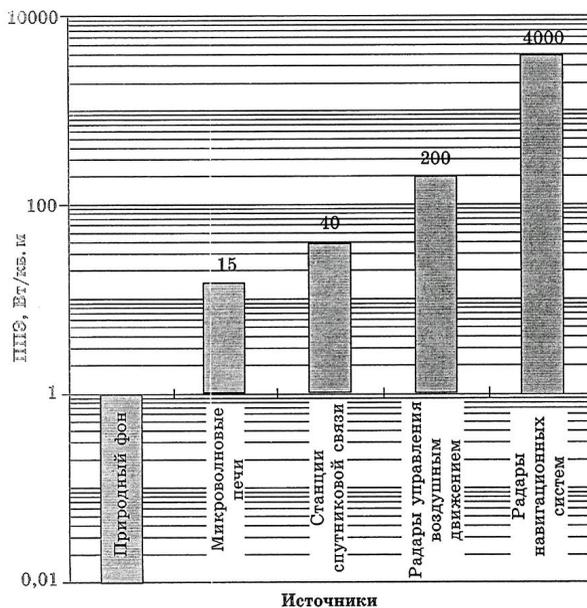


Рис. 3.2.1. Уровни ЭМИ-радаров в сравнении с другими источниками СВЧ-диапазона

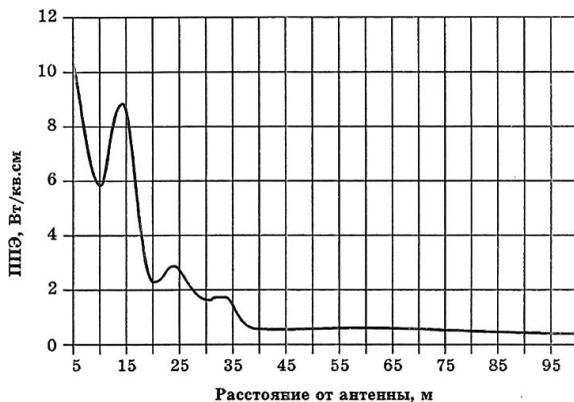


Рис. 3.2.2. График распределения плотности потока электромагнитного поля на высоте 2 м от поверхности земли в районе установки антенны спутниковой связи

3.2.4. Теле- и радиостанции

На территории России в настоящее время размещается значительное количество передающих радиостанций различной принадлежности.

Передающие 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 антенно-фидерных систем (АФС).

Зону возможного неблагоприятного действия ЭМИ, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части.

Первая часть зоны – это собственно территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС. Эта территория охраняется, и на нее допускаются только лица, профессионально связанные с обслуживанием передатчиков, коммутаторов и АФС.

Вторая часть зоны – это 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.

Широко распространенными источниками ЭМИ в населенных местах в настоящее время являются радиотехнические передающие

центры (РТШЦ), излучающие в окружающую среду ультракороткие волны ОВЧ- и УВЧ-диапазонов.

3.2.5. Сотовая связь

Основными элементами системы сотовой связи являются базовые станции (БС), которые поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами (МРТ). Базовые станции БС и МРТ являются источниками электромагнитного излучения в УВЧ-диапазоне.

Некоторые технические характеристики действующих в настоящее время в России стандартов системы сотовой радиосвязи приведены в табл. 3.2.1.

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

Таблица 3.2.1

Краткие технические характеристики стандартов системы сотовой радиосвязи, действующих в России

Наименование стандарта	Диапазон рабочих частот ВС	Диапазон рабочих частот МРТ	Максимальная излучаемая мощность ВС	Максимальная излучаемая 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
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

Антенны БС устанавливаются на высоте 15–100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках (общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, дымовых трубах промышленных предприятий и т.д.) или на специально сооруженных мачтах

К выбору места размещения антенн БС с точки зрения санитарно-гигиенического надзора не предъявляется никаких иных требований, кроме соответствия интенсивности электромагнитного излучения значениям предельно допустимых уровней, установленных действующими Санитарными правилами и нормами СанПиН 2.2.4/2.1.8.055–96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)» в местах, определенных этими Санитарными правилами и нормами.

Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМИ

Основная энергия излучения сосредоточена в узком «луче», который всегда направлен в сторону от сооружений, на которых находятся антенны БС, и выше прилегающих построек, что является необходимым условием для нормального функционирования системы сотовой связи.

Антенны БС не излучают постоянную мощность 24 часа в сутки, а имеют переменный график излучения, определяемый загрузкой, то есть наличием владельцев сотовых телефонов в зоне обслуживания конкретной базовой станции и их желанием воспользоваться телефоном для разговора.

Для станций, расположенных в различных районах города, график загрузки различный. В ночные часы загрузка БС практически равна нулю, т.е. станции в основном «молчат».

Мобильный радиотелефон (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 «мобильный радиотелефон – базовая станция», 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.

3.2.6. Персональный компьютер

Основными составляющими частями персонального компьютера (ПК) (рис. 3.2.3) являются: системный блок и разнообразные устройства ввода/вывода информации: клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер и т.п.

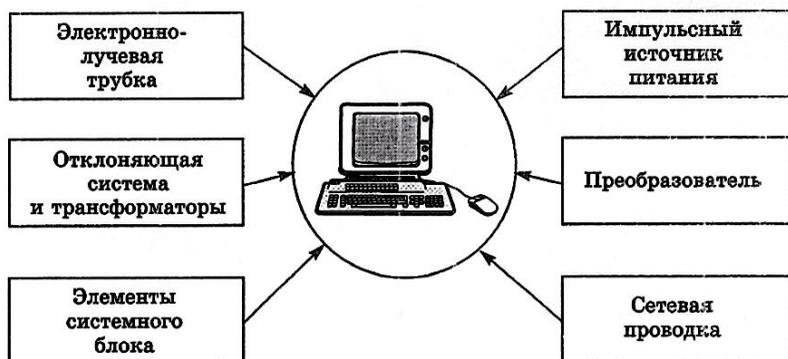


Рис. 3.2.3. Основные излучающие элементы ПК

Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации, называемое по-разному монитор, дисплей, главным компонентом которого часто является устройство на основе электронно-лучевой трубки. ПК часто оснащают сетевыми фильтрами (например, типа «Pilot»), источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным электрооборудованием. Все эти элементы при работе ПК формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя (табл. 3.2.2). Спектральная характеристика излучения ПК представлена на рис. 3.2.4.

Таблица 3.2.2

Частотные характеристики электромагнитного излучения ПК

Источник	Диапазон частот (первая гармоника)
Монитор сетевой трансформатор блока питания	50 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)	50–1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20–100 кГц

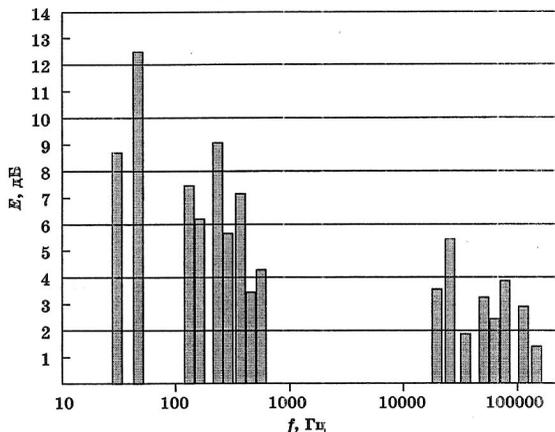


Рис. 3.2.4. Спектральная характеристика излучения ПК

3.2.7. Электромагнитные излучения промышленной частоты

Основными источниками электромагнитных излучений промышленной частоты (50/60 Гц) являются элементы токопередающих систем различного напряжения (линии электропередачи, открытые распределительные устройства, их составные части), электроприборы и аппаратура промышленного и бытового назначения, потребляющая электроэнергию.

Бытовые приборы. Из бытовых приборов наиболее мощными следует признать СВЧ-печи, различного рода грили, холодильники с системой «без инея», кухонные вытяжки, электроплиты, телевизоры. Реально создаваемое ЭМИ в зависимости от конкретной модели и режима работы может сильно различаться среди оборудования одного типа (рис. 3.2.5). Все нижеприведенные данные относятся к магнитному полю промышленной частоты 50 Гц. Согласно современным представлениям, оно может быть опасным для здоровья человека, если происходит продолжительное облучение (регулярно, не менее 8 часов в сутки, в течение нескольких лет) с уровнем выше 0,2 мкТл. Средние уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м показаны на рис. 3.2.5, а изменение уровня в зависимости от расстояния на рис. 3.2.6.

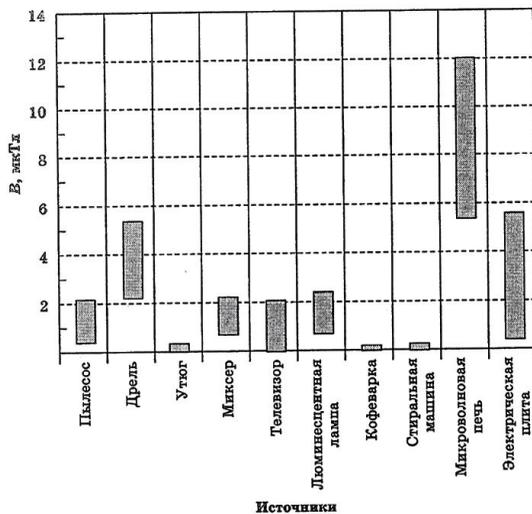


Рис. 3.2.5. Уровни излучений магнитного поля бытовых приборов на расстоянии 0,3 м

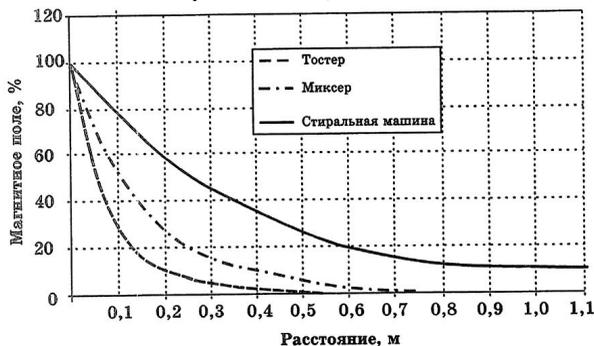


Рис. 3.2.6. Изменение уровня магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов в зависимости от расстояния

В табл. 3.2.3 представлены данные о расстоянии, на котором фиксируется магнитное поле промышленной частоты (50 Гц) величиной 0,2 мкТл при работе ряда бытовых приборов

Таблица 3.2.3

Распространение магнитного поля промышленной части от бытовых электрических приборов (выше уровня 0,2 мкТл)

Источник	Расстояние, на котором фиксируется величина больше 0,2 мкТл
Холодильник, оснащенный системой «No frost» (во время работы компрессора)	1,2 м от дверцы; 1,4 м от задней стенки
Холодильник обычный (во время работы компрессора)	0,1 м от электродвигателя компрессора
Утюг (режим нагрева)	0,25 м от ручки
Телевизор 14"	1,1 м от экрана; 1,2 м от боковой стенки
Электрорадиатор	0,3 м (от провода)
Торшер с двумя лампами по 75 Вт	0,4 м от передней стенки
Электродуховка	1,4 м от боковой стенки
Аэрогриль	

Электропроводка. Среди наиболее опасных источников, излучающих в жилые квартиры, но находящихся вне их, особое место занимают трансформаторные подстанции, домовые распределительные щиты электропитания, кабели электропитания. Типичное безопасное расстояние – 1,5–5 метров. Пример распределения магнитного поля промышленной частоты в комнате, в которую излучает внешний источник, приведен на рис. 3.2.7.

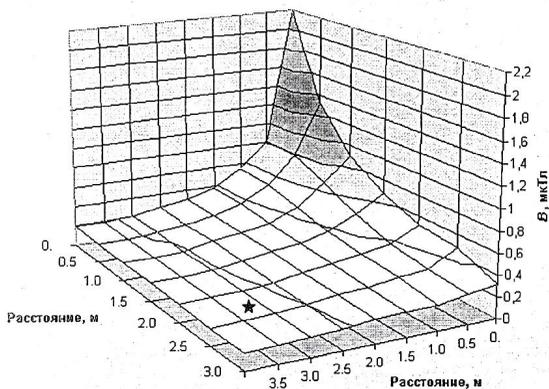


Рис. 3.2.7. Источник излучения – общий силовой кабель подъезда. Зона для спального места (безопасная зона) отмечена звездочкой

Наибольшее влияние на электромагнитную обстановку жилых помещений в диапазоне промышленной частоты 50 Гц оказывает электротехническое оборудование здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания, и распределительные щиты и трансформаторы. В помещениях, смежных с этими источниками,

обычно повышен уровень магнитного поля промышленной частоты. Уровень электрического поля промышленной частоты при этом обычно невысокий и не превышает ПДУ для населения 500 В/м.

Линии электропередачи. В зависимости от назначения и номинального напряжения линии электропередачи (ЛЭП) подразделяются на:

- сверхдальние (500 кВ и выше);
- магистральные (220–330 кВ);
- распределительные (30–150 кВ);
- подводящие (менее 20 кВ).

Провода работающей линии электропередачи создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты. Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов линии, достигает десятков метров.

Дальность распространения электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП (цифра, обозначающая класс напряжения, стоит в названии ЛЭП – например, ЛЭП 220 кВ).

3.2.8. «Безопасность» Notebook

Несколько лет назад существовало мнение, что портативные компьютеры типа Notebook безопасны для пользователей и не нуждаются в таких дополнительных мерах защиты, как приэкранные фильтры. В основе подобных представлений лежал тот факт, что в портативных компьютерах используются экраны на основе жидких кристаллов, которые не генерируют вредных излучений, присущих обычным мониторам с электронно-лучевой трубкой.

Электростатическое поле и рентгеновское излучение действительно отсутствуют у жидкокристаллических экранов, но что касается электромагнитных излучений, то результаты исследований показали, что электромагнитное излучение многих портативных компьютеров типа Notebook значительно превышает экологические нормативы.

Для ПК с ЖК-экранами свойственны два режима электропитания – от встроенного аккумулятора и от сети. В первом режиме, как показали измерения, излучения, естественно, меньше, но они существуют. В режиме электропитания от сети портативный компьютер излучает электрическую составляющую переменного электромагнитного поля, мало отличающуюся по интенсивности от ПК с дисплеями на ЭЛТ.

При питании от аккумулятора у большинства портативных ПК напряженность поля в диапазоне от 5 Гц – 2 кГц заметно превышает

норму, а во втором превышение отмечено только справа и сзади от экрана.

Самому пользователю Notebook, и его соседям по самолетным креслам или по салону автомобиля есть повод для беспокойства, а также человеку, сидящему впереди справа от пользователя, работающего у компьютера. Именно в этом направлении все исследованные образцы излучали наиболее сильно.

3.2.9. Излучения сотовых телефонов

Исследованием влияния радиочастотного излучения на здоровье человека начали заниматься несколько десятилетий назад после того, как стали интенсивно развивать и внедрять мощную радиопередающую и локационную технику. Однако накопленные знания о действии СВЧ не слишком применимы, когда речь идет о сотовых телефонах, имеющих несравнимо более низкий уровень излучения. Биологические эффекты использования радиотелефонов делят на тепловые – катарактогенные, и нетепловые – неврологические, канцерогенные и эпидемиологические. Изучение каждого из перечисленных факторов позволило выявить ряд последствий от воздействия излучений слабой мощности, характеризующихся показателем удельного поглощения энергии меньшим, чем 2 Вт/кг.

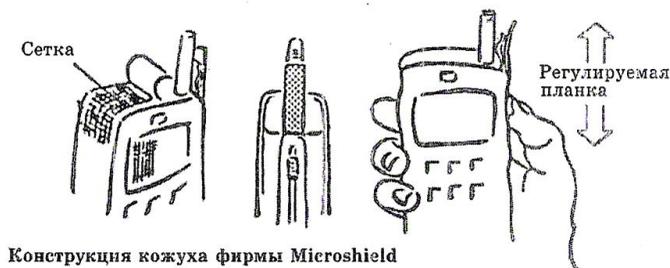
Во-первых, такие излучения отрицательно влияют на нервную систему. Во-вторых, к серьезным нарушениям зрения может приводить даже незначительное – всего на полградуса – повышение температуры клеток головного мозга, находящихся в непосредственной близости от источника излучения. Изменения в нервных клетках человека ведут к неприятностям вроде головной боли, временного ухудшения памяти и концентрации внимания, что, в частности, небезопасно для людей за рулем. Другой важный вывод – эти явления не проходят бесследно, а как бы накапливаются в организме. Более того, цифровые радиотелефоны угрожают здоровью больше, чем аналоговые аппараты, поскольку цифровой сигнал как бы бомбардирует живые клетки, вызывая в них более выраженные изменения. Исследования еще не завершены, поскольку пока неясно, как зависит рассматриваемый эффект от различных параметров СВЧ-излучения малой мощности.

Специалисты напрямую связывают возможность появления онкологических заболеваний, катаракт, болезней Паркинсона и Альцгеймера с изменениями в тканях мозга под действием

микроволнового излучения.

Как показывают эксперименты, лишь 30 % излучения радиотелефона служат для установления связи с базовой станцией соты. Остальные 70 % поглощаются телом абонента. Чтобы предотвратить это, фирма Microshield изобрела действительно очень простое и недорогое устройство. Оно представляет собой обычный кожаный чехол с прозрачным окном для клавиатуры и дисплея, который полностью экранирует излучения от корпуса аппарата благодаря применению специальной ультратонкой защитной сетки, вшитой в чехол и окно. Главный же элемент системы – экранирующая планка (рис. 3.2.8), выдвигающаяся параллельно антенне радиотелефона. Система позволяет поглотить до 90 % излучений, когда планка выдвинута на три четверти длины.

Для снижения опасного влияния СВЧ надо: не держать у головы одновременно сотовый телефон и трубку обычного телефонного аппарата; выдвигать при разговоре антенну радиотелефона на полную длину; по возможности, избегать разговоров в машине; при работе с компьютером удалять подключенный к нему сотовый терминал на максимальное расстояние; и, главное, не говорить подолгу. Антенна сотового телефона является самым большим источником электромагнитной энергии.



Конструкция кобуха фирмы Microshield

Рис. 3.2.8. Конструкция устройства для защиты от радиоизлучения

3.2.10. Магнитные поля на транспорте (электротранспорт)

Транспорт на электрической тяге – электропоезда (в том числе поезда метрополитена), троллейбусы, трамваи и т.п. – является относительно мощным источником магнитного поля в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. По данным Stenzel et al. (1996), максимальные значения плотности потока магнитной индукции B в пригородных

«электричках» достигают 75 мкТл при среднем значении 20 мкТл. Среднее значение B на транспорте с электроприводом постоянного тока зафиксировано на уровне 29 мкТл.

3.3. Воздействие электромагнитных полей на организм человека

Воздействие мощных электромагнитных полей на человека приводит к определенным сдвигам в нервно-психической и физиологической деятельности. При $E \approx 10^{-4}$ В/м наблюдается сосудистый условный рефлекс у человека; при $E \approx 3-10^{-2}$ В/м – изменение слюноотделения у собаки; при ППЭ = 20 мкВт/см² – изменение энцефалограммы у кролика и даже при ППЭ = 0,3 мкВт/см² – изменение эпителиальных и промежуточных клеток животных (и это вместо предполагаемых на основе тепловой теории: 200 В/м, 10 мВт/см² для ВЧ и ЭМИ соответственно). Для клетки чувствительность оценивается величиной энергии 10^{-19} Дж/клетку. Здесь можно говорить скорее о раздражающем, чем о поражающем эффекте, т.е. скорее о физиологическом в общем смысле, чем о патологическом аспекте воздействия электромагнитной энергии.

С усложнением биологического вещества неизменно усложняется процесс его взаимодействия с электромагнитным полем.

Кроме простейших физико-химических механизмов все большее и большее влияние на организм в целом оказывают эффекты, которые принято связывать с так называемыми физиологическими и биофизическими механизмами действия, включающими как неразрывное целое информационный аспект полей ЭМИ. Эти и другие механизмы, еще более ясные, определяют вторичные эффекты воздействия поля, которые происходят, как правило, на дотепловых энергиях. Это кумуляция, стимуляция, сенсibilизация, возникающие как следствие развитой способности сложных систем накапливать тепловое и информационное воздействие.

Кумуляция приводит к тому, что при воздействии прерывистого облучения суммарный эффект накапливается и зависит от величины эффекта с самого начала воздействия; при перерывах в воздействии увеличивается общее время облучения, необходимое для появления данного эффекта.

Сенсibilизация заключается в повышении чувствительности организма после слабого радиооблучения к последующим

воздействиям (в опытах на ЭМИ – к значительно более мощным облучениям, вблизи летального порога).

Нервная система. При исследовании влияния ЭМИ на нервную систему особое внимание уделяется изучению центральной нервной системы, регулирующей активные и пассивные взаимосвязи организма с внешним миром, и вегетативной нервной системы, которая обеспечивает целостность и согласованность всех функций внутри самого организма.

Действие ЭМИ на поведение животных проявляется в изменении общей двигательной активности, в стремлении животных уйти из зоны воздействия, в ориентировочных реакциях на ЭМИ.

В ряде исследований, проведенных за последние годы, были обнаружены реакции головного мозга на действие ЭМИ, выражающиеся в структурных изменениях, а также в изменении биоэлектрической системы мозга.

Кровь и лимфа. Кровь и связанная с ней лимфа, являясь внутренней средой организма, выполняют ряд исключительно важных физиологических функций. В крови, являющейся электролитом, под влиянием электромагнитных излучений возникают ионные токи, вызывающие нагрев тканей. При определенной интенсивности излучения, называемой тепловым порогом (при интенсивности ЭМИ более 10 мВт/см^2), организм может не справиться с образующимся теплом.

При изучении действия ЭМИ в крови определяют число эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, эозинофилов, содержание гемоглобина и т.д. Определение содержания в крови ионов *Na*, *K*, *Ca*, *Cl*, общее содержание белка, сахара, холестерина позволяют судить о нарушениях минерального, белкового, углеводного и жирового обменов.

Белковый обмен. Уже в начальных стадиях развития различных профессиональных заболеваний, в том числе под действием ЭМИ, наблюдаются сдвиги как в содержании белков, так и в соотношении их фракций.

При влиянии ЭМИ возможно нарушение активности отдельных ферментных систем, участвующих в расщеплении углеводов.

При воздействии ЭМИ наблюдаются изменения в содержании хлоридов, натрия, калия, кальция, фосфатов. Очевидным является снижение витамина С, тиамина (витамина В₁), которые определяются флуорометрически.

Среди всего спектра наибольшей биологической значимостью и выраженностью симптоматики выделяются

ЭМИ РЧ и СВЧ. В зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия ЭМИ РЧ и СВЧ вызываемые изменения в организме подразделяют на изменения острого (термогенного) и хронического (атермального) воздействия. *Острое* воздействие обусловлено термическим эффектом ЭМИ, как правило, при нарушении техники безопасности.

Термогенное воздействие обычно носит локальный характер, а возникающая симптоматика определяется топографией облучаемой области.

При облучении пострадавшие ощущают тепло в месте воздействия, схожее с действием солнечных лучей, иногда отмечают также общее недомогание, головную боль, головокружение, тошноту, рвоту, чувство страха, жажду, легкую слабость, боли в конечностях, повышенную потливость. У пострадавших наблюдаются повышение температуры тела, приступы тахикардии, нарушение сердечной деятельности, артериальная гипертензия.

В ряде случаев в клинике острых воздействий могут преобладать диэнцефальные расстройства. Субъективная и объективная симптоматика у пострадавших через несколько дней исчезает, все клинические показатели приходят к доклиническому уровню, полностью восстанавливается работоспособность.

Немногочисленные клинические наблюдения острого теплового действия ЭМИ на человека указывают на возможность локальных остаточных структурных изменений органов и тканей (ожогов, катаракты, атрофии семенников и т.д.). Сила проявления теплового эффекта зависит от напряженности поля и времени действия.

Наиболее обширно в литературе представлены сведения, касающиеся клинко-эпидемиологического характера. *Хроническое* влияние ЭМИ регистрируется при воздействии ЭМИ интенсивностью, превышающей предельно допустимый уровень, но не приводящей к тепловым эффектам. По данным ряда отечественных авторов, у персонала, связанного с работой источников ЭМИ РЧ и СВЧ, выявляется разнообразная неврологическая симптоматика как субъективного, так и объективного характера (табл. 3.3.1). При использовании ряда психологических тестов у персонала, имеющего длительный контакт с ЭМИ, наблюдают достоверное усиление патологической компоненты тревожного поведения и депрессивного состояния при отсутствии каких-либо объективных симптомов. При

анкетировании могут наблюдаться преобладание жалоб на снижение памяти, а также на ухудшение самочувствия, увеличение инерционности зрения к концу рабочего дня. Наиболее характерными в динамике изменений реакции организма на хроническое воздействие ЭМИ являются: реакции центральной нервной и сердечнососудистой систем, а также системы крови.

Исследования, проведенные у нас в стране до 60–70-х гг., позволили рассматривать весь наблюдаемый симптомокомплекс как проявление так называемой «радиоволновой болезни».

Таблица 3.3.1

Возможные изменения в организме человека под влиянием ЭМИ различных интенсивностей

Интенсивность ЭМИ, мВт/см ²	Наблюдаемые изменения
1	2
600	Болевые ощущения в период облучения
200	Угнетение окислительно-восстановительных процессов в тканях
100	Повышение артериального давления с последующим его снижением; в случае воздействия – устойчивая гипотензия. Двухсторонняя катаракта
40	Ощущение тепла. Расширение сосудов. При облучении 0,5–1ч повышение давления 20–30мм рт. ст.
20	Стимуляция окислительно-восстановительных процессов в ткани

Окончание табл. 3.3.1

1	2
10	Астенизация после 15 мин облучения, изменение биоэлектрической активности головного мозга
8	Неопределенные сдвиги со стороны крови с общим временем облучения 150 ч, изменение свертываемости крови
6	Электрокардиографические изменения в рецепторном аппарате
4–5	Изменение артериального давления при многократных облучениях, непродолжительная лейкопения, эритропения
3–4	Ваготоническая реакция с симптомами брадикардии, замедление электропроводимости сердца
2–3	Выраженный характер снижения артериального давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема сердца
1	Снижение артериального давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема крови сердца. снижение офтальмотонуса при ежедневном воздействии в течение 3,5 месяцев
0,4	Слуховой эффект при воздействии импульсных ЭМП
0,3	Некоторые изменения со стороны нервной системы при

	хроническом воздействии в течение 5–10 лет
0,1	Электрокардиографические изменения
До 0,05	Тенденции к понижению артериального давления при хроническом воздействии

3.4. Нормирование электромагнитных полей

Основным руководящим документам, определяющими параметры воздействия ЭМП является СанПин 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях». Согласно им устанавливают на рабочих местах: временные допустимые уровни (ВДУ) ослабления геомагнитного поля (ГМП); ПДУ электростатического поля (ЭСП); ПДУ постоянного магнитного поля (ПМП) ПДУ электрического и магнитного полей промышленной частоты 50 Гц (ЭП и МП ПЧ), ПДУ электромагнитных полей в диапазоне частот свыше 30 кГц–300 ГГц.

3.4.1. Геомагнитное поле

Интенсивность геомагнитных полей (ГМП) оценивается в единицах напряженности магнитного поля (H) в А/м или в единицах магнитной индукции (B) в Тл (мкТл, нТл). Интенсивность ослабления геомагнитного поля оценивается по коэффициенту ослабления (K), который определяется отношением интенсивности напряженности магнитного поля, измеренной в открытом пространстве, к его интенсивности внутри помещения.

Коэффициент ослабления геомагнитного поля не должен превышать 2 ($K \leq 2$).

3.4.2. Электростатическое поле

Уровень электростатического поля (ЭСП) оценивается в единицах напряженности электрического поля (E) в кВ/м. Предельно допустимый уровень электростатического поля при воздействии на человека не более 1 ч за смену установлен равным $E_{\text{ПДУ}} = 60$ кВ/м. При воздействии ЭСП более 1 ч за смену

$$E_{\text{ПДУ}} = 60/\sqrt{t},$$

где t – время действия в часах.

При напряженности $E = 20$ – 60 кВ/м время пребывания $t_{\text{доп}}$ в ЭСП без средств защиты равно:

$$t_{\text{ПДУ}} = (60/E)^2.$$

При напряженности менее 20 кВ/м время пребывания в ЭСП не ограничивается. При напряженности более 60 кВ/м работать без средств защиты не допускается.

3.4.3. Постоянное магнитное поле

Уровень постоянного магнитного поля (ПМП) оценивается в единицах напряженности магнитного поля (H) в А/м или в единицах магнитной индукции (B) в мТл. ($H = B / \mu_0$) где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; 1 А/м = 1,25 мкТл; 1 мкТл = 0,8 А/м

ПДУ напряженности ПМП на рабочих местах в зависимости от времени пребывания в нем представлен в таблице (3.4.1).

Таблица 3.4.1

ПДУ постоянного магнитного поля

Время воздействия за рабочий день, мин	Условия воздействия			
	Общие		локальные	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0–10	24	30	40	50
11–60	16	20	24	30
61–480	8	10	12	15

3.4.4. Электромагнитные поля частотой 50 Гц

Гигиеническая оценка ЭМП (50 Гц) осуществляется отдельно по напряженности электрического поля (E) в кВ/м и напряженности магнитного поля (H) в А/м или индукции магнитного поля (B) в мкТл в зависимости от времени пребывания в ЭМП.

ПДУ напряженности электрического поля (ЭП) на рабочем месте установлен 5 кВ/м.

При напряженности (E) в интервале 5–20 кВ/м, допустимое время пребывания (t), в часах, рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{доп}} = (50 / E) - 2,$$

При напряженности свыше 20 и до 25 кВ/м: $t_{\text{доп}} = 10$ мин.

При напряженности более 25 кВ/м пребывание в электрическом поле без средств защиты не допускается.

ПДУ напряженности периодического (синусоидального) магнитного поля (МП) установлен (табл. 3.4.2) для облучения всего тела и только рук (локальное облучение).

Таблица 3.4.2

ПДУ воздействия периодического магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, Н[А/м]/В[мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
До 1	1600/2000	6400/800
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

3.4.5. Электромагнитное поле диапазона радиочастоты 10–30 кГц

Оценку и нормирование ЭМП радиочастоты (РЧ) осуществляют отдельно по напряженности электрического (E в В/м) и магнитного (H в А/м) полей в зависимости от времени воздействия ЭМП на человека.

ПДУ напряженности электрического поля установлен 500 В/м, магнитного – 50 А/м. Если время пребывания в данном ЭМП меньше 2 ч за смену, то ПДУ соответственно составляет 1000 В/м и 100 А/м.

3.4.6. Электромагнитные поля радиочастот 30 кГц–300 ГГц

Оценку и нормирование ЭМП частот 30кГц–300 ГГц осуществляют по величине энергетической экспозиции (ЭЭ) по формулам:

$$\text{ЭЭ}_E = E^2 \cdot T, (\text{В/м})^2 \cdot \text{ч};$$

$$\text{ЭЭ}_H = H^2 \cdot T, (\text{А/м})^2 \cdot \text{ч},$$

где E – напряженность электрического поля, В/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; плотность потока энергии (ППЭ) Вт/м², мкВт/см²; T – время воздействия за смену, ч. В диапазоне частот выше 300 ГГц энергетическую экспозицию рассчитывают по формуле:

$$\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}} = \text{ППЭ} \cdot T,$$

где ППЭ – плотность потока энергии, Вт/м², мкВт/см².

ПДУ энергетических экспозиций представлены в табл. 3.4.3 и 3.4.4.

Таблица 3.4.3

ПДУ энергетических экспозиций ЭМП диапазона частот свыше 30–300ГГц

Параметр	ЭЭ _{ПДУ} в диапазонах частот (МГц)				
	≥0,03–3,0	≥3,0–30,0	≥30,0–50,0	≥50,0–300,0	≥300,0–300 000,0
ЭЭ _E , (В/м) ² ·ч	20 000	7000	800	800	–
ЭЭ _H , (А/м) ² ·ч	200	–	0,72	–	–
ЭЭ _{ППЭ} , (мкВт/см ²)·ч	–	–	–	–	200

Таблица 3.4.4

Максимальные ПДУ напряженности и плотности потока энергии ЭМП диапазона частот свыше 30кГц–300 ГГц

Параметры	ЭЭ _{ПДУ} в диапазонах частот (МГц)				
	≥0,03–3,0	≥3,0–30,0	≥30,0–50,0	≥50,0–300,0	≥300,0–300 000,0
Е, В/м	500	300	80	80	–
Н, А/м	50	–	30	–	–
ППЭ, мкВт/см ²	–	–	–	–	1000
					5000*

* Для условия локального облучения кистей рук.

3.4.7. Электромагнитные поля, создаваемые мобильными телефонами

В России в соответствии с ГН 2.1.8/2.2.4.019–94 «Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи» нормируются уровни электромагнитного излучения, создаваемые объектами системы сотовой связи: плотность потока энергии (ППЭ), создаваемая телефоном, не должна превышать 100 мкВт/см² (1 Вт/м²).

3.5. Защита от воздействия электромагнитных излучений

Защита организма человека от действия электромагнитных излучений предполагает снижение их интенсивности до уровней, не превышающих предельно допустимые. Защита обеспечивается выбором конкретных методов и средств, учетом их экономических показателей, простотой и надежностью эксплуатации. Организация этой защиты подразумевает:

- оценку уровней интенсивности излучений на рабочих местах и их сопоставление с действующими нормативными документами;
- выбор необходимых мер и средств защиты, обеспечивающих степень защищенности в заданных условиях;
- организацию системы контроля над функционирующей защитой.

По своему назначению защита может быть *коллективной*, предусматривающей мероприятия для групп персонала, и *индивидуальной* – для каждого специалиста в отдельности. В основе каждой из них лежат *организационные* и *инженерно-технические* мероприятия.

Коллективная защита по сравнению с индивидуальной предпочтительней вследствие простоты обслуживания и проведения

контроля над эффективностью защиты. Однако ее внедрение часто осложняется высокой стоимостью, сложностью защиты больших пространств. Нецелесообразно, например, ее использование при проведении кратковременных работ в полях с интенсивностью выше предельно допустимых уровней. Это ремонтные работы в аварийных ситуациях, настройка и измерение в условиях открытого излучения, при проходе через опасные зоны и т.д. В таких случаях показано применение индивидуальных средств защиты. Тактика применения методов коллективной защиты от ЭМИ зависит от нахождения источника облучения по отношению к производственному помещению: внутри или снаружи.

Индивидуальные средства защиты предназначены для предотвращения воздействия на организм человека ЭМИ с уровнями, превышающими предельно допустимые, когда применение иных средств невозможно или нецелесообразно. Они могут обеспечить общую защиту, либо защиту отдельных частей тела (локальная защита). Обобщенные сведения об индивидуальных средствах защиты от действия ЭМИ представлены в табл. 3.5.1.

Общая структура мер защиты от воздействия электромагнитных излучений радиочастот и СВЧ представлены в табл. 3.5.2.

Таблица 3.5.1
Специальные средства защиты от ЭМИ

Электромагнитны излучения ПЧ	Костюмы, комбинезоны из тканевого волокна в сочетании с экранирующим проводящим слоем с удельным поверхностным сопротивлением не более 10 кОм, ГОСТ 12.4.17222–87	Ботинки, полуботинки токопроводящие, ТУ 17-06-71-82; ботинки ТУ 17-06-82–83; сапоги, полусапоги, галоши резиновые повышенной электропроводимости, ТУ 38.106419–82	Рукавицы, перчатки из электропроводящей ткани	Металлические либо пластмассовые металлизированные каски; шапки ушанки с прокладкой из токопроводящей ткани	Индивидуальные съемные экраны	Применяется
---------------------------------	---	---	---	---	-------------------------------	-------------

Наименование средства	Электромагнитные излучения	
	рч	СВЧ
Одежда	Не применяются	Радиационные костюмы, комбинезоны, халаты, фартуки, куртки из ткани х/б с микропроводом, арт.7289, СТУ-36-12-199-63; арт.4381
Обувь	Не применяются	Бахилы из ткани х/б с микропроводом, арт. 7289 СТУ-36-12-169-63; арт. 4381
Средства защиты рук	Не применяются	Рукавицы из ткани х/б с микропроводом, арт. 7289 СТУ-36-12-169-63; арт. 4381
Средства защиты головы, лица, глаз	Не применяются	Очки защитные закрытые с прямой вентиляцией, ОРЗ-5, ГУ 64-1-2717-81; шлемы, капшоны, маски из радиоотражающих материалов
Инструменты, приспособления, устройства	Дистанционное управление	Дистанционное управление
Индивидуальное заземление	Применяется	Применяется

Таблица 3.5.2

Структура мер защиты от действия ЭМИ радиочастот и СВЧ

Наименование мер защиты	Коллективная защита	Индивидуальная защита
1	2	3
Организационные меры защиты	Лечебно-профилактические мероприятия	
	Применение средств наглядного предупреждения о наличии ЭМП Вывешивание плакатов, памяток с перечнем основных мер предосторожности Проведение лекций по безопасности труда при работе с источниками	Проведение медицинского освидетельствования при приеме на работу Периодические медицинские обследования и врачебные наблюдения за персоналом Объективная информация об уровне интенсивности на рабочем месте и четкое представление об их возможном влиянии на состояние здоровья работающих Проведение инструктажа по правилам техники безопасности при работе в условиях воздействия ЭМИ

	ЭМП и профилактике переоблучений от их воздействия сопутствующих производственных факторов			
Мероприятия по защите временем				
	Разработка оптимального режима труда и отдыха коллектива с организацией рабочего времени с минимально возможным контактом по времени с ЭМИ	Нахождение в контакте с ЭМИ только по служебной необходимости с четкой регламентацией по времени и пространству совершаемых действий		
Мероприятия по защите за счет рационального размещения объектов				
	Рациональное размещение облучающих и облучаемых объектов: увеличение расстояний между ними, подъем антенн или диаграмм направленности и т.д.	Организация рабочего места с целью создания условий с минимальными уровнями воздействующих ЭМИ		
Инженерно-технические меры защиты	Секторное блокирование направлений излучений	Экранирование отдельных рабочих мест радиоотражающими и радиопоглощающими материалами		
	Разработка оптимального режима труда и отдыха коллектива с организацией рабочего времени с минимально возможным контактом по времени с ЭМИ	Радиоотражающие материалы Радиопоглощающие материалы Строительные материалы Лесонасаждения	Индивидуальные средства защиты в комплекте со средствами локальной защиты	Костюмы Комбинезоны

Окончание табл. 3.5.2

1	2	3		
Инженерно-технические меры защиты	Экранирование радиоизлучающих источников	Поглощающие нагрузки Эквиваленты антенн Поглотители мощности Аттенуаторы	Индивидуальные средства локальной защиты	Радиозащитные халаты Перчатки Шлемы Щитки Очки и т.д.

Организационные меры защиты направлены на обеспечение оптимальных вариантов расположения объектов, являющихся источниками излучения, и объектов, оказывающихся в зоне воздействия, организацию труда и отдыха персонала с целью снизить

до минимума время пребывания в условиях воздействия, предупреждение возможности попадания в зоны с интенсивностями, превышающими ПДУ, т.е. осуществление защиты «временем». Внедрение в практику этих защитных мер начинается в период предупредительного и уточняется в период текущего санитарного надзора. К организационным мерам защиты следует отнести и проведение ряда *лечебно-профилактических мероприятий*. Это, прежде всего, обязательное медицинское освидетельствование при приеме на работу, последующие периодические медицинские обследования, что позволяет выявить ранние нарушения в состоянии здоровья персонала, отстранить от работы при выраженных изменениях состояния здоровья.

В каждом конкретном случае оценка риска здоровью работающих должна базироваться на качественной и количественной характеристике факторов. Существенным с позиции влияния на организм является характер профессиональной деятельности и стаж работы. Важную роль играют индивидуальные особенности организма и его функциональное состояние.

К организационным мерам следует отнести также применение средств наглядного предупреждения о наличии того или иного излучения, вывешивание плакатов с перечнем основных мер предосторожности, проведение инструктажей, лекций по безопасности труда при работе с источниками излучений и профилактике их неблагоприятного и вредного воздействия. Большую роль в организации защиты играют объективная информация об уровнях интенсивностей на рабочих местах и четкое представление об их возможном влиянии на состояние здоровья работающих.

Защита временем предусматривает нахождение в контакте с излучением только по служебной необходимости с четкой регламентацией по времени и пространству совершаемых действий; автоматизацию работ; уменьшение времени настроечных работ и т.д. В зависимости от воздействующих уровней (инструментальный и расчетный методы оценки) время контакта с ними определяется в соответствии действующими нормативными документами. Максимально допустимое время нахождения в зоне облучения можно определить в зависимости от частоты диапазона излучения:

$$T_{\text{доп}} = \frac{\text{ЭН}_{E_{\text{доп}}}}{E^2}; T_{\text{доп}} = \frac{\text{ЭН}_{H_{\text{доп}}}}{H^2};$$
$$T_{\text{доп}} = \frac{2}{\text{ППЭ}}; T_{\text{доп}} = \frac{2k}{\text{ППЭ}}.$$

Допустимое время пребывания в зоне излучения установок промышленной частоты (50Гц):

$$T_{\text{доп}} = \frac{50}{E} - 2.$$

Защита расстоянием применяется в том случае, когда невозможно ослабить ЭМП другими мерами, в том числе защитой временем. Тогда прибегают к увеличению расстояния между излучателем и персоналом, дистанционным его управлением и т.д. В основе такой защиты лежит принцип уменьшения интенсивности излучения обратно пропорционально квадрату расстояния между источником и объектом облучения. Расстояние, соответствующее нормам определяется расчетом и проверяется измерением.

Защита рациональным (оптимальным) размещением подразумевает определение санитарно-защитных зон, зон недопустимого пребывания на этапах проектирования. В этих случаях для определения степени снижения воздействия в каком-то пространственном объеме используют специальные расчетные, графоаналитические, инструментальные (стадия экспериментальной эксплуатации) методы.

При рассмотрении вопроса о размещении рабочих мест операторов персональных компьютеров в помещении необходимо учитывать, что в этом случае на оператора может оказывать негативное воздействие не только тот компьютер, за которым он работает, но и другие компьютеры, находящиеся в данном помещении. Для исключения такого влияния следует руководствоваться следующими правилами.

Видеодисплейные терминалы должны по возможности размещаться в один ряд на расстоянии более одного метра от стен.

Рабочие места операторов должны быть на расстоянии более 1,5 метров между собой. Допускается также размещение видеодисплейных терминалов в форме «ромашки». Однако следует учитывать, что каким бы ни было расположение компьютеров в рабочем помещении, задняя стенка компьютера не должна быть направлена в сторону других рабочих мест. Если этого невозможно достичь с помощью рациональной планировки помещения, то в конструкции рабочего стола необходимо предусмотреть возможность монтирования магнитного экрана со стороны, к которой обращена тыльная часть видеомонитора. Возможный вариант расположения рабочих мест в помещении представлен на рис. 3.5.1, 3.5.2.

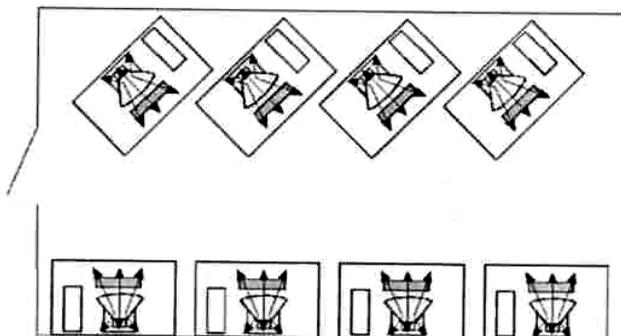


Рис. 3.5.1. Вариант № 1

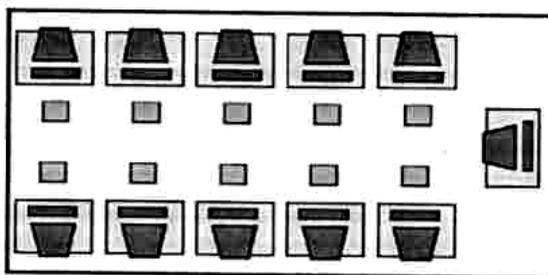


Рис. 3.5.2. Вариант № 2

На рис. 3.5.3 представлены не рекомендуемые варианты расположения рабочих мест с персональными компьютерами.

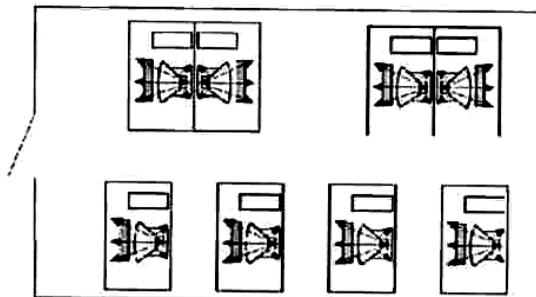


Рис. 3.5.3. Не рекомендуемые варианты расположения рабочих мест с персональными компьютерами

Организационные меры коллективной и индивидуальной защиты основаны на одних и тех же принципах и в некоторых случаях относятся к обеим группам. Разница лишь в том, что первые направлены на нормализацию электромагнитной обстановки для целых коллективов, на больших производственных площадях, а вторые уменьшают излучения при индивидуальной регламентации труда.

Наряду с проведением защитных мероприятий, имеющих общий характер, существует ряд специальных мероприятий. Так, в ряде случаев защитные меры от ЭМИ включают ограничение работы источников по углу места и азимуту, а также необходимость подъема диаграммы направленности или антенны. После предварительного определения степени необходимого ослабления излучения до уровня, не превышающих предельно допустимые, проводится соответствующий подъем антенны или угла ее наклона. Этот метод не является чисто организационным. Он предполагает проведение дополнительных строительных и инженерных работ: создание насыпей и т.д., а вследствие подъема антенны или угла наклона диаграммы направленности многие характеристики радиоизлучающего объекта могут измениться. После проведения защитных мер для снижения уровня интенсивности при рациональном размещении объектов обязателен инструментальный контроль над уровнем излучения.

Инженерно-технические меры, защиты применяются в тех случаях, когда исчерпана эффективность организационных мер.

При организации инженерно-технических мер защиты от ЭМИ всегда надо учитывать принципы, на основе которых действуют те или иные защитные средства, устройства, конструкции. В этих случаях основными принципами являются сквозное и дифракционное затухание и радиопоглощение.

Сквозное затухание обусловлено проникновением электромагнитной энергии через какой-либо материал или изделие из этого материала и определяет кратность защиты. Все эти процессы протекают в экранах и экранирование является наиболее эффективным методом защиты.

Экранирование используется для снижения интенсивности ЭМП на рабочем месте (экранирование рабочего места) или ограждения опасных зон излучения (экранирование самого источника).

Наибольшим сквозным затуханием обладают сплошные металлические экраны. Металлические экраны по принципу защиты относятся к отражающим экранам, так как под воздействием ЭМП в

материале экрана возникают вихревые токи, которые в свою очередь создают электромагнитное поле, направленное в противоположную подающему полю сторону.

Толщина экрана изготовленного из сплошного материала определяют по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta}{\sqrt{15,4(f\mu\rho)^{1/2}}},$$

где Δ – заданное ослабление интенсивности поля, определяемое как частное от деления фактической интенсивности поля на допустимую по нормам; f – частота ЭМП, Гц; μ – магнитная проницаемость материала экрана, Гн/м; ρ – удельная проводимость материала экрана, см/м.

Эффективность экранирования на практике определяется по формулам:

$$\Delta = 20 \lg \frac{E_1}{E_2}, \Delta = 20 \lg \frac{H_1}{H_2}, \Delta = 20 \lg \frac{S_1}{S_2},$$

где Δ – эффективность экранирования, дБ; E_1, H_1, S_1 – соответственно напряженность электрического, магнитного полей и плотность потока энергии ЭМП в данной точке при отсутствии экрана; E_2, H_2, S_2 – соответственно напряженность электрического, магнитного полей и плотность потока энергии ЭМП в данной точке при наличии экрана.

3.5.1. Персональные компьютеры

Для снижения уровней излучений персональных компьютеров, воздействующих на человека, разрабатываются в следующих направлениях:

- создание малоизлучающих видеодисплейных терминалов;
- применение внешних экранов и других средств защиты;
- переход на технику отображения без использования электронно-лучевых трубок.

Электромагнитное излучение с поверхности и через поверхность экрана электронно-лучевой трубки может быть частично экранировано с помощью проводящего покрытия, наносимого на внутреннюю или внешнюю поверхность предохранительного стекла; или же с помощью дополнительного защитного фильтра, который располагается перед экраном.

Выбор материала экрана зависит от остаточного электромагнитного излучения в требуемом диапазоне частот, уровня яркости экрана электронно-лучевой трубки и требований по психофизическим параметрам и восприятию изображения.

В зависимости от требуемой эффективности экранирования просветного электромагнитного экрана количество токопроводящих слоев в нем (из одного материала или нескольких) варьируется от одного до пяти, причем лицевая поверхность может иметь или не иметь антибликовое покрытие.

В табл. 3.5.3 приведены параметры исследованных просветных электромагнитных экранов.

Таблица 3.5.3

Параметры исследованных просветных электромагнитных экранов

№ п/п	Краткая характеристика экрана	Коэффициент пропускания, %	Шаг сетки, мкм	Толщина нити, мкм	Материал нити
1	Металлическая сетка, натянутая на рамку	30	96	40	БрО6S-0,4
2	Металлическая сетка, натянутая на рамку	35	160	60	Л80
3	Металлическая сетка, натянутая на рамку	63	155	30	БрО6S-0,4
4	Металлическая сетка, расположенная между двумя стеклянными пластинами; толщина панели 7 мм	50	157	40	БрОФС-0,4
5	Сетка из полиэфирной нити с токопроводящим и антиотражающим покрытием SunFlex (Англия)	45	107	61	

На рис. 3.5.4 показана зависимость затухания электромагнитного излучения (S_E) от частоты (f) при использовании различных типов электромагнитных экранов. (Типы и характеристики всех указанных сеточных металлических материалов эффективность экранирования не уменьшается с увеличением частоты, как это происходит у сетки с полиэфирными нитями, а остается практически на высоком уровне. Лучшими экранирующими свойствами обладает сетка № 1 с меньшим коэффициентом пропускания. Однако недостатком, и довольно значительным, является ее низкое светопропускание приводящее к сильному понижению яркости экрана электронно-лучевой трубки.

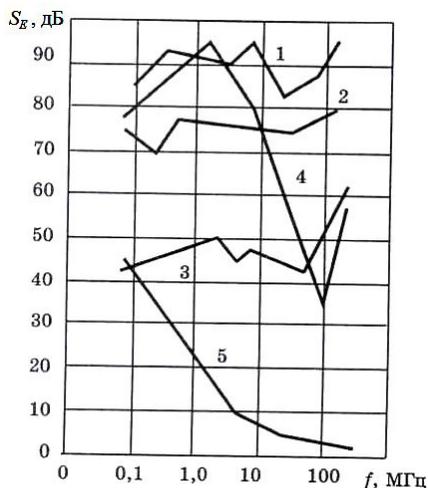


Рис. 3.5.4. Зависимость затухания электромагнитного излучения (S_g) от частоты (f) при использовании различных типов электромагнитных экранов

3.5.2. Экранирующий корпус

Электрические излучения, генерируемые цепями, находящимися внутри устройства видеодисплейного терминала, могут быть заэкранированы с помощью металлического кожуха. Но такой кожух обладает множеством недостатков (например, высокая стоимость и нетехнологичность изготовления). Поэтому в последние годы ведутся исследования формовочных материалов, состоящих из полимерных смол, таких, как полипропилен и др., с наполнителями из алюминиевых чешуек, латунных волокон и других металлических наполнителей для использования их в качестве материала для изготовления кожухов видеодисплеев – этот метод экранирования признан наиболее перспективным.

В последнее время в качестве наполнителя для производства материалов, из которых изготавливают кожухи-корпуса для экранирования от электромагнитного излучения, рассматриваются волокна из нержавеющей стали. Перспективность этого направления объясняется сравнительной дешевизной их изготовления, обусловленной тем, что диаметр волокон невелик (менее 10 мкм), а прочность на растяжение достаточна для получения сравнительно длинных волокон.

Краткая сводка характеристик наполнительных субстанций, применяемых при изготовлении материалов для защитных кожухов, представлена в табл. 3.5.4.

Таблица 3.5.4

Свойства наполнительных субстанций

Параметр	Материал				
	Волокна из нержавеющей стали	Латунные волокна	Алюминиевые чешуйки	Сажа	Металлизованные стекловолокна
Размер	D 8–10 мкм, длина 3–10 мм	D 40–60 мкм, длина 2–5 мм	$1 \times 1,5 \times 5$ толщина 30–60 мкм		D 10–30 мкм, длина 3–6 мм
Наполняемость (%) по весу	5–15	40–60	20–40	20–50	20–40
Удельная масса (кг/м ³)	7,8	8,4	2,7	1,9	3,2–4,1
Стойкость к воспламенению	Хор.	Удовл.	Удовл.	Плохо	Удовл.
Внешний вид	Хор.	Плохо	Удовл.	Удовл.	Удовл.

Эффективность экранирования источников ЭМП экранами различной конструкции приведена в табл. 3.5.5.

Однако для конкретных гигиенических целей выбор толщины материала защиты не имеет принципиального значения и диктуется только экономическими соображениями. Поэтому предпочтение отдается тонкой металлической фольге в несколько сотых миллиметра либо сетчатым экранам. Оценку кратности защиты материалов можно проводить по номограммам (рис. 3.5.5, 3.5.6).

Таблица 3.5.5

Эффективность экранирования различных экранов, дБ

Материал, конструкция экрана	Диапазон частот, МГц				
	0,15–3	3–30	30–300	300–3000	3000–10 000
Сталь листовая: сварка непрерывным швом листы, скрепленные болтами (шаг 50 мм)	100	100	100	100	100
	75	60	–	–	–
Жест (фальцем): непрерывная пайка без пайки	100	100	100	100	100
	100	100	60	50	40

Сетка металлическая с ячейкой 1×1,5 мм	80	60	50	40	25
Фольга (алюминиевая) (склейка внахлест)	100	80	80	70	60
Токопроводящая краска (сопротивление 60 м)	70	40	30	40	40
Металлизация (расход металла 0,3 кг/м ²)	100	80	60	50	40
Экранирование смотровых и оконных проемов: сотовая решетка стекло с токопроводящей	100	100	100	–	–
	70	30	–	30	30

Примечание. Отсутствие в таблице цифровых значений для отдельных экранов означает, что рассматриваемый вариант применять не рекомендуется или он является нереализуемым.

Номограмма 3.5.5 построена для случаев, когда направление падающей волны перпендикулярно к поверхности защитной сетки, состоящей из проволочных линий, а вектор электрической составляющей параллелен им. Эта номограмма позволяет проводить оценку эффективности сеток независимо от материала изготовления. На величину сквозного затухания влияет ориентация электромагнитной волны по отношению к направленности проводов и плоскости сетки. Так, при параллельной поляризации с уменьшением угла падения электромагнитного луча от 90 до 30° происходит усиление сквозного затухания на 3–10 дБ, при перпендикулярной поляризации – ослабление на 3–10 дБ в зависимости от частоты излучения и характеристики сетки.

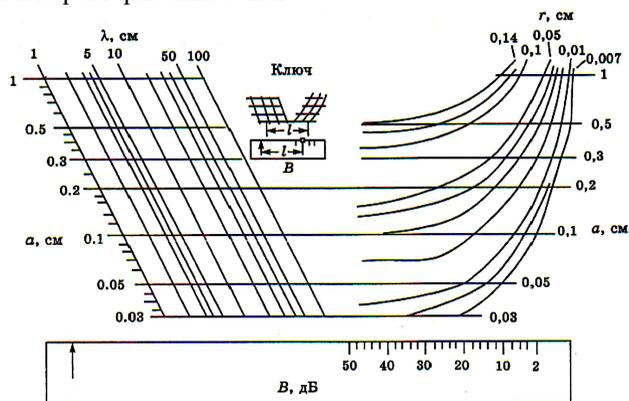


Рис. 3.5.5. Номограмма для определения ослабления ЭМИ металлическими сетками:

B – ослабление ЭМИ, дБ; λ – длина волны излучения, см; r – толщина провода, см;
 a – размер ячейки, см

Пример определения: Дано: $\lambda = 10$ см; $r = 0,1$ см; $a = 0,5$ см. Требуется определить B . На номограмме в бинарных полях (λ, a) и (r, a) находим точки с пометками (10; 0,5) и (0,1; 0,5) соответственно. Затем отрезок, равный расстоянию между этими точками, откладываем от фиксированной точки (стрелки) до пересечения со шкалой B , где и читаем ответ: $B = 32$ дБ

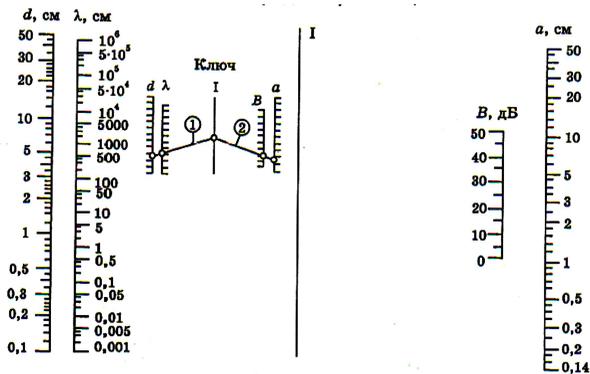


Рис. 3.5.6. Номограмма для определения ослабления ЭМИ перфорированными радиоотражающими листами:

B – ослабление ЭМИ, дБ; λ – длина волны излучения, см; d – толщина провода, см;
 a – расстояние между центрами отверстий, см

Пример определения: Дано: $\lambda = 5$ см; $d = 1$ см; $a = 2$ см. Требуется определить B . На шкалах d и λ находим точку с пометками 1 и 5 соответственно и соединяем их прямой. На вспомогательной линии I отмечаем точку и соединяем ее с точкой шкалы a , имеющей пометку 2. В точке пересечения со шкалой B читаем ответ: $B = 19,5$ дБ

3.5.3. Строительные материалы

Экранирующие свойства строительных материалов.

Определенными защитными свойствами, оцениваемыми по степени сквозного затухания, обладают строительные материалы и конструкции из них, сравнительная характеристика которых представлена в табл. 3.5.6.

Таблица 3.5.6

Характеристика защитных свойств строительных материалов и изделий из них при действии микроволн (Кошелев Н.Ф., Карелин О.Н., 1974; Шандала М.Г. и др., 1996)

Наименование материала или	Толщина,	Сквозное затухание (дБ) на частоте
----------------------------	----------	------------------------------------

		3,0 ГГц	10,0 ГГц	37,5 ГГц
Кирпич	12	15	15	15
Металлизированный стеклянный кирпич	–	25	25	25
Штукатурка	1,8	–	8	12
Стекло	0,28	–	2	2
Доска	5,0	8,4	–	–
»	3,5	5,0	–	–
»	1,6	2,8	–	–
Фанера	0,4	–	1	2
Древесностружечная плита	1,8	3,2	–	–
Шлакобетонная стена	46	14,5	20,5	–
Капитальная стена здания	70	16	21	–
Оштукатуренная стена	15	8	12	–
Междуэтажная перегородка	80	20	22	–
Окно с двойными рамами	–	7	13	–
Окно с одинарной рамой	–	4,5	–	–

В случаях, когда фронт падающей волны сталкивается с кромкой каких-либо экранирующих средств, приходится оценивать дифракционное затухание. При этом эффективность защитных мероприятий будет определяться превышением уровня защитного экрана по отношению к источнику и объекту облучения.

Радиопоглощающие материалы. Защита, основанная на принципе радиопоглощения, применяется при создании аналогов свободного пространства при антенных нагрузках; при невозможности применения каких-либо других защитных материалов вследствие возможного нарушения технологического процесса; при обкладывании мест стыков внутренней поверхности шкафов с генераторной и усилительной аппаратурой, генерирующей ЭМИ; при закладывании щелей между теми деталями волноведущих структур, которые не могут быть соединены сваркой или пайкой. Используемые радиопоглощающие материалы должны отвечать следующим требованиям: максимальное поглощение электромагнитных волн в широком частотном диапазоне, минимальное отражение, отсутствие вредных испарений, пожаробезопасность, небольшие габариты и вес.

По максимальному поглощению и минимальному отражению лучшими качествами обладают материалы с ячеистой структурой, пирамидальной или шиловидной поверхностью.

Радиопоглощающие материалы разделяются на материалы интерференционного типа, где гашение электромагнитных волн происходит за счет интерференции, и материалы, в которых

электромагнитная энергия превращается в тепловую за счет наведения рассеянных токов, магнитоги-стерезисных или высокочастотных диэлектрических потерь. По электрическим и магнитным свойствам различают диэлектрические и магнитодиэлектрические материалы, по рабочему диапазону частот поглощения – узко- и широкодиапазонные. Со стороны, не подлежащей облучению, радиопоглощающие материалы покрываются, как правило, радиоотражающими покрытиями, в результате чего характеристики всей радиоэкранирующей конструкции во многом улучшаются. Критерием, характеризующим защитные свойства радиопоглощающего материала, выступает коэффициент отражения по мощности. Технические характеристики некоторых радиопоглощающих материалов представлены в табл. 3.5.7

Таблица 3.5.7

Характеристика радиопоглощающих материалов, используемых для создания средств защиты от ЭМИ РЧ и СВЧ

Наименование материала	Рабочая частота излучения, ГГц	Коэффициент отражения, %
1	2	3
Резиновые коврики:		
В2Ф2	7,5–37,5	2
В2Ф3	7,5–37,5	2
ВКФ-1	7,5–37,5	2
Магнитодиэлектрические пластины:		
ХВ-0,8	37,5	2
ХВ-2,0	15,0	2

Окончание табл. 3.5.7

1	2	3
ХВ-3,2	9,4	2
ХВ-4,4	6,8	2
ХВ-6,2	4,8	2
ХВ-8,5	3,5	2
ХВ-10,6	2,8	2
СВЧ-068	0,15–2,0	3–4
Поглощающие материалы на основе поролона:		
Б-2	37,5	2
Б-3	1,1	2
БР-3	0,75	2
ВРПМ	Не выше 10,0	1–2

Поглощающие материалы на основе древесины:		
ЛУЧ-50	1,5–37,5	3
ЛУЧ-100	0,75–3,5	3
ЛУЧ-150	0,5–37,5	3
Текстолит графитированный N 369-61	1,9–37,5	до 50
Краска НТСО 14-003	1,9–37,5	до 50

Принцип поглощения электромагнитной энергии лежит в основе применения *поглотителей мощности*, используемых в качестве нагрузок на генераторы вместо открытых излучателей. Таким образом, обеспечивается защита пространства от проникновения в него ЭМИ. Поглотители мощности – это отрезки коаксиальных или волноводных линий, частично заполненных поглощающими материалами.

Энергия излучения поглощается в наполнителе, преобразуясь в тепловую. Заполнителями могут быть: чистый графит (или в смеси с цементом, песком, резиной, керамикой, порошковым железом), дерево, вода. Поглотители мощности ослабляют электромагнитные излучения в 10^5 и более раз (рис. 3.5.7). Для понижения уровня мощности излучения в тракте (или на открытое излучение) можно применять и *аттенюаторы*, которые бывают переменными и постоянными (рис. 3.5.8, рис. 3.5.9). Атеннюаторы работают по принципу поглощения электромагнитных колебаний материалами с большим коэффициентом поглощения (резина, полистирол и др.), их разделяют на поглощающие и предельные. Поглощающие являются отрезками коаксиальной или волноводной защиты, в которой помещены детали с радиоизлучающим покрытием. Предельные аттенюаторы представляют собой отрезки круглых волноводов, диаметр которых значительно меньше критической длины волны в рабочем диапазоне длин волн данного аттенюатора. В этом случае мощность излучения, проходящего по аттенюатору, затухает по экспоненциальному закону.

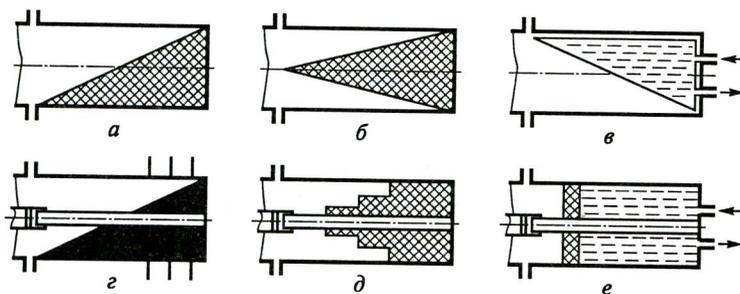


Рис. 3.5.7. Конструкции поглотителей мощности для волноводов и коаксиальных линий:

a, z – скошенные; *б, в* – клинообразные; *д* – ступенчатые; *е* – в виде шайбы

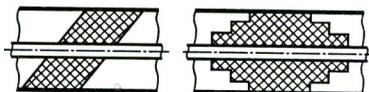
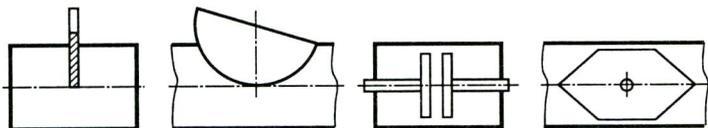


Рис. 3.5.8. Постоянные аттенуаторы



a

б

Рис. 3.5.9. Переменные аттенуаторы:

a – ножевого типа; *б* – пластинчатого типа

При нахождении источников ЭМИ внутри помещений защиту целесообразно проводить в местах проникновения электромагнитной энергии из экранирующих кожухов, улучшать методы радиогерметизации стыков и сочленений, применять насадки с радиопоглощающей нагрузкой. При внешних источниках применяются различные защитные изделия из радиоотражающих материалов: металлизированные обои, металлизированные шторы, сетки на окнах и другие. Наибольшей эффективностью эти защитные средства обладают в СВЧ диапазоне, на более низких частотах их применение ограничено дифракцией.

В некоторых случаях для защиты от излучений внешних источников используют специальные коридоры со стенками из радиоотражающих материалов (листовой алюминий, латунная сетка и т.п.). Оценка эффективности перечисленных коллективных средств защиты производят по степени сквозного и дифракционного затуханий.

Лесонасаждения. Использование в качестве защиты лесонасаждений также основано на радиопоглощении. Защитный эффект лесонасаждений наиболее выражен, когда они находятся в непосредственной близости от защищаемого объекта. При этом учитывается только степень сквозного затухания. При большой протяженности объекта в глубину и густой защитной полосе из высоких деревьев необходимо учитывать дифракционное затухание.

Экранирующие ткани. В основе использования средств индивидуальной защиты от ЭМИ лежат принципы сквозного затухания. Экранирующие свойства тканей определяются удельным содержанием металлизированных нитей в основе и утке. Характер взаимного расположения нитей в виде решетки обуславливает способность ткани защищать от ЭМИ различных поляризаций. До настоящего времени у нас в стране было разработано два типа защитной ткани: с открытой и скрытой металлизацией.

Ткань первого типа изготавливается из хлопчатобумажных нитей, на которые накручивается металлическая фольга. Сплетенная из таких нитей ткань имеет металлический блеск. Хотя некоторые ткани имеют достаточные экранирующие свойства, они не нашли широкого применения, так как костюмы из них, с одной стороны, производят нежелательное психологическое воздействие на окружающих, с другой стороны – человек в этом костюме ощущает в электрических полях легкое покалывание током, вызывающее неприятные ощущения. Увеличивается опасность электротравм. К этой группе относятся также ткани типа парчи и шоопированная ткань.

Защитная ткань второго типа имеет скрытую металлизацию. В этом случае тонкая прочная микропроволока вплетается внутрь хлопчатобумажной нити. Изготовленная из таких нитей ткань не имеет недостатков, присущих ткани с открытой металлизацией, и по внешнему виду не отличается от обычной.

До последнего времени широко применялась ткань В-1. По основе она содержит на 10 см длины 320 нитей. Из них каждые 2 нити из 3 имеют внутри микропровод. По утку на 10 см содержится 210 нитей, каждая из которых имеет внутри микропровод. По основе данная ткань ослабляет сантиметровые волны на 23,5 дБ (в 225 раз), по утку – на 23,83 дБ (в 241 раз). Защитные свойства этой ткани представлены в табл. 3.5.8. При этом ослабление в диапазоне частот излучения 0,6-10 ГГц составляет 20–50 дБ. На более высокой частоте облучения степень защиты уменьшается, поэтому верхняя граница применения средств индивидуальной защиты (СИЗ) из такого материала составляет несколько десятков ГГц, нижняя – 0,3–0,6 ГГц. Эти ограничения в ГГц-диапазоне связаны с тем, что не обеспечивается достаточный контакт между проводниками ткани, а в МГц-диапазоне – с появлением резонансных изменений величины затухания при соизмеримости длины волны излучения с размерами одежды. В некоторых случаях с целью повышения эффективности защиты, места швов отдельных элементов одежды пропитывают электропроводящей массой или клеем. В последнее время разработана новая

радиоэкранирующая ткань типа «Восход на основе полимерных волокон с покрытием из меди, никеля и других металлов. Результаты измерения значений коэффициентов ослабления этих тканей приведены в табл. 3.5.8.

Таблица 3.5.8

Защитные свойства различных типов экранирующих тканей

Частота излучения, ГГц	Ослабление, дБ			
	В-1	«Восход-1Н»	«Восход-10Н»	«Восход 12НМ»
37,5	20	–		–
9,3	28	–	70	70
3,0	40	–	70	70
1,2	43	40	81	99
0,6	46	44	75	98
0,3	54	47	70	99

3.5.4. Индивидуальные средства защиты

Индивидуальные средства защиты могут конструироваться по принципу тотальной (радиозащитные костюмы, комбинезоны в комплекте со шлемами, масками, бахилами, перчатками) либо локальной защиты (очки, фартуки, шлемы, капюшоны и др.) (рис. 3.5.10). Эффективность костюма может достигать 25–30 дБ. Сам принцип использования СИЗ предусматривает их непродолжительное ношение, как правило, при аварийных ситуациях, испытаниях радиоизлучающих средств, выполнении ремонтных работ в зоне облучения при невозможности остановки аппаратуры, генерирующей ЭМИ. Поступаемые на снабжение СИЗ от ЭМИ далеки от совершенства и сами по себе нуждаются в дальнейшей разработке, в том числе поиске новых видов материалов для изготовления. Существующие СИЗ неудобны в эксплуатации (например, радиозащитный комбинезон весьма тяжел и неудобен, требует специального заземления, допустимая величина сопротивления, которого не должна быть более 10 Ом).

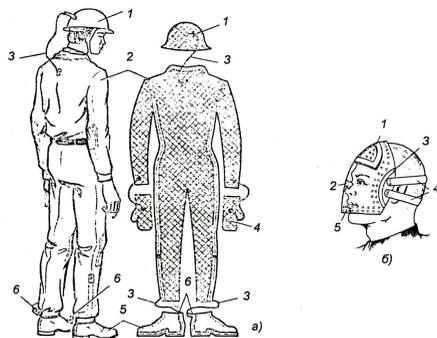


Рис. 3.5.10. Средства защиты от электромагнитных излучений:

а – радиозащитный костюм: 1 – металлическая или металлизированная каска; 2 – комбинезон из токопроводящей ткани; 3 – проводники, обеспечивающие электрическую связь между отдельными элементами экранирующего костюма; 4 – рукавицы из токопроводящей ткани; 5 – ботинки с электропроводящими подошвами; 6 – вывод от токопроводящей подошвы; б – защитная маска с перфорационными отверстиями: 1, 2, 3 – поролоновые прокладки; 4 – ремни крепления маски; 5 – перфорационные отверстия

Защитные очки. К индивидуальным средствам локальной защиты можно отнести шлем, маски, очки, которые применяются как отдельно, так и в комплексе с другими средствами индивидуальной защиты. Линзы очков изготавливают из специального стекла (например, покрытого двуокисью олова – ТУ 166–63), вырезанного в виде эллипсоидов с размером полукруга 25×17 мм и вставленного в оправу из пористой резины с вшитой в нее металлической сеткой. Эффективность этих очков оценивается в 25–30 дБ.

Для изготовления защитного стекла можно использовал различные материалы. Это зависит от степени их оптической прозрачности и защитных свойств для определенных частот ЭМИ (табл. 3.5.9). Защитные свойства очков оцениваются по степени затухания примененного стекла. Следует иметь в виду, что защиту очками до 10 дБ можно получить лишь на частоте излучения более 3 ГГц. При более низких частотах (менее 1–2 ГГц) они бесполезны.

Таблица
3.5.9
Характери
стиче

Оптическая прозрачность	49	24	3,2	50	85	80	45	73
-------------------------	----	----	-----	----	----	----	----	----

Наименование защитного материала	Толщина покрытия	Сквозное затухание микроволн (дБ) на частотах		
		5,9 ГГц	9,7 ГГц	18,8 ГГц
Золотая пленка	11 нм	6,4	10,0	21,0
Золотая пленка	30 нм	28,0	30,0	40,0
Золотая пленка	75 нм	34,0	40,0	57,8
Медная сетка	8 яч./см	30,0	27,0	27,0
Стекло с проводящим покрытием 30 Ом	450 нм	8,0	8,0	8,0
Стекло с проводящим покрытием 70 Ом	300 нм	10,4	10,0	9,0
Стекло с проводящим покрытием 150 Ом	1,5 нм	20,4	19,2	31,0
Стекло с окисно-металлизированной пленкой ГУ 166-63	—	20,0	20,0	20,0

Защитные маски. Защитные маски изготавливаются из любого светопрозрачного материала с включением в него каких-либо радиоотражающих структур: напыление металлом, пленки из окислов металлов, покрытие из металлизированных сеток.

Форма и размер маски выбираются так, чтобы величина дифракционного затухания на уровне глаз была не менее затухания

защитного материала. С целью обеспечения дыхания и теплообмена в защитной маске по ее периметру делают перфорационные отверстия. Для повышения затухания ЭМИ перфорационным материалом внутреннюю поверхность отверстий по всей толщине маски покрывают радиозащитным материалом.

Защитные шлемы, фартуки, куртки, бахилы. Чтобы обеспечить необходимую эффективность защиты, шлемы, фартуки, куртки, бахилы и другие элементы локальной защиты изготавливают с учетом требований сквозного, дифракционного затухания.

В практической деятельности необходимо иметь в виду, что защитные свойства материалов от ЭМИ и изделий из них – не одно и то же. Это связано с различными радиочастотными свойствами защитных изделий в целом, наличием мест стыков отдельных частей конструкций. Неизбежным является появление резонансных эффектов, свойственных различным неровностям на изделиях, размеры которых кратны длине волны действующего ЭМИ. Надо отметить, что если пренебречь данными эффектами, то сквозное затухание какого-либо материала всегда больше его сквозного затухания в конструкции. Хотя большинство методов измерений рассчитано только на определение экранирующих свойств материалов, они пригодны и для изделий в целом.

3.6. Измерение электромагнитных полей

В России аттестованы и рекомендованы Госстандартом как измерительные средства для контроля электромагнитных полей в соответствии с ГОСТ Р 50948-96, ГОСТ Р 5949-96 и СанПин 2.2.2.542-96 следующие приборы разработанные Фрязинским НПП «Циклон-Тест»:

1. ИЭП-04 – измеритель напряженности электрической составляющей переменного электромагнитного поля, входящий в комплект измерителей электрических и магнитных полей.

«Циклон-04» (рис. 3.6.1), предназначен для сертификационных испытаний компьютерной и офисной техники по требованиям государственных стандартов и санитарных норм Российской Федерации на электромагнитную безопасность (ГОСТ Р 50948-96, ГОСТ Р 50949-96, СанПиН 2.2.2.542-96, СанПиН 001-96), пространственного обследования интенсивности низкочастотных полей вблизи технических средств и контроля биологически опасных уровней полей на рабочих местах с техническими средствами, в том числе неионизирующих излучений компьютерной техники по

требованиям СанПиН 2.2.2.542–96 и ГОСТ Р 50923–96. В табл. 3.6.1 представлены технические и эксплуатационные характеристики «Циклон-04».



Рис. 3.6.1. Комплект измерителей электрических и магнитных полей «Циклон-04»

Таблица 3.6.1

Технические и эксплуатационные характеристики «Циклон-04»

Диапазон измеряемых уровней полей		Диапазон частот измерения		Комплектность каждого из приборов	Эксплуатационные характеристики	
Напряженность электрического поля для ИЭП-04, В/м	Магнитная индукция (плотность магнитного потока) для ИМП-04, нТл	Полоса I, Гц Полоса II, кГц	5–2000 2–400	Индикаторный блок	Потребляемая мощность (каждого из приборов), Вт, не более	Габаритные размеры (индикаторного блока), мм
0,7–1000	7–5000	Основная погрешность измерения, %, не более	± 10	Сменные антенны	2	170×170×90

Состав комплекта: измеритель напряженности переменного электрического поля (ИЭП-04) и измеритель магнитной индукции переменного магнитного поля (ИМП-04).

Измеритель ИЭП-04 снабжен как дисковой антенной (дисковым пробником) для контроля излучений компьютерной

техники в соответствии с ГОСТ Р 50949–96, так и дипольной антенной для контроля электрических излучений от любых иных технических средств и в окружающей среде.

2. ИЭП-05 – (рис. 3.6.2) предназначен для оперативного контроля рабочих мест при вводе их в эксплуатацию и инструментального контроля опасных и вредных производственных факторов при аттестации рабочих мест по условиям труда, пространственного обследования интенсивности низкочастотных полей вблизи технических средств и контроля биологически опасных уровней полей на рабочих местах с техническими средствами, в том числе неионизирующих излучений компьютерной техники по требованиям СанПиН 2.2.2.542–96 и ГОСТ Р 50923–96.



Рис. 3.6.2. Комплект измерителей электрических и магнитных полей «Циклон-05»

Технические и эксплуатационные характеристики «Циклон-05» представлены в табл. 3.6.2.

Состав комплекта: измеритель напряженности переменного электрического поля (ИЭП-05), измеритель магнитной индукции переменного магнитного поля в диапазоне частот 5–2000 Гц (ИМП-05/1), измеритель магнитной индукции переменного магнитного поля в диапазоне частот 5–2000 Гц (ИМП-05/2).

Измеритель ИЭП-05 снабжен как дисковой антенной (дисковым пробником) для контроля полей компьютерной техники в соответствии с ГОСТ Р 50949–96, так и дипольной антенной для контроля электрических полей от любых иных технических средств и в окружающей среде.

Таблица 3.6.2

Технические и эксплуатационные характеристики «Циклон-05»

Диапазон измеряемых уровней полей		Диапазон частот измерения		Эксплуатационные характеристики	
Напряженность электрического поля, В/м	Магнитная индукция (плотность магнитного потока), нТл	Полоса I, Гц Полоса II, кГц	5–2000 2–400	Потребляемая мощность (каждого из приборов), Вт, не более	Масса каждого из приборов, кг
0,7–20	7–200	Основная погрешность измерения, %, не более	± 20	0,3	0,75–0,9

Конструктивно приборы размещены в небольшом пластмассовом кейсе и имеют кроме питания от сети 220 В (через выносной источник) также автономное питание от элементов типа «Корунд».

Заключение

Вопросы обеспечения безопасности труда персонала при работе с источниками ионизирующих, лазерных и электромагнитных излучений имеют большое значение при подготовке дипломированных специалистов специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств».

Авторы надеются, что внимательное изучение изложенного в пособии материала позволит им принимать правильные решения в конкретных производственных условиях и ситуациях, создавая этим безопасные условия высокопроизводительного труда.

Библиографический список

1. *Глебова, Е.В.* Производственная санитария и гигиена труда: учеб. пособие для вузов / Е.В. Глебова. – М.: Высш. шк., 2007. – 382 с.
2. *Грачев, Н.Н.* Защита человека от опасных излучений / Н.Н. Грачев, Л.О. Мырова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 317 с.
3. *Авраамов, Ю.С.* Защита человека от электромагнитных воздействий / Ю.С. Авраамов, Н.Н. Грачев, А.Д. Шляпин. – М.: МГИУ, 2002. – 232 с.
4. *Тарасов, Л.В.* Лазеры: действительность и надежды / Л.В. Тарасов. – М.: Наука, 1985. – 176 с.
5. *Айден, К.* Аппаратные средства РС: перевод с нем. / К. Айзен. – С.-Пб.: ВНУ-СПб, 1996. – 544 с.
6. *Ландсберг, Г.С.* Элементарный учебник физики: в 3 т. – Т. 3 / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1986. – 656 с.
7. *Мякишев, Г.Я.* Физика / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев. – М.: Просвещение, 1998. – 254 с.
8. *Брюннер, В.* Справочник по лазерной технике / В. Брюннер, К. Юнге / под ред. А.П. Напартовича. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 526 с.
9. *Приезжев, А.В.* Лазерная диагностика в биологии и медицине / А.В. Приезжев, В.В. Тучин, Л.П. Шубочкин. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
10. *Кирилова, О.В.* Защита от электромагнитного излучения / О.В. Кирилова. – М.: Радио и связь, 1992. – 400 с.
11. *Дубров, А.П.* Земное излучение и здоровье человека / А.П. Дубров. – М.: Аргументы и факты, 1992. – 64 с.
12. Радиация. Дозы, эффекты, риск: пер с англ. Ю.А. Банникова – М.: Мир, 1988. – 80 с.
13. *Рахманов, Б.Н.* Безопасность при эксплуатации лазерных установок / Б.Н. Рахманов, Е.Д. Чистов. – М.: Машиностроение, 1981. – 113 с.
14. *Маргулис, У.Я.* Безопасность при эксплуатации лазерных установок / У.Я. Маргулис, Ю.И. Бергадзе. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 120 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. Ионизирующие излучения.....	5
1.1. Природа ионизирующих излучений.....	5
1.2. Основные виды и характеристики ионизирующих излучений.....	10
1.3. Дозы облучения.....	14
1.4. Источники радиации.....	17
1.4.1. Естественные источники радиации.....	18
1.4.2. Искусственные источники радиации.....	28
1.5. Действие радиации на человека.....	36
1.5.1. Биологическое действие ионизирующих излучений.....	42
1.5.2. Генетические последствия облучения.....	44
1.6. Нормирование ионизирующего излучения.....	45
1.7. Защита от ионизирующего облучения.....	48
1.8. Радиоактивные отходы и их ликвидация.....	59
1.9. Методы регистрации и дозиметрии излучений.....	61
1.9.1. Ионизационный метод регистрации излучения.....	62
1.9.2. Люминесцентные методы дозиметрии.....	69
1.9.3. Калориметрический метод дозиметрии.....	73
1.9.4. Химический метод дозиметрии.....	75
2. Лазерное излучение.....	75
2.1. Основные свойства лазерного луча.....	77
2.2. Принцип действия лазера.....	83
2.2.1. Активные вещества.....	85
2.2.2. Способы и источники возбуждения.....	86
2.2.3. Резонансные системы.....	88
2.3. Характеристики некоторых типов лазеров.....	89
2.4. Применение лазерного луча в промышленности и технике.....	100
2.5. Использование лазеров в информационных технологиях.....	107
2.6. Лазеры в вычислительной технике.....	109
2.7. Лазерное оружие.....	110
2.7.1. Применение лазеров в военной технике (лазерная локация).....	113
2.8. Применение лазеров в медицине и биологии.....	122
2.9. Лазеры в химии.....	127
2.10. Лазеры и фотография.....	129
2.11. Применение голографии.....	134
2.12. Классификация лазеров по степени опасности.....	135
2.13. Гигиеническое нормирование лазерного излучения.....	137
2.14. Воздействие лазерного излучения на человека.....	144
2.15. Защита от лазерного излучения.....	148
2.16. Приборы для контроля лазерного излучения.....	154
3. Электромагнитные поля.....	157
3.1. Общая характеристика электромагнитных полей.....	157
3.1.1. Электрические поля.....	161
3.1.2. Магнитные поля.....	161
3.2. Источники электромагнитных полей.....	162
3.2.1. Микроволновая печь.....	164
3.2.2. Радары.....	164
3.2.3. Системы спутниковой связи.....	165
3.2.4. Теле- и радиостанции.....	167
3.2.5. Сотовая связь.....	167

3.2.6. Персональный компьютер.....	169
3.2.7. Электромагнитные излучения промышленной частоты.....	171
3.2.8. «Безопасность» Notebook.....	174
3.2.9. Излучения сотовых телефонов.....	174
3.2.10. Магнитные поля на транспорте (электротранспорт).....	176
3.3. Воздействие электромагнитных полей на организм человека.....	176
3.4. Нормирование электромагнитных полей.....	180
3.4.1. Геомагнитное поле.....	180
3.4.2. Электростатическое поле.....	181
3.4.3. Постоянное магнитное поле.....	181
3.4.4. Электромагнитные поля частотой 50 Гц.....	182
3.4.5. Электромагнитное поле диапазона радиочастоты 10–30 кГц.....	182
3.4.6. Электромагнитные поля радиочастот 30 кГц–300 ГГц.....	182
3.4.7. Электромагнитные поля, создаваемые мобильными телефонами...	183
3.5. Защита от воздействия электромагнитных излучений.....	184
3.5.1. Персональные компьютеры.....	191
3.5.2. Экранирующий корпус.....	193
3.5.3. Строительные материалы.....	197
3.5.4. Индивидуальные средства защиты.....	202
3.6. Измерение электромагнитных полей.....	205
Заключение.....	209
Библиографический список.....	210

Учебное издание

Залаева Светлана Шагитовна
Рыбка Оксана Александровна
Золотухина Дина Сергеевна

Производственная санитария и гигиена труда

Часть 3

Ионизирующие излучения, лазерные излучения
и гигиена труда

Учебное пособие

Подписано в печать 25.12.08. Формат 60×84/16. Усл.печ.л. 12,5. Уч-изд.л. 13,4.

Тираж 100 экз.

Заказ

Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46