

С.М. Аполлонский

ЗАЩИТА ТЕХНОСФЕРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

В ТРЕХ ТОМАХ

Том 1

Виды физических полей и излучений.
Нормативно-правовые документы

Монография

RU
Science
RU-SCIENCE.COM

Москва
2016

УДК 504.75
ББК 20.1
А76

Аполлонский С.М.

А76

Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В трех т. Т. 1. Виды физических полей и излучений. Нормативно-правовые документы : монография / С.М. Аполлонский. — М. : РУСАЙНС, 2016. — 334 с.

ISBN 978-5-4365-0778-1

DOI 10.15216/978-5-4365-0778-1

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами безопасности технических средств и человека при воздействии физических полей и излучений; для магистров, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области электромагнитной безопасности технических средств и биообъектов, а также для студентов технических учебных заведений, изучающих влияние на биосферу физических полей и излучений, включающих неионизирующие электромагнитные излучения, ионизирующие излучения и виброакустические воздействия. Рассмотренные вопросы могут оказаться полезными для медицинских работников, сталкивающихся с рассмотренными проблемами в практической деятельности.

The book is intended for scientific and technical workers, dealing with the safety of technical facilities and on exposure to the physical fields and radiation; for graduate, post-graduate students and researchers specializing in the field of electromagnetic safety of technical devices and biological objects, as well as for students of technical schools, studying the impact on the biosphere of physical fields and radiation, including non-ionizing electromagnetic radiation, ionizing radiation, and vibro-acoustic effects. The above questions can be useful for health professionals faced with addressing the problem in practice.

**УДК 504.75
ББК 20.1**

ISBN 978-5-4365-0778-1

© Аполлонский С.М., 2016
© ООО «РУСАЙНС», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Каждый элемент техносферы, будь то техническое средство (ТС) или биоорганизм (в том числе и человек), являясь элементом глобальной системы “Космос - Солнце - Земля - Техносфера”, подвергается воздействиям физических полей и излучений естественного происхождения и созданных практической деятельностью человека, а также, в свою очередь, сам воздействует на окружающую среду.

Область науки, изучающая воздействие физических полей и излучений на окружающее пространство, является одной из важнейших. Она выдвигает пути совершенствования техносферы, в пределах которых возможно успешное функционирование как ТС, так и человека.

Согласно законам физики механизм любого эволюционного процесса в системе – взаимодействие между составляющими этой системы. Сами взаимодействия представляют собой цепь иногда сложнейших комбинаций фундаментальных взаимодействий между элементами техносферы.

Различие интересов элементов системы является источником противоречий. Как правило, развитие никогда не происходит при полном равенстве действия и противодействия. Но именно «асимметрия» действия и противодействия, и определяемая этой асимметрией нелинейность приводит к неоднозначности направления этого развития. Нелинейность в сочетании с противодействием приводит при определенных условиях к возникновению бифуркаций. Но сложные системы, способные выбирать поведение в зависимости от своих целей, могут и не препятствовать серьезно внешнему воздействию (т.е. большие бифуркации не возникают), если воздействие не противоречит целям системы. Поэтому не всякое воздействие со стороны управляющей системы будет приниматься исполнителями с антагонизмом, что облегчает целеустремленное управление. Вместе с тем, всё разнообразие взаимодействий, каким бы сложным оно не было, в конце концов, сводится к комбинации фундаментальных взаимодействий, а управление любой системой – это асимметричное взаимодействие в нелинейной системе, когда действие не равно противодействию.

Поэтому, чтобы понять механизмы взаимодействия и возможности управления различными системами, какими являются как человек, так и технические системы, важно понимать сами механизмы осуществления взаимодействий.

В монографии рассмотрены физические поля и излучения, воздействующие на техносферу, в которой находятся ТС и биообъекты. Среди физических полей и излучений в качестве основных выделены:

- электромагнитные излучения (неионизирующие электромагнитные излучения; видимое излучение; инфракрасное, ультрафиолетовое и лазерное излучения);
- ионизирующие излучения (α , β , γ - излучения);
- виброакустические колебания (шум, инфразвук, ультразвук и вибрации).

Монография включает три тома. В первом томе рассмотрены характеристики физических полей и излучений в техносфере, их воздействие на ТС и биообъекты, предельно-допустимые уровни воздействий и нормативно-правовые документы, регламентирующие уровни этих воздействий в производственных и бытовых условиях. Для некоторых физических полей, воздействие которых на ТС строго не регламентировано, автор ограничился лишь воздействием на биообъекты.

Во втором томе рассмотрены материалы, которые используются в системах защиты от физических полей и излучений.

В третьем томе рассмотрены системы защиты от физических полей и излучений.

Монография «Защита техносферы от физических полей и излучений» знакомит читателя с современными способами защиты от наиболее значимых физических полей.

Главную задачу автор видит в повышении грамотности специалистов и населения в области физических полей и излучений, создаваемых в техносфере разными видами источников излучения, а также в формировании у читателей сознательного и ответственного отношения к вопросам обеспечения безопасности, как ТС, так и человека в условиях воздействия физических полей.

Библиографический список литературы отечественных и зарубежных публикаций, а также публикаций автора, расширяет представление о рассматриваемых проблемах.

РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Распространение через техносферу электромагнитных полей (ЭМП) является потенциально опасным как для ТС, так и для человека. ЭМП разной частоты несут разную энергию и по-разному воздействуют на элементы техносферы.

Спектр ЭМП и излучений включает в себя высокочастотные энергетически мощные ионизирующие излучения (гамма-излучение, рентгеновские лучи). Затем идут ультрафиолетовое излучение, видимый свет и инфракрасное излучение. За ними располагается широкий диапазон радиочастот, включающий (в нисходящем порядке) микроволны, сотовую радиотелефонию, телевидение, коротковолновое радио, средне- и длинноволновое радио, короткие волны, использующиеся в диэлектрических и индукционных нагревателях, и поля токов так называемой промышленной частоты (50 либо 60 Гц).

Заметим, что понятие «неионизирующее излучение» объединяет все излучения и поля электромагнитного спектра, у которых не хватает энергии для ионизации материи. Строгое научное определение неионизирующих излучений определяет их как излучения с длиной волны более 1000 нм и энергией меньше 10 кэВ, заведомо недостаточной, чтобы ионизировать вещество. Заметим, что с этих позиций ультрафиолетовое излучение не всегда является «неионизирующим», поскольку в отдельных случаях оно может ионизировать вещество.

Ультрафиолетовое излучение представляет собой форму оптического излучения с более короткой длиной волны и большей энергией фотонов (частиц излучения), чем видимый свет. Обычно ультрафиолетовое излучение невидимо и может быть обнаружено по свечению ряда материалов под его действием.

Инфракрасное излучение, часто называемое тепловым излучением или лучистым теплом, испускается всеми телами. Оно имеет длину волны, варьирующуюся от 780 нм до 1 мм.

К неионизирующим излучениям следует отнести и лазерное излучение - вынужденное (посредством лазера) испускание атомами вещества порций-квантов электромагнитного излучения. Лазер - устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

В первом разделе будут подробно рассмотрены отмеченные виды неионизирующих излучений, их воздействие на человека и способы защиты от чрезмерных облучений.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВОЗ - Всемирная организация здравоохранения,
ВДУ - Временно допустимые уровни,
ВЧ - высокие частоты,
ГВЧ - гипервысокие частоты,
ГМП - геомагнитное поле,
ИНЧ - инфранизкие частоты,
КВЧ - крайне высокие частоты,
КНЧ - крайне низкие частоты,
ЛЭП - линия электропередачи,
МП - магнитное поле,
МСП - магнитостатическое поле,
ПДУ - предельно допустимый уровень,
ПеМП- переменное магнитное поле,
ПеЭП - переменное электрическое поле,
ПМП - постоянное магнитное поле,
ППЭ - плотность потока энергии,
РЛС - радиолокационная станция,
РЭС - радиоэлектронная система,
СВН - сверхвысокое напряжение,
СВЧ - сверхвысокие частоты,
СНЧ - сверхнизкая частота,
СЧ - средние частоты,
СЭ - статическое электричество,
ТС - техническое средство,
УВН - ультравысокое напряжение,
УВЧ - ультравысокие частоты,
УКВ - ультракороткие волны,
УНЧ - ультранизкие частоты,
ЭДС - электродвижущая сила,
ЭМВ - электромагнитные волны,
ЭМИ - электромагнитное излучение,
ЭМО - электромагнитная обстановка,
ЭМП - электромагнитное поле,
ЭМС - электромагнитная совместимость,
ЭМЭ - электромагнитная экология,
ЭП - электрическое поле,
ЭСП - электростатическое поле,
ЭЭ — энергетическая экспозиция.

ГЛАВА 1. НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТЕХНОСФЕРУ

1.1. ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1.1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Естественные ЭМП в атмосфере имеют различное происхождение, включая меняющиеся в течение суток МП с индукцией порядка $3 \cdot 10^{-8}$ Тл, которые вызваны солнечным и лунным влиянием на ионосферные токи. Наибольшие атмосферные ЭМП возникают периодически в результате интенсивной солнечной активности и гроз, достигая индукции порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Тл во время больших магнитных бурь [1.1].

Волновые и корпускулярные излучения Солнца находятся в диапазоне частот (0,1 – 3000) Гц. Индукция переменного МП составляет $\approx 10^{-7}$ Тл. Эта величина претерпевает существенные изменения при пертурбациях на Солнце $\approx (10^{-7} - 10^{-5})$ Тл. Переменное МП космического происхождения оценивается индукцией $\approx 10^{-14}$, Тл при частотах (0,005–0,1) Гц.

Вариации солнечной активности приводят к магнитным бурям, которые вызывают изменения МП в смысле классических «вариаций», но одновременно и вариации ЭМП во всем диапазоне УНЧ.

Одновременно на земном шаре бушует около 2000 гроз, во время которых молния ударяет в земную поверхность около 16 раз в секунду. Возникающая на уровне земли величина тока может достигать $2 \cdot 10^5$ А. ЭМП с очень широким частотным диапазоном (от нескольких герц до нескольких мегагерц) возникают во время ударов молнии и распространяются на большие расстояния, влияя на величину суммарного МП Земли. При наложении на МП Земли переменного МП, связанных с нерегулярными атмосферными явлениями и возникновением резонансных частот (8 – 40) Гц напряженностью $H = 10^{-5}$ А/м (феномен Шумана), образуются слабые переменные МП. Эти ЭМП, генерированные разрядами молний, распространяются в пространстве между земной поверхностью и нижней границей ионосферы.

Естественные ЭМП Земли характеризуются: индукцией МП $(5 - 10) \cdot 10^{-8}$ Тл при частоте пульсаций $(0,0002 - 0,1)$ Гц; кратковременными геомагнитными пульсациями с частотой 5 Гц и продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов; уменьшением индукция ЭМП от 10^{-11} Тл до 10^{-14} Тл при увеличении частоты от 0,1 кГц до 3 кГц.

Помимо перечисленных выше существуют еще и другие составляющие естественных ЭМП. Все они отражают широкий спектр гармоник ЭМП, воздействующих на техносферу Земли. При этом воздействие может быть существенным, если параметры естественных фоновых полей и полей элементов техносферы совпадают.

1.1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Источниками искусственного происхождения электромагнитных помех можно управлять путем грамотного использования электромагнитного спектра и ограничения непреднамеренно излучаемой электромагнитной энергии.

Электромагнитные влияния наблюдаются во всем спектре электромагнитных колебаний, начиная с частоты 0 Гц. Это электростатические и магнитостатические влияния постороннего поля на стрелочные измерительные приборы, осциллографы и измерительные мосты, влияния фона переменного тока частотой 50 Гц, линий электропередачи (ЛЭП), сверхнизкочастотных коммуникационных систем, радио- и телевизионных передатчиков, электромедицинской аппаратуры и устройств, радиолокационной техники, микроволновых печей и космических источников. К этому добавляются влияния многочисленных переходных процессов в электрических цепях разного рода, чьи широкополосные высокочастотные поля охватывают большие участки спектра. В зависимости от того, возникают ли электромагнитные влияния при преднамеренном производстве и применении электромагнитных волн или они являются паразитными и имеют мало общего с первичной функцией источника, различают функциональные и нефункциональные источники помех.

Функциональные источники – это, прежде всего, радио- и телепередатчики, распространяющие электромагнитные волны через передающие антенны в окружающую среду для передачи информации. К этой группе относятся также устройства, излучающие электромагнитные волны не для коммуникативных целей, например генераторы высокой частоты для промышленного или медицинского применения, микроволновые печи, устройства радиоуправления и т. д.

Нефункциональные источники. К ним относятся автомобильные устройства зажигания, люминесцентные лампы, сварочное оборудование, релейные и защитные катушки, электрический транспорт, выпрямители тока, контактные и бесконтактные полупроводниковые переключатели, проводные линии и компоненты электронных узлов, переговорные устройства, атмосферные разряды, коронные разряды, коммутационные процессы в сетях высокого напряжения, разряды статического электричества (СЭ), быстро меняющиеся напряжения и токи в лабораториях техники высоких напряжений, при проведении электрофизических экспериментов, технологическом использовании мощных импульсов и т. д. В то время как соблюдение электромагнитной совместимости (ЭМС) функциональных источников оказывается сравнительно простым (их природа как передатчиков чаще всего очевидна с самого начала), то выявление нефункциональных источников оказывается сложной задачей. Их существование проявляется чаще всего в процессе поиска причины неожиданного аварийного поведения приемной системы. Поэтому идентификация нефункциональных источников помех является важной задачей при обеспечении ЭМС. Только когда установлены источники помех и их механизмы связи, обеспечение ЭМС оказывается осуществимым.

Классификация источников помех. Источники электромагнитной энергии классифицируются основным по картине их проявления в диапазоне частот, иными словами, по излучаемому ими высокочастотному спектру. Различают узкополосные и широкополосные источники. Сигнал считается широкополосным, если его спектр простирается на ширину полосы, большую, чем ширина полосы определенной приёмной системы, и узкополосным, если его спектр (ширина спектральной линии) меньше ширины полосы приемника (рис. 1.1).

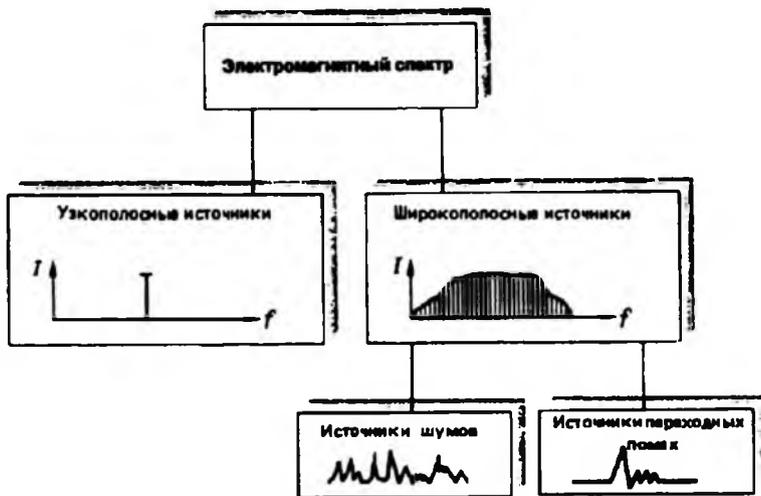


Рис. 1.1. Разделение технических устройств электромагнитной энергии на узкополосные и широкополосные источники

Источники узкополосных помех являются искусственно созданными человеком. Это, например, радиопередатчики, которые на предоставленных им частотах излучают больше мощности, чем допустимо, устройства, излучающие высшие гармоники, возникающие из-за нелинейности элементов передатчиков, медицинские и промышленные высокочастотные генераторы или просто электросеть промышленной частоты (50, 60, 400 Гц). Такие источники характеризуются действующим значением помехи при соответствующей частоте (линейчатый спектр).

Широкополосные помехи обладают спектром с очень плотно или даже бесконечно близко расположенными друг к другу спектральными линиями (непрерывный спектр, плотность распределения амплитуд). Типичные представители - это естественные помехи (например, космический шум), а также все непериодические переходные процессы.

Источники широкополосных помех целесообразно подразделить также на источники шумовых и переходных помех. Шумовые помехи состоят из многих, вплотную соседствующих или перекрывающихся импульсов различной амплитуды, которые нельзя разделить. Переходные помехи отличаются одна от другой и обладают сравнительно ма-

лой степени повторяемости, и проявляются в виде импульсов. Помехи могут быть распределены статистически: периодическими при короне на воздушной ЛЭП; в цепях фазовой отсечки тиристорных устройств или непериодическими, например, при выключении катушек реле. Классическая ЭМС, основной задачей которой был контроль радиопомех, и современная интерпретация ЭМС существенно различаются. Согласно первой, вполне могут быть допущены отдельные переходные импульсные помехи, т. е. одноразовые или редко повторяющиеся помехи в виде импульсов, в то время как при определенных обстоятельствах однократный импульс помехи в устройствах управления электростанцией может привести к дорогостоящим простоям, а в авиационных и космических устройствах - к тяжелым последствиям.

Источники периодических несинусоидальных помех, например сети вентиляльных преобразователей тока с линейчатым спектром высших гармоник, являются в зависимости от ширины полосы приемника узкополосными или широкополосными источниками, так как одна или несколько линий спектра могут быть расположены внутри полосы приемника. Широкополосные сигналы следует различать и по когерентности. При когерентных широкополосных сигналах реакция приемника пропорциональна ширине его полосы. Для некогерентных сигналов, спектральные составляющие которых соотносятся произвольно, реакция приемника пропорциональна квадратному корню ширины его полосы.

Для узкополосных сигналов вышеприведенные различия становятся излишними. До тех пор, пока спектр сигнала четко расположен внутри полосы приемника, реакция приемника остается постоянной. Ранее широкополосные помехи представлялись только как временные функции, не позволяющие непосредственно определить действие помехи в диапазоне частот. Однако при помощи преобразования Фурье временные функции могут быть переведены в частотную плоскость.

Шумовые помехи нельзя определенно описать аналитическими временными функциями. Они проявляют себя как результат многих, не поддающихся анализу отдельных помех.

Анализ источников электромагнитных помех здесь не приводится, с ним можно ознакомиться в [1.4, т. II].

1.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

1.2.1. РЕЦЕПТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Классификация источников помех. Помехи воздействуют на различные радиоэлектронные системы (РЭС), устройства и элементы, которые можно определить обобщенным понятием рецептора электромагнитных колебаний [1.3].

Рецепторы электромагнитной помехи - все устройства, которые в той или иной мере, обратимо или необратимо изменяют значения своих параметров под влиянием ЭМП (см. табл. 1.1).

Рецепторы могут быть естественного и искусственного происхождения. К рецепторам естественного происхождения можно отнести представителей фауны и флоры.

Искусственные рецепторы можно разделить на работающие по принципу извлечения информации из ЭМП (радиоприемные устройства); рецепторы, принцип работы которых не связан с внешними полями.

Таблица 1.1

Рецепторы электромагнитных помех

Наиболее значимые группы рецепторов	Состав групп рецепторов
Естественные	Представители фауны
	Представители флоры
Радиоэлектронные приёмные устройства	Радио и телевидение
	Радиосвязь и навигация
	Мобильная связь
	Радиолокационные станции
	Спутниковые системы
	Радиорелейные линии связи
Усилители	промежуточной частоты
	Видеочастоты
	Звуковых частот
	Высоких частот
Техническое оборудование	Производственное оборудование
	Офисная техника
	Компьютеры
	Радиотелефоны

Наиболее значимые группы рецепторов	Состав групп рецепторов
Вспомогательные устройства	Средства охраны и сигнализации
	Медицинское электронное оборудование
	Пиротехнические электронные приборы
Электрические линии связи	Проводные линии связи
	Кабельные линии связи

Воздействие помех на рецепторы происходит как через антенный тракт (радиоприемники), так и вследствие наводок на различные элементы РЭС, по цепям питания и управления.

Рассмотрим подробнее основные группы рецепторов электромагнитных помех.

Радиоэлектронные приёмные устройства

Радио и телевидение. Электромагнитные волны, используемые для радио- и телевидения, модулируются сигналами передаваемых программ. При радиовещании эти сигналы состоят из звуков, а при телевидении – из звуков и изображений. Радиостанции по методу модуляции обычно делают на АМ (амплитудная модуляция) и ЧМ (частотная модуляция), но тип передаваемого программного материала от метода модуляции не зависит.

Распространение сигналов АМ. Сигналы диапазона средних волн распространяются в дневное и ночное время земной (поверхностной) волной, а ночью – также и ионосферной (пространственной) волной.

Токи, создаваемые горизонтально распространяющимся излучением (поверхностной волной), обычно проникают на глубину до 15 м ниже поверхности земли на частоте 530 кГц и на 1,5 м на частоте 1700 кГц. Если бы верхний слой почвы был идеальным проводником, то затухание сигнала независимо от его частоты было пропорционально пройденному им расстоянию. Морская вода и плодородные земли степей дают близкое к этому затухание сигналов, но вообще земля никогда не ведет себя как идеальный проводник. Затухание увеличивается с частотой и, как правило, на частоте 1700 кГц намного больше, чем на 530 кГц. Электропроводность измеряется в ммо/м ($\text{МОм}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) или в миллисименс/м (МСм/м). Электропроводность, равная 1 ммо/м, считается низкой, 6 ммо/м – средней, а 40 ммо/м – высокой.

При приеме ионосферной волны (в вечерние, ночные и утренние часы) радиоволны вещательного диапазона отражаются по направлению к Земле нестабильным ионизованным слоем *E*, находящимся на высоте около 100 км над поверхностью Земли. Изменения в условиях отражения вызывают флуктуации, или замирания, меняющиеся во времени. Отраженные пространственные волны возвращаются к Земле на удалении от передатчика 80–1600 км. Однако дальность их распространения может превышать несколько тысяч километров из-за многократных отражений от земли и ионосферы. Сильные замирания возникают, когда сигналы поверхностной и пространственной волн, принимаемые одновременно, сравнимы по амплитуде, но противоположны по фазе, в результате чего происходит их частичное или полное гашение. Этот эффект иллюстрирует рис. 1.2.



Рис. 1.2. Ионосферные отражения пространственной волны диапазона средних волн

Показано однократное отражение; в ночное время обычно происходит дальнейшее распространение.

Короткие волны. Механизм распространения пространственных волн обычно превалирует в коротковолновом диапазоне (3–30 МГц). При этом сигналы различных частот отражаются разными слоями ионосферы по-разному. Уровень принимаемого сигнала зависит от условий его распространения, в том числе от числа отражений, солнечной активности, показателя преломления среды, а также от суточных и сезонных изменений. Эти факторы оказывают решающее влияние на выбор оптимальных рабочих частот, которые могут варьироваться в зависимости от времени суток и зоны, на которую направлена передача.

Метровый и дециметровый диапазоны. ЧМ- и ТВ-станции вещания работают на метровых и дециметровых волнах. Передачи на таких частотах не подвержены воздействию статических помех и флуктуациям амплитуды из-за отражений сигналов, а также относи-

тельно свободны от замираний. Однако прием обычно бывает удовлетворительным на расстояниях до ~160 км при благоприятном расположении вещательной станции (на возвышенности в сельской или пригородной зоне).

В результате тропосферного рассеяния сигналы диапазона метровых волн могут распространяться на расстояния, превышающие 1600 км [1.4, т. II].

Кабельное телевидение. Многие многоквартирные дома и дома-кондоминиумы обслуживаются собственными кабельными системами; другие имеют собственные коллективные антенны или мини-кабельные системы MATV (системы коллективного телевизионного приема).

Невещательные службы. Большинство систем вещания пригодны также и для других применений. Так, например, АМ-станции средневолнового диапазона могут служить в качестве аэронавигационных и морских навигационных радиомаяков, в особенности в таких удаленных и малонаселенных регионах, где отсутствуют обычные вспомогательные средства навигации.

Радиосвязь и навигация. Радиосвязь и навигация на современном этапе возрастает в связи с внедрением на транспорте различных информационных систем (ИС): вычислительных средств, радиосвязи (включая спутниковую связь), навигационного оборудования (включая электронные картографические навигационно-информационные системы), аппаратуры автоматической идентификационной системы, регистраторов данных рейса и др. Внедрение информационных технологий стало возможным благодаря росту степени интеграции интегральных микросхем при одновременном повышении их быстродействия и снижении токов потребления. Это в свою очередь привело к снижению энергетических характеристик полезных сигналов ИС, что обуславливало их восприимчивость к внешним помехам.

Мобильная связь. К мобильной связи (МС) относятся: беспроводной телефон, персональный радиовывоз (пейджинг), сотовая связь (СС), транковая связь и мобильная спутниковая связь (подробнее см. [1.2]).

Работа МС сопряжена с электромагнитными излучениями (ЭМИ). С одной стороны, МС и сопутствующие ей устройства (базовые станции, радиорелейные линии связи, подвижные станции) являются источниками ЭМП широкого частотного диапазона, а с другой стороны, рецепторами. Качество приёма сигнала МС в значительной мере зависит от расположенных вблизи абонента более мощных источников

ЭМП, таких как электротранспорт, электроэнергетические системы (ЭЭС), радиолокационные станции (РЛС) и др.

РЛС могут рассматриваться как источники ЭМП. Они включают в себя как мощные передающие и приемные устройства, так и рецепторы ЭМП (устройства обработки и отображения информации).

Системы спутниковой связи (ССС). В последние годы межконтинентальная связь и прямой прием на домашнюю антенну передач со спутников получили широкое распространение. Спутники теперь могут обеспечить работу нескольких тысяч узкополосных телефонных, телеграфных и телетайпных каналов и многих широкополосных ТВ-каналов одновременно. Разные службы пользуются различными частотами в пределах от 400 МГц до 22 ГГц для спутниковой связи. Наиболее часто для вещания со спутников на Землю используются частоты от 3,7 до 4,2 ГГц в С-диапазоне и от 12 до 12,7 ГГц в Q-диапазоне; многие спутники работают в обоих этих диапазонах. Для видеоканала обычно требуется полоса шириной от 20 до 25 МГц; выделяемые полосы имеют несколько большую ширину. 12-ГГц диапазон менее восприимчив к земным помехам, чем 4-ГГц диапазон. Расширение полосы спектра частот без увеличения помех требует дальнейшего совершенствования системы.

Радиорелейные линии связи (РРЛ). Успешное развитие радиосвязи сопровождается увеличением скоростей и объемов передаваемой информации. Для передачи возрастающих потоков информации с малыми потерями используют сигналы с более широкой полосой, что требует расширения диапазона частот, занимаемого системой связи. В результате, современные системы связи осваивают диапазоны все более коротких волн. К достоинствам диапазонов ультракоротких волн относится также несущественный уровень атмосферных и промышленных помех. Кроме того, широкополосные сигналы позволяют использовать прогрессивные виды модуляции и другие приемы обработки сигналов, обеспечивающие лучшие характеристики помехоустойчивости приема.

Компромиссным решением при построении широкополосных систем связи, предназначенных для работы на больших дальностях, является применение РРЛ, которые представляют собой цепочку ретрансляторов, обеспечивающих поочередную передачу радиосигналов между оконечными станциями.

Станции проводного вещания и усилители. Наиболее подвержены воздействию электромагнитных помех станции проводного вещания и усилители мощности: промежуточной частоты, видеочастоты,

звуковых частот и высоких частот, а также устройства выходной коммутации [1.4, т. II].

Техническое оборудование. Современное техническое оборудование, используемое в различных областях производственной деятельности, содержит элементы высокочувствительной электронной техники: полупроводники (диоды, триоды, тиристоры, транзисторы и т. п.); интегральные микросхемы; цифровые процессоры сигналов и др. Кроме того, обязательными являются традиционные электротехнические элементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, разнообразные соединители, измерительные и преобразующие устройства. И все они испытывают на себе воздействие ЭМП широкого частотного диапазона, что в ряде случаев приводит к нарушению режима работы или к сбою.

Производственное оборудование. Под производственным оборудованием понимаются различные устройства и приспособления, созданные на базе электронных элементов, используемые в различных отраслях производства. Среди них: приборы учёта и контроля, автоматические станки, многорежимные сушильные камеры, торговое оборудование, медицинское электронное оборудование, научные и коммерческие вычислительные комплексы и др. Все они при работе используют электрическую энергию различной частоты, и качество их работы существенно зависит от напряженностей ЭМП в окружающей воздушной среде.

Офисная техника. Функционирование любого современного предприятия невозможно без применения электронной аппаратуры, в том числе и на основе микропроцессорных устройств. Это позволяет эффективно организовать производственные процессы, обеспечить выполнение сложных алгоритмов (в том числе, на транспорте), повысить эффективность контроля качества продукции, автоматизировать трудоемкие операции, улучшить обслуживание потребителей и т. д. Поэтому электронная аппаратура внедряется в области, где на нее возлагаются все более и более ответственные задачи. Но при этом, к сожалению, она может подвергаться внешним электромагнитным воздействиям, способным вызвать сбой в работе или вообще вывести аппаратуру из строя.

Среди офисной техники, наиболее подверженной воздействию стационарных и импульсных ЭМП, в первую очередь, следует отметить: компьютеры; системы безопасности, охраны, видеонаблюдения; медицинское и электронное оборудование; линии связи и др.

1.2.2. МЕХАНИЗМЫ СВЯЗИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Возможны пути электромагнитных влияний через гальваническую, емкостную, индуктивную, электромагнитную связи и связь электромагнитным излучением.

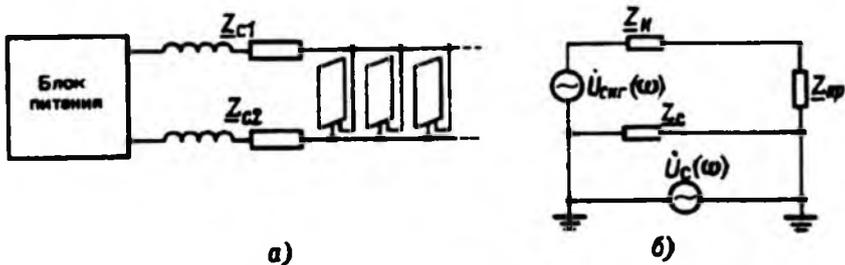


Рис. 1.3. Примеры возникновения и передачи напряжений помех, передающихся по проводам благодаря наличию гальванической связи через полное сопротивление связи Z_c :

- а - потребители, питаемые от одной и той же сети;
- б - связь через контур заземления

Гальваническая связь возникает, если некоторое полное сопротивление оказывается общим для двух или нескольких контуров. Различают гальваническую связь рабочих контуров через цепь общего питания от одного источника (рис. 1.3,а); гальваническую связь между рабочими контурами через контур заземления (рис. 1.3,б).

Типичными примерами первого типа связи являются воздействие на сеть коммутационной аппаратуры и выпрямителей, изменения тока при переключении цепей и включении катушек реле и контакторов, токи в подводящих проводах коллекторных двигателей и т. д. Связь через контур заземления возникает, когда синфазные напряжения [1,2, т. II] вызывают нежелательные токи через неоднократно заземленные нулевые провода, кабельные экраны, корпуса измерительных приборов и т. д.

Емкостная или электрическая связь возникает между двумя проводами. Вследствие разности потенциалов между проводами существует ЭП, которое в эквивалентной схеме моделируется емкостью рассеяния. В предположении квазистатических соотношений и несимметричных систем получаем эквивалентную схему (рис. 1.4); R_{II} и C_{II} представляют параллельно включенные внутренние сопротивления

ния передатчика и приемника системы II ; C_{I-II} - паразитную емкость между обеими системами. Источник рабочего напряжения не показан. Считаем, что только система I влияет на систему II , а не наоборот. Другими словами, пусть уровень напряжения в системе I многократно выше, чем в системе II .

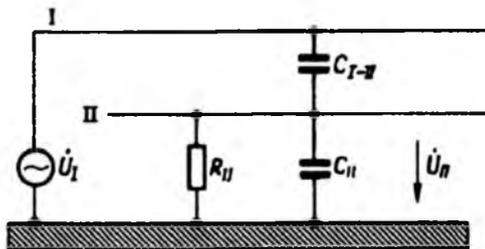


Рис. 1.4. Типичный пример емкостной связи между неэкранированными несимметричными системами проводов:
 I - система, создающая помехи; II - система, подверженная помехе

Пассивные компоненты C_{I-II} , а также параллельно включенные R_{II} и C_{II} , действуют как частотно-зависимый делитель напряжения, так что для отношения напряжения источника помехи к мешающему напряжению в системе II получаем

$$\frac{\dot{U}_I}{\dot{U}_{II}} = \frac{1/j\omega C_{I-II} + R_{II}}{R_{II}(1 + j\omega R_{II} C_{II})}. \quad (1.1)$$

Если система II низкоомна, т. е. $R_{II} \ll 1/\omega C$, тогда делитель напряжения состоит в основном из C_{I-II} и R_{II} . Для отношения (1.1) получается

$$\frac{\dot{U}_I}{\dot{U}_{II}} = \frac{1/(j\omega C_{I-II}) + R_{II}}{R_{II}} \approx \frac{1}{j\omega C_{I-II} R_{II}}. \quad (1.2)$$

Отсюда напряжение помехи рассчитывается в частотной области как

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}_I j\omega C_{I-II} R_{II}. \quad (1.3)$$

Для временной области соответственно получаем

$$\dot{U}_{II}(t) = \frac{du_I(t)}{dt} C_{I-II} R_{II}. \quad (1.4)$$

Напряжение помехи пропорционально наряду с частотой, или скоростью изменения во времени, емкости связи C_{I-II} , а также общему омическому сопротивлению системы II . Отсюда непосредственно вытекают меры по снижению емкостного влияния: уменьшение емкостной связи C_{I-II} , например, сокращением длины участков параллельной прокладки проводов, увеличением расстояния между проводами, экранированием системы II , уменьшением сопротивления R_{II} .

Индуктивная или магнитная связь возникает между двумя или несколькими обтекаемыми токами контурами. Связанные с токами магнитные потоки пронизывают другие проводящие контуры и индуцируют там напряжения помех. Индуцирующее воздействие потоков моделируют в эквивалентной схеме взаимной индуктивностью или источником напряжения. В предположении квазистатических соотношений получаются эквивалентные схемы (рис. 1.5). Эти эквивалентные схемы составлены в предположении, что только система I мешает системе II , а не наоборот. Иными словами, предполагается, что ток в системе I намного больше, чем в системе II .

Для эквивалентной схемы (рис. 1.5,а) индуцированное напряжение рассчитывается как

$$\dot{U}_{II}(\omega) = \dot{I}_I(\omega) j\omega M_{I-II}. \quad (1.5)$$

соответственно во временной области

$$u_{II}(t) = \frac{di_I(t)}{dt} M_{I-II}. \quad (1.6)$$

Индукция приводит к появлению напряжения противофазной помехи в системе II , часть которого, определяемая делителем напряжения $Z_{II}(\omega)/Z_{IIП}(\omega)$, поступает на вход приемника.

Взаимную индуктивность M_{I-II} рассчитывают по

$$M_{I-II} = \dot{\Phi}_{I-II}(\omega) / \dot{I}_I(\omega), \quad (1.7)$$

где $\dot{\Phi}_{I-II}$ - часть связанного с $\dot{I}_I(\omega)$ магнитного потока, пронизывающего систему II .

Поток

$$\dot{\Phi}_{I-II} = \int_{A_{II}} B_I dA \quad (1.8)$$

рассчитывают по области A_{II} (площади контура системы II). Для приближительных расчетов чаще всего плотность магнитного потока на индукцию B_I полагают постоянной в пространстве, благодаря чему интеграл упрощается до скалярного произведения:

$$\dot{\Phi}_{I-II} = B_I A_{II} \cos \alpha. \quad (1.9)$$

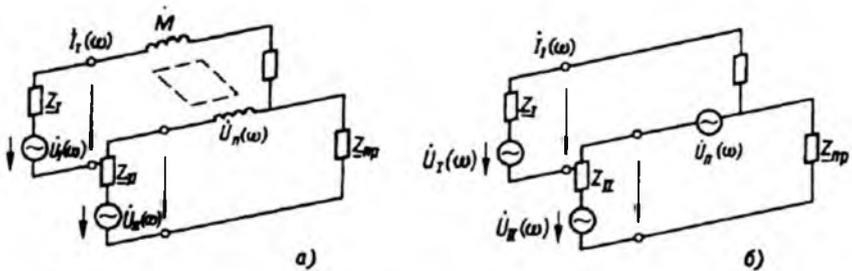


Рис. 1.5. Магнитная связь между двумя электрическими контурами.
 Моделирование индукционного процесса:
 а - взаимной индуктивностью; б - напряжением источника

В этом уравнении α - угол, который образуют векторы \vec{B}_I и \vec{A}_{II} . Плотность магнитного потока \vec{B}_I определяется по закону полного тока с учетом заданного тока \dot{I}_I .

На практике речь идет в меньшей степени о том, чтобы рассчитать взаимную индуктивность M_{I-II} , а прежде всего о том, чтобы опознать ее как таковую. В конце концов, магнитная связь существует, даже если контур системы II замкнут не гальванически, а только через паразитную емкость. В последнем случае индуцированное напряжение не делится делителем $Z_{II}(\omega)/Z_{II}(\omega)$, а приложено полностью к разомкнутым концам контура II . Индуцированное напряжение помехи

является заданным, т. е. его значение не зависит от полного сопротивления контура II . С уменьшающимся полным сопротивлением $Z_{II}(\omega) + Z_{II'}(\omega) \dot{I}_{II}$ может принимать сколь угодно большие значения. Доля приходящегося на вход приемника напряжения помехи определяется исключительно отношением $Z_{II}(\omega)/Z_{II'}(\omega)$, а не значением полного сопротивления.

Согласно (1.4)-(1.7) индуктированное напряжение помехи наряду с частотой или скоростью изменения тока в системе I пропорционально взаимной индуктивности M_{I-II} , а следовательно, и площади A_{II} . На основании этого можно указать следующие способы снижения индуктивного влияния: уменьшение M_{I-II} за счет сокращения длины участков параллельной прокладки проводов; увеличение расстояния между контурами; ортогональное расположение контуров; скручивание проводов системы II (уменьшение A_{II} соответственно $\dot{\Phi}_{I-II}$); экранирование системы II ; прокладка компенсирующих проводов.

Скручивание проводов является наиболее дешевой и наиболее действенной мерой для уменьшения индуктированных напряжений. Если остающийся некомпенсированный магнитный поток дает слишком большие напряжения помех, то может оказаться эффективным дополнительный экран (рис. 1.6, а).

Вместо кабельного экрана в некоторых случаях прокладываются компенсирующие провода (если, например экранирование не возможно по условиям обеспечения электрической прочности. Компенсирующие провода образуют короткозамкнутые контуры, магнитное поле которых частично может компенсировать магнитное поле помех (рис. 1.6, б). Благодаря присутствию короткозамкнутого контура напряжение помехи, индуктированное в системе II , уменьшается до

$$\dot{U}_{II}(\omega) = j\omega\dot{\Phi}_{BH} - j\omega M_{IIk} \dot{I}_k, \quad (1.10)$$

где $j\omega\dot{\Phi}_{BH}$ - индуктированная ЭДС; M_{IIk} - взаимная индуктивность между подверженной помехе системой II и компенсирующим контуром.

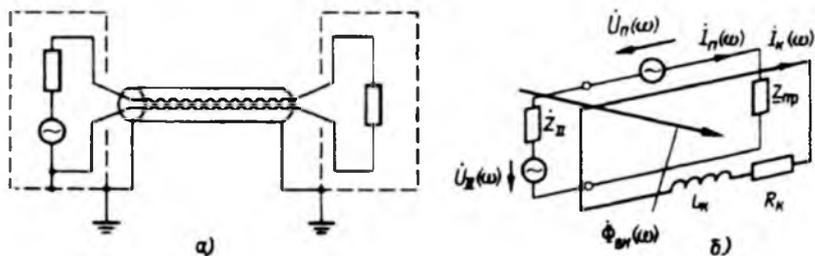


Рис. 1.6. Экранированная скрученная сигнальная линия (а) и сигнальный контур с компенсирующим проводом (б)

Ток \dot{I}_k компенсирующего контура рассчитывается как

$$\dot{I}_k = j\omega \dot{\Phi}_{BH} / (R_k + j\omega L_k). \quad (1.11)$$

Тем самым индуктированное напряжение помехи согласно (1.10) может быть преобразовано в

$$\dot{U}_n(\omega) = j\omega \dot{\Phi}_{BH}(\omega) [R_k + j\omega(L_k - M_{nk})] / (R_k + j\omega L_k) \quad (1.12)$$

или

$$\dot{U}_n(\omega) = j\omega \dot{\Phi}_{BH}(\omega) \dot{K}, \quad (1.13)$$

где \dot{K} - коэффициент ослабления. Он связывает индуктированное напряжение помехи и магнитный поток внешнего поля

$$\dot{K} = \dot{U}_n(\omega) / j\omega \dot{\Phi}_{BH}(\omega). \quad (1.14)$$

Поток $\dot{\Phi}_{BH}(\omega)$ рассчитывается в виде:

$$\dot{\Phi}_{BH}(\omega) = \dot{B}_{BH} A_{Hn} \cos \alpha, \quad (1.15)$$

где α - угол между нормалью к поверхности n_A и вектором магнитной индукции \dot{B}_{BH} , которая рассчитывается, исходя из значения тока, протекающего в мешающей системе, и ее конфигурации.

Электромагнитная связь линий имеет место при наличии одновременного электрического и магнитного влияний между двумя или несколькими электрически длинными линиями. В электрически длинных линиях напряжения и токи не могут рассматриваться независимыми друг от друга [1.4, т. II]. Они связаны друг с другом через волновое

сопротивление соответствующей линии (подобно тому, как ЭП и МП электромагнитных волн связаны друг с другом через волновое сопротивление пространства).

Является ли линия электрически длинной или короткой, определяется во временной и частотной областях по разными критериям:

- во временной области линия считается электрически длинной, если время нарастания передаваемых по ней импульсов имеет один порядок с временем распространения импульса вдоль линии или даже меньше его, и тем самым напряжение и ток линии зависят от места, т.е. $u = u(t, x)$ и $i = i(t, x)$;

- в частотной области линия считается электрически длинной, если комплексные амплитуды импульсов напряжения и тока зависят от расположения на линии, т. е. $\dot{U} = \dot{U}(x)$ и $\dot{I} = \dot{I}(x)$. Этот эффект имеет место, если длина волны имеет один порядок с длиной линии или даже меньше ее.

Математическое описание электромагнитной связи в многопроводных системах зависит от очень многих условий. Подробнее об электромагнитной связи в длинных линиях см. в [1.4, т. II].

Связь электромагнитным излучением. Под такой связью подразумевают воздействие электромагнитного волнового поля на структуры проводников.

Ранее предполагалось, что электрические и магнитные переменные поля возникают как самостоятельные феномены без взаимной связи. Впрочем, это предположение всегда допустимо, пока мы находимся в ближнем поле мешающей системы. В дальнем поле напряженностей \vec{E} и \vec{H} возникают всегда вместе и связаны законом электромагнитной индукции:

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t. \quad (1.16)$$

В этом случае говорят об электромагнитной волне. Ее напряженности \vec{E} и \vec{H} могут быть указаны индивидуально, однако они более не являются независимыми друг от друга, как у квазистатических, электрических и магнитных полей.

Падающая на некоторую конфигурацию системы проводов электромагнитная волна \vec{E}_H, \vec{H}_H вызывает там токи и напряжения, которые, со своей стороны, являются причиной отраженной электромаг-

нитной волны \vec{E}_0, \vec{H}_0 . Падающая и отраженная волны в сумме образуют остаточное поле. Напряженности этого остаточного поля получают путем решения уравнений Максвелла для данных граничных условий. С другой стороны, можно быстро составить уравнения линии с учетом вызванных падающей волной токов и напряжений. Принцип происходящего покажем на примере короткого отрезка Δx электрически длинной, не имеющей потерь двухпроводной измерительной линии, рис. 1.7.

Индуктивность проводящего контура, образованного прямым и обратным проводом, а также емкость между прямым и обратным проводами относятся к длине линии, т.е. представляются как погонные параметры линии:

$$L' = \Delta L / \Delta l \text{ и } C' = \Delta C / \Delta l.$$

Меняющиеся во времени величины $u(t)$ и $i(t)$ определяются только сосредоточенными элементами эквивалентной схемы замещения. Применение метода контурных токов для контура C площадью A при учете ЭДС, позволяет рассчитать индуцированную магнитным полем напряжение

$$U_0 = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B}_{\Pi} d\vec{A} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+\Delta x} \int_0^{z_0} \vec{B}_{y\Pi}(x, z, t) dz dx, \quad (1.17)$$

или

$$L' \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + u(x + \Delta x, t) - u(x, t) - \frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+\Delta x} \int_0^{z_0} \vec{B}_{y\Pi}(x, z, t) dz dx = 0.$$

После деления на Δx и перехода к пределу для $\Delta x \rightarrow 0$ имеем

$$L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_0} \vec{B}_{y\Pi}(x, z, t) dz. \quad (1.18)$$

Расчет по методу узловых потенциалов в точке P с учетом индуцированной электрической составляющей поля электромагнитной волны дополнительного тока смещения через емкость $C' dx$

$$i_{CM} = C' \Delta x \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_0} \vec{E}_{-П}(x + \Delta x, z, t) dz \quad (1.19)$$

приводит к

$$i(x,t) - i(x + \Delta x, t) - C' \Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} + C' \Delta x \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_0} E_{z \text{ п}}(x + \Delta x, z, t) dz = 0,$$

соответственно после деления на Δx и перехода к пределу для $\Delta x \rightarrow 0$, получим

$$C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_0} E_{z \text{ п}}(x, z, t) dz. \quad (1.20)$$

Левые части уравнений (1.18) и (1.20) представляют собой известные связанные дифференциальные уравнения первого порядка, которые описывают напряжения и токи в длинных линиях в зависимости от места и времени, правые части - функции помех, или возмущающие функции системы. Решение этой системы уравнений по методу параметров состояния приводит при любых возмущениях к искомым напряжениям на нагрузке, соответствующей волновому сопротивлению при $x = 0$ и $x = l$ (на рис. 1.7 не показаны).

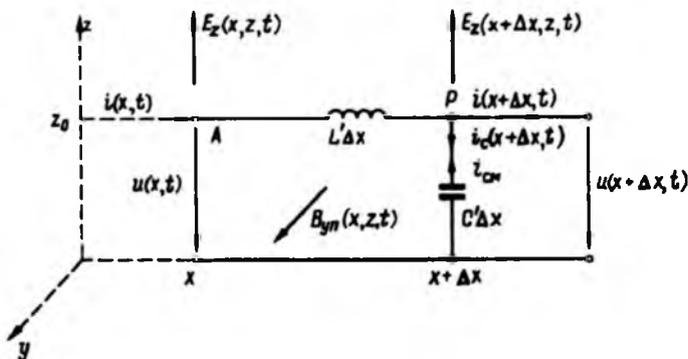


Рис. 1.7. Отрезок Δx электрически длинной двухпроводной линии без потерь

В эквивалентной схеме, составленной только на основании теории цепей, связь через излучение может быть представлена распределенными источниками напряжения и тока, которые соответствуют возмущающим функциям (рис. 1.8).

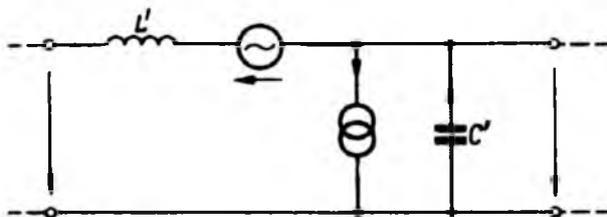


Рис. 1.8. Моделирование связи через излучение распределенными источниками напряжения и тока

Моделирование связи электромагнитным излучением на линиях с помощью индуктивностей и емкостей линии по рис. 1.7 и .18 справедливо только для возмущающих функций, время нарастания которых велико по сравнению с временем движения между проводами поперек направления распространения (ТЕМ-моды, теория бегущих волн). Эта предпосылка при связи электромагнитным излучением с обычными измерительными и сигнальными линиями практически всегда выполнена. Что касается воздействия электромагнитного импульса ядерного взрыва на ЛЭП, то этот случай требует более тщательного рассмотрения (см. [1.4, т. II]).

1.2.3. ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Содержание технического регулирования в области ЭМС.

Техническое регулирование, т. е. правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции и оценки соответствия направлено на обеспечение безопасности продукции в целях защиты жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного, муниципального имущества и окружающей природной среды.

Техническое регулирование в РФ в области ЭМС осуществляется в соответствии с Федеральным Законом РФ «О техническом регулировании», вступившем в силу с 1.07.03 г.

Необходимость осуществления технического регулирования в области ЭМС обусловлена тем, что электротехническим, электронным и радиоэлектронным изделиям, а так же любым изделиям, содержащим электрические и/или электронные технические средства (ТС) присущи,

за редким исключением, свойства электромагнитной эмиссии и электромагнитной восприимчивости.

Электромагнитная эмиссия от технических средств приводит к загрязнению окружающей среды излучаемыми и кондуктивными электромагнитными помехами, способными нарушить нормальное функционирование технических средств и неблагоприятно повлиять на биообъекты.

Нарушения функционирования технических средств, возникающие вследствие их электромагнитной восприимчивости, могут причинить вред здоровью людей, имуществу физических и юридических лиц, окружающей природной среде.

Техническое регулирование в области ЭМС включает: установление, применение и соблюдение обязательных требований ЭМС; обязательное подтверждение соответствия требованиям ЭМС; государственный контроль за соблюдением обязательных требований ЭМС.

Формы и способы установления обязательных требований ЭМС и обязательного подтверждения соответствия могут быть различными.

В связи с происходящим в настоящее время реформированием системы технического регулирования в РФ формируется современная правовая система технического регулирования в области ЭМС. Идет поиск эффективных форм и способов установления, применения и соблюдения обязательных требований к ТС различного назначения по обеспечению устойчивости к электромагнитным помехам и ограничению эмиссии электромагнитных помех, подтверждения соответствия требованиям ЭМС и осуществления надзорных функций, которые должны быть установлены в разрабатываемом в настоящее время в общем техническом регламенте «Об электромагнитной совместимости» [1.7].

В этих условиях важно обобщить и проанализировать имеющиеся сведения о формах и способах технического регулирования в области ЭМС, применяемых в различных странах.

Поэтому основной целью такой работы является: обобщение и анализ имеющихся материалов о техническом регулировании в области ЭМС; сравнение с состоянием регулирования в области ЭМС в различных странах; предоставление систематизированной информации, используемой при решении различных вопросов технического регулирования в области ЭМС; а также разработка рекомендаций по обеспечению ЭМС для предприятий-разработчиков и изготовителей технических средств в рамках новой системы технического регулирования.

В условиях реформирования отечественной системы технического регулирования в области ЭМС и сближения ее принципиальных положений с положениями систем технического регулирования развитых стран, прежде всего государств - членов Европейского Союза, особое значение приобретает внедрение эффективных инженерных приемов и организационных способов обеспечения ЭМС при конструировании и изготовлении ТС, которые должны быть направлены на сокращение сроков разработки современных изделий и подтверждения их соответствия требованиям ЭМС.

Установление обязательных требований к ТС по обеспечению ЭМС. Технический регламент по ЭМС устанавливает обобщенные (существенные) требования электромагнитной совместимости. Технические требования, применяемые при подтверждении соответствия устанавливаются в добровольных национальных стандартах ЭМС в соответствии с статьёй 4 Технического регламента ЭМС:

- Техническое средство должно рассматриваться как соответствующее существенным требованиям настоящего Технического регламента, если оно удовлетворяет требованиями национальных стандартов ЭМС.

Национальные стандарты ЭМС разрабатываются в порядке, установленном Федеральным законом «О техническом регулировании». Национальный орган по стандартизации утверждает и публикует в печатном издании федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию и в информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме перечень национальных стандартов ЭМС, которые могут применяться для обеспечения существенных требований настоящего Технического регламента.

Общие сведения о международных и европейских стандартах ЭМС. Национальные стандарты ЭМС разрабатываются на основе международных и европейских стандартов ЭМС.

Организации, разрабатывающие стандарты ЭМС [1.8, 1.9]:

Международная электротехническая комиссия. Международная электротехническая комиссия (МЭК) действует в тесном взаимодействии с Международной организацией по стандартизации (ИСО). Членами МЭК являются 44 страны. МЭК состоит из национальных комитетов, которые выражают интересы своих стран в области электротехники. Работы по стандартизации проводятся в технических комитетах (ТК) и подкомитетах, связанных с отдельными группами продукции. Каждый технический комитет имеет Секретариат, ведение которого возлагается на один из национальных комитетов стран - членов

МЭК. Целями являются «способствовать международному сотрудничеству по всем вопросам, связанным со стандартизацией, что достигается изданием публикаций, содержащих рекомендации в виде международных стандартов, которые национальные комитеты, как предполагается, должны использовать в своей работе над национальными стандартами».

Работами, относящимися к ЭМС полностью заняты два технических комитета МЭК и, кроме того, еще около сорока других технических комитетов частично решают вопросы ЭМС при проведении работ в своей области ответственности. К двум указанным техническим комитетам, полностью занятым работами, относящимися к ЭМС, относятся ТК 77 «Электромагнитная совместимость оборудования, включая электрические сети» и Специальный международный комитет по радиопомехам - СИСПР (наименование СИСПР образовано из начальных букв звания указанного комитета на французском языке). Организация взаимодействия по вопросам ЭМС между многими техническими комитетами МЭК возлагается на Консультативный комитет по ЭМС (ККЭМС), который должен предпринимать меры, исключающие разработку конфликтующих стандартов.

ТК 77. Представляет собой крупный техническим комитет МЭК, который взаимодействует как с несколькими другими комитетами внутри МЭК, ориентированными на продукцию, включая СИСПР, так и с внешними организациями, такими как Европейский комитет по стандартизации электротехнических изделий (СЕНЕЛЕК) и Международный Союз электросвязи (МСЭ). ТК 77 взаимодействует также с несколькими международными организациями, связанными с вопросами электроснабжения. Главным результатом деятельности ТК 77 в настоящее время являются стандарты, относящиеся к серии стандартов МЭК 61 000 «Электромагнитная совместимость». Эти документы были изданы в виде нескольких частей, состоящих из разделов (подробнее см. в [1.6]). Они включают в себя все материалы, касающиеся ЭМС, не относящиеся к области ответственности СИСПР и технических комитетов МЭК, ориентированных на продукцию.

СИСПР. В публикациях СИСПР рассматриваются нормы и методы измерений характеристик радиопомех, создаваемых изделиями, являющимися потенциальными источниками помех. Эти публикации представляют собой комплект документов, дополняющих серию стандартов МЭК 61 000. В составе СИСПР имеется несколько подкомитетов, указанных в табл. 1.2.

Подкомитет СИСПР А играет особенно важную роль, как разработчик общепринятых методов измерений радиопомех и требований к соответствующим средствам измерений. Хотя документы, разработанные СИСПР, номинально распространяются на конкретные группы изделий, некоторые из стандартов, устанавливающих нормы эмиссии радиопомех, особенно СИСПР 11, 14 и 22, имеют более широкое применение, так как установленные в них нормы и методы измерений применяются во многих стандартах, ориентированных на продукцию. В основном, нормы радиопомех, в зависимости от частоты, могут быть отнесены к двум классам А и В, общепринятым во многих стандартах. Хотя СИСПР, в основном, не разрабатывает стандарты в области устойчивости к электромагнитным помехам, существуют два примера, нарушающих это правило: СИСПР 20 для радиовещательных приемников, телевизоров и аналогичного оборудования и СИСПР 24 для оборудования информационных технологий.

СЕНЕЛЕК и ЕТСИ. СЕНЕЛЕК (Европейский комитет по стандартизации электротехнических изделий) является ответственной европейской организацией в области стандартизации, которая была уполномочена Европейской Комиссией для проведения работ по подготовке европейских стандартов ЭМС, применяемых для подтверждения соответствия требованиям Директивы ЭМС.

Для телекоммуникационного оборудования в качестве организации, ответственной за подготовку стандартов, уполномочен ЕТСИ (Европейский институт телекоммуникационных стандартов). ЕТСИ разрабатывает стандарты ЭМС для оборудования телекоммуникационных сетей (исключая абонентское оборудование), для оборудования радиосвязи, а также для радиовещательных передатчиков. В качестве основы для подготовки проектов таких стандартов СЕНЕЛЕК и ЕТСИ используют, где это возможно, результаты работы МЭК и СИСПР. Непосредственную подготовку стандартов ЭМС в СЕНЕЛЕК осуществляет ТК 210.

Таблица 1.2

Подкомитеты СИСПР

Подкомитет	Наименование /область Применения	Главные публикации
СИСПР/А	Измерения радиопомех и статистические методы	СИСПР 16, СИСПР 17
СИСПР/В	Промышленные, научные и медицинские радиочастотные устройства	СИСПР 11, СИСПР 19, СИСПР 23, СИСПР 28

Подкомитет	Наименование /область Применения	Главные публикации
СИСПр/С	Воздушные линии электропередачи, высоковольтное оборудование и системы электрической тяги	СИСПр 18
СИСПр/Д	Автотранспортные средства и двигатели внутреннего сгорания	СИСПр 12, СИСПр 21, СИСПр 25
СИСПр/Е	Радиовещательные приемники	СИСПр 13, СИСПр 20
СИСПр/Ф	Бытовые электрические приборы, электрические инструменты, световое оборудование и аналогичные устройства	СИСПр 14, СИСПр 15
СИСПр/Г	Оборудование информационных технологий	СИСПр 22, СИСПр 24
СИСПр/Н	Нормы для защиты радио-служб	

Категории стандартов ЭМС. Международные (МЭК, СИСПр) и европейские (ЕН, ЕТС) стандарты ЭМС относятся к трем категориям: основополагающим стандартам ЭМС; общим стандартам ЭМС; стандартам ЭМС для групп однородной продукции и для продукции конкретного вида.

Основополагающие стандарты ЭМС. основополагающие стандарты содержат общие условия и правила обеспечения ЭМС ТС, применимые для всех (или многих) групп однородной продукции, и служат в качестве ссылочных документов при разработке стандартов на продукцию техническими комитетами по стандартизации.

Основополагающие стандарты ЭМС, как правило, устанавливают: термины и определения в области ЭМС; описания электромагнитных помех; характеристики и классификацию электромагнитной обстановки (ЭМО); уровни ЭМС; общие требования по ограничению помехоэмиссии; виды и степени жесткости испытаний на помехоустойчивость; методы измерений и испытаний, требования к средствам измерений и испытательному оборудованию; руководства по установке и помехоподавлению.

Основополагающие стандарты ЭМС не устанавливают требований, которые должны быть регламентированы в общих стандартах ЭМС и стандартах ЭМС для групп однородной продукции и продукции конкретного вида.

Большинство основополагающих международных стандартов ЭМС разработаны ТК 77 и опубликованы в качестве отдельных частей серии стандартов МЭК 61000. Некоторые основополагающие стандарты разработаны СИСПР.

Общие стандарты ЭМС. Работы по стандартизации в области ЭМС направляются, в конечном счете, на то, чтобы для каждой группы однородной продукции или для продукции каждого конкретного вида был подготовлен соответствующий стандарт ЭМС (или раздел стандарта, устанавливающего технические требования к продукции). Однако выполнение этой задачи является достаточно сложным и потребует длительного времени.

Цель разработки общих стандартов ЭМС заключается в том, чтобы установить для ТС различных видов и назначений минимальный объем требований по ограничению помехоэмиссии и обеспечению помехоустойчивости, не ожидая, когда будут подготовлены и приняты стандарты ЭМС, распространяющиеся на группы однородной продукции и продукцию конкретного вида. После принятия указанных стандартов, они имеют преимущество над общими стандартами ЭМС.

Общие стандарты ЭМС разрабатываются для ТС, предназначенных для использования в определенных условиях ЭМО. Они устанавливают требования по ограничению помехоэмиссии и обеспечению устойчивости к внешним электромагнитным помехам и методы испытаний, применимые для ТС любых видов и назначений, предназначенных для использования в условиях указанной ЭМО. В настоящее время действуют две группы международных, отечественных и европейских общих стандартов ЭМС, распространяющихся на ТС, предназначенные для использования: в зонах с малым энергопотреблением.

Общие стандарты ЭМС являются важным промежуточным звеном при разработке стандартов ЭМС для групп однородной продукции и продукции конкретного вида и при отсутствии указанных стандартов применяются для целей сертификации.

Стандарты ЭМС для групп однородной продукции и продукции конкретного вида. Устанавливают конкретные требования ЭМС и методы испытаний, применимые для групп однородной продукции и продукции конкретного вида.

Стандарт ЭМС относится к стандарту для группы однородной продукции, если его требования применимы для группы продукции, имеющей общее назначение и основные характеристики, предназначенной для применения в одной и той же ЭМО (например, электроустановки зданий, оборудование информационных технологий, медицин-

ские электрические изделия). В противном случае стандарт ЭМС относится к стандарту для продукции конкретного вида (например, стиральные машины, слуховые аппараты, мониторы, печатные платы).

Стандарты ЭМС для групп однородной продукции и продукции конкретного вида имеют, как правило, следующие разделы: область применения, нормативные ссылки, характеристики ЭМО в местах применения технических средств, требования помехозащиты, соответствующие методы испытаний и требования помехоустойчивости.

Международные стандарты ЭМС для групп однородной продукции и для продукции конкретного вида разрабатываются техническими комитетами МЭК (исключая ТК 77) и подкомитетами СИСПР, а также ИСО, МОЗМ и другими международными организациями.

Радио стандарты ЭМС. В составе европейских стандартов ЭМС, применяемых при подтверждении требований Директивы ЭМС, имеется 47 стандартов, распространяющихся на радиооборудование. Они были подготовлены во второй половине девяностых годов и после введения в действие Директивы о радио и окончательном телекоммуникационном оборудовании (R & TTE), вновь прошли через стадию проектов стандартов и их обозначения были изменены. Поскольку ЕТСИ имел возможность начать подготовку стандартов ЭМС самостоятельно с самого начала, то стандарты, входящие в комплекс радио стандартов ЭМС оказались в значительно большей степени согласованными и скоординированными между собой, чем это имеет место для других стандартов ЭМС, распространяющихся на однородную продукцию, имеющую различные основы для разработки и, зачастую, связанную с существовавшими ранее стандартами.

Национальные стандарты ЭМС. Госстандарт России Постановлением от 27.06.03 г. № 63, выполняя функции Национального органа по стандартизации, признал национальными стандартами все действующие государственные и межгосударственные стандарты, принятые до 01.06.03 г. За национальными стандартами сохранено условное обозначение «ГОСТ Р» и «ГОСТ». Действующие национальные стандарты, в том числе, национальные стандарты ЭМС, до вступления в силу соответствующих технических регламентов, применяются в добровольном порядке, за исключением обязательных требований, обеспечивающих достижение целей законодательства РФ о техническом регулировании.

Требования, установленные национальными стандартами по ЭМС: требования помехозащиты для технических средств (ГОСТ Р 51317.6.3 / МЭК 61000-6-3 / ЕН 55081-1); требования устойчивости к

помехам технических средств, предназначенных для использования в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением (порт корпуса) (ГОСТ Р 51317.6.1 / МЭК 61000-6-1 / ЕН 55082-1); требования устойчивости к помехам технических средств, предназначенных для использования в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением (входной и выходной порт электропитания постоянного тока) (ГОСТ Р 51317.6.1 / МЭК 61000-6-1 / ЕН 55082-1); требования устойчивости к помехам технических средств, предназначенных для использования в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением (сигнальный порт, порт управления) (ГОСТ Р 51317.6.1/МЭК 61000-6-1 /ЕН 55082-1); требования устойчивости к помехам технических средств (ГОСТ Р 51317.6.1 / МЭК 61000-6-1 / ЕН 55082-1). Подробнее о требованиях см. в [1.4, т. II].

Управление процессами обеспечения ЭМС на промышленном предприятии представляет особую область деятельности, которая здесь не рассматривается. Желаящие с ней познакомиться должны обратиться к [1.6].

1.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЧЕЛОВЕКА

1.3.1. ВИДЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРО- МАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА

Электрические свойства тканей тела человека. Тело человека состоит из клеток, тканей, органов, имеющих разные электрические характеристики.

При протекании электрического тока через тело человека клетки и ткани препятствуют движению заряженных частиц. Величина сопротивления зависит от вида и состояния клеток, величины и частоты приложенного напряжения, длительности протекания тока, условий проведения измерений.

Наряду с сопротивлением R , Ом, электрические свойства тканей характеризуются удельным объемным электрическим сопротивлением ρ , Ом·м, и удельной объемной электрической проводимостью $\gamma = 1/\rho$, Сим/м.

При воздействии переменных ЭМП на ткани тела человека в них происходит колебание свободных зарядов и поворот дипольных молекул с частотой изменения ЭМП. Оба эти процесса сопровождаются тепловыми потерями. Величины потерь зависят от удельной электрической проводимости ткани, диэлектрической проницаемости ткани и частоты ЭМП. Соотношение между этими видами потерь выражается либо комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_k = \varepsilon' - j\varepsilon'',$$

где ε' - относительная диэлектрическая проницаемость, измеренная на частоте f ; $\varepsilon'' = \gamma / 2\pi f \varepsilon_0$ - коэффициент потерь, учитывающий преобразование энергии ЭМП в тепло из-за наличия электропроводности; γ - активная удельная электропроводимость, измеренная на частоте f , либо тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = \gamma / 2\pi f \varepsilon' \varepsilon_0$; δ - угол, дополняющий до 90° угол φ между векторами напряженности ЭП и полной плотностью тока, текущего через диэлектрик; $j = \sqrt{-1}$.

В табл. 1.3 и 1.4 приведены значения относительной диэлектрической проницаемости ε' и удельного сопротивления ρ , Ом·м в диапазоне от 100 МГц до 8,5 ГГц. Табл. 1.3, 1.4 свидетельствуют, что ткани, содержащие большое количество воды (около 70%), и сравнительно малую весовую долю макромолекул характеризуются относительной диэлектрической проницаемостью 50-70 и удельным сопротивлением около 100 Ом·см. К этой группе тканей относятся ткани печени, почек, сердца, мышцы и кожа. Ткани с меньшим содержанием воды (жировая ткань, костная ткань) имеют значительно меньшие диэлектрические проницаемости и более высокие удельные сопротивления. При увеличении частоты от 100 МГц до 8 ГГц диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление ткани постепенно уменьшаются.

Приведенные электрические свойства тканей человека позволяют рассчитать коэффициенты поглощения, коэффициенты отражения на границах между различными тканями, величину нагрева тканей, суммарное количество энергии, поглощаемой телом, характеристики рассеяния и оценить эффект воздействия ЭМП на ткани организма человека.

Таблица 1.3

Диэлектрическая проницаемость тканей тела при температуре 37 °С

Частота, МГц	100	200	400	1000	3000	8500
Мышцы	71-76	56	52-54	49-52	45-48	40-42
Сердечная мышца	-	59-63	52-56	-	-	-
Печень	76-79	50-56	44-51	46-47	42-43	34-38
Селезенка	100-101	-	-	-	-	-
Почки	87-92	62	52-55	-	-	-
Легкие	-	35	35	-	-	-
Кожа	65	-	46-48	43-46	40-45	36
Мозг	81-83	-	-	-	-	-
Жировая ткань	-	4,5-7,5	4-7	5,3-7,5	3,9-7,2	3,5-4,5
Костный мозг	-	-	-	4,3-7,3	4,2-5,8	4,4-5,4

Таблица 1.4

Удельное сопротивление тканей тела при температуре 37 °С

Частота, МГц	100	200	400	1000	3000	8500
Мышцы	-	95-105	85-90	75-79	43-46	12
Сердечная мышца	-	95-115	85-100	-	-	-
Печень	154-179	110-150	105-130	98-106	49-50	15-17
Почки	-	90	85	-	-	-
Легкие	-	160	140	-	-	-
Кожа	120-140	-	110-130	90-110	37-50	14
Мозг	180-195	-	-	-	-	-
Жировая ткань	-	1050-3500	900-2800	670-1200	440-900	240-370
Костный мозг	-	-	-	1000-2300	445-860	210-600

Пути воздействия электромагнитных полей на человека. Все население Земного шара в большей или в меньшей степени систематически подвергается воздействию ЭМП. Пути воздействия ЭМП на человека зависят от формы проявления ЭМП, частоты, модуляции.

Действие внешнего ЭСП на человека сопровождается появлением на кожном покрове неравномерно распределенных электрических зарядов (ЭЗ), в число которых входят внесенные извне ЭЗ и ЭЗ, появившиеся в результате электростатической индукции. Со стороны более высокого потенциала внешнего ЭСП группируются отрицательные ЭЗ, а на противоположной стороне тела человека – положительные ЭЗ.

ЭСП вызывает также поляризацию молекул тканей, поскольку молекулы обладают постоянным дипольным моментом, и, кроме этого, действие ЭСП приводит к изменению расположения ЭЗ в молекуле. Связанные ЭЗ поляризованных молекул стремятся ориентироваться аналогично свободным ЭЗ.

Разделившиеся свободные ЭЗ и поляризованные связанные ЭЗ молекул тканей создают свое ЭСП, вектор напряженности которого направлен навстречу вектору напряженности внешнего ЭСП. Внутри тела человека внешнее ЭСП ослабляется. Степень экранирования внутренних тканей тела человека во многом зависит от количества свободных ЭЗ. Для сравнения отметим, что в проводниках все электроны являются свободными. Они обеспечивают хорошую электропроводимость, а при нахождении проводника во внешнем ЭСП обеспечивают надежное экранирование.

ПеЭП создает в теле человека ток смещения. Величина тока и степень воздействия определяются частотой, интенсивностью и однородностью ПеЭП, электрическими характеристиками тканей тела. При промышленной частоте абсолютная диэлектрическая проницаемость тканей тела человека приблизительно равна $\epsilon_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Ф/м, а удельная проводимость – 0,1-0,2 См/м. Расчеты фирмы General Electric [1.3] показали, что при напряженности ЭП – 10 кВ/м и частоте 60 Гц плотности тока, протекающего вдоль тела, составляют: шея – 4,2 мА/м² (ток $I = 47$ мкА, периметр окружности $l = 38$ см), талия – 2,0 мА/м² (ток $I = 133$ мкА, $l = 91$ см), лодыжки – 41,0 мА/м² (ток $I = 168$ мкА, $l = 23$ см).

Колебательное движение заряженных частиц и диполей в ПеЭП сопровождается образованием тепла и физико-химическими процессами. Поглощение энергии поля происходит за счет ионной проводимости и диэлектрических потерь. Движение заряженных частиц (ионов) в

теле человека сопровождается образованием тепла, количество которого прямо пропорционально квадрату частоты колебаний, квадрату индукции МП и удельной проводимости тканей. При этом больше тепла образуется в тканях с хорошей электропроводимостью, т.е. в жидких средах (кровь, лимфа) и в тканях с хорошим кровоснабжением (мышцы, печень и др.).

ПМП любой природы беспрепятственно проникают в живые ткани и действуют на движущиеся в участках тела заряженные частицы (электроны, ионы, дипольные молекулы) с силой Лоренца $F = q\vartheta B \sin \alpha$, Н, где q - заряд иона, Кл; ϑ - скорость движения иона, м/с; B - индукция МП, Тл; α - угол между векторами $\vec{\vartheta}$ и \vec{B} .

В однородном МП свободные заряженные частицы двигаются по окружностям с радиусами

$$r = \frac{m}{q} \cdot \frac{\vartheta}{B},$$

где m - масса частицы, кг.

Период вращения составляет

$$T = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q}, \text{ с.}$$

Если угол α лежит в интервале $0 < \alpha < 0,5\pi$, то частицы движутся по спиральям, шаг которых равен

$$h = \frac{2\pi m \vartheta \cos \alpha}{Bq}.$$

При неоднородном МП с изменением индукции параметры движения меняются.

В реальных условиях движение заряженных частиц в теле человека определяется не только силой Лоренца, но и наличием ЭП, биотоками, электрическими свойствами тканей, рядом других факторов. Рассматривая возможное действие ПМП на ткани тела человека, необходимо отметить, что молекулы и структуры тела человека обладают диа- и парамагнитными свойствами. Их магнитные проницаемости близки к 1 и ПМП силового действия на них практически не оказывают. Вместе с тем многочисленные наблюдения свидетельствуют о реакциях организма на ПМП, механизмы действия которых пока выяснены недостаточно.

ПМП индуцируют в тканях и средах организма человека ЭДС, под действием которых протекают переменные вихревые токи. Эти токи являются возможно главным биологически активным фактором.

При низких частотах, включая промышленные частоты, величина плотности тока j подсчитывается по формуле: $j = \pi r f \gamma B$, А/м², где $\gamma = 0,1 - 0,5$ - удельная проводимость тела человека, См/м; f - частота тока, Гц; r - радиус контура, м; B - индукция МП, Тл.

Согласно расчетам, выполненным фирмой General Electric, при $\gamma = 0,1$, См/м, $f = 60$ Гц, $B = 50$ мкТл плотность токов в груди (при $r = 17$ см) составляет $0,16$ мА/м², в голове ($r = 9$ см) – $0,086$ мА/м².

В диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ преобразование энергии ЭМП в тепловую энергию в теле человека связано не только с движением свободных заряженных частиц, но и колебанием диполей (диэлектрические потери). Это объясняется следующим. Дипольные молекулы, участвуя в тепловом хаотическом движении, поворачиваются в различных направлениях. При наличии внешнего переменного ЭП оно передает дипольной молекуле энергию $pE \cos \theta$ (p - дипольный момент, E - напряженность переменного ЭП, θ - угол между направлением дипольного момента и вектором напряженности переменного ЭП), которая рассеивается при движении молекулы за каждый цикл изменения переменного ЭП. Потери энергии тела больше, чем ближе период изменения переменного ЭП ко времени релаксации молекул.

Рост диэлектрических потерь с частотой подтверждается экспериментальными данными, согласно которым потери, связанные с релаксацией молекул воды в тканях при частоте 1 ГГц составляют около 58% от общих потерь, при частоте 10 ГГц – около 90%, а при частоте 30 ГГц – около 98%.

При воздействии на тело человека ЭМП указанных диапазонов частот часть энергии ЭМП отражается от поверхности тела, оказывая на него давление

$$P = \frac{\Pi}{c} (1 + \rho),$$

где Π - ППЕ, Вт/м², $c = 3 \cdot 10^8$, м/с, ρ - коэффициент отражения, а остальная часть энергии ЭМП поглощается.

Глубина проникновения ЭМП в тело человека зависит от длины волны. Ориентировочно принято считать, что глубина проникновения в организм человека составляет одну десятую от длины волны.

В связи с тем, что разные ткани поглощают энергию неодинаково, то и нагреваются они до различных температур. Степень нагрева участков тела человека зависит также от величины ППЭ. При небольших величинах ППЭ тепловая энергия, выделяющаяся в теле человека благодаря функционирования механизмов терморегуляции может отдаваться в окружающее пространство без заметного повышения температуры тела. Локальное воздействие ЭМП на однородные участки тела в условиях естественного охлаждения поверхности тела приводит к наиболее сильному нагреву наружных слоев ткани. Внутренние области в этих условиях нагреваются слабее. Если имеет место принудительное охлаждение поверхности тела (например, за счет ее обдува), то максимальный подъем температуры имеет место во внутренних тканях на некотором удалении от поверхности тела человека, которое тем больше, чем длиннее волна ЭМП и интенсивнее охлаждение поверхности тела.

Заметная термическая реакция организма человека на воздействие ЭМП наступает при ППЭ, превышающих 10 мВт/см^2 . При меньших величинах ППЭ температура тела человека не повышается, но при этом ЭМП оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека.

При действии ЭМП на неоднородную структуру тканей (например, наличие слоя жира поверх мышечного слоя) распределение температуры имеет сложный характер. Вследствие более слабого поглощения энергии ЭМП жировой тканью тепловыделение в жировом слое оказывается ниже, чем в мышечном слое. Поэтому при облучении слоистой системы в мышечном слое имеет место более значительный подъем температуры, чем в жировом слое, расположенном ближе к источнику излучения. Это явление наблюдается особенно отчетливо на дециметровых волнах.

Механизмы воздействия ЭМП на человека

Биологические механизмы действия. На протяжении нескольких десятилетий ведутся исследования биологического действия ЭМП, результаты которых достоверно подтверждают, что организмы различных видов, от одноклеточных до сложного высокоорганизованного как человек, весьма чувствительны к постоянным и переменным ЭМП – от высоких до крайне низких интенсивностей, таких как естественные электромагнитные флуктуации. Доказано, что организмы реагируют на внешнее ЭМП низкой и сверхнизкой частоты при напряженности

ЭП порядка 0,1 В/м и индукции МП – 0,1 нТл. Несмотря на многочисленные биологические и биофизические исследования до настоящего времени нет достаточно ясного научного обоснования механизма действия ЭМП.

По мнению ряда исследователей, в основе биологических эффектов ЭМП могут быть различные механизмы взаимодействия, которые определяются физическими свойствами как внешних ЭМП, так электрическими характеристиками тканей и структур организма, где в тех или иных условиях реализуются биофизические и биохимические процессы. Биообъекты представляют собой гетерогенные системы, состоящие из тканей и жидких сред. Электромагнитная энергия, воздействующая на сложную гетерогенную систему, поглощается в силу разных электрических параметров тканей неравномерно. Механизмы взаимодействия, согласно существующим концепциям, могут быть разными. Высказан ряд предположений о первичных биофизических процессах при воздействии ЭМП. Несомненно, доказанным является тот факт, что одним из проявлений взаимодействия ЭМП с биосредами является поглощение энергии поля, сопровождаемое выделением тепла. Трансформация ЭМП в живых структурах в тепловую энергию была установлена экспериментальными исследованиями еще в начале прошлого столетия. Тепловая концепция первичного механизма действия ЭМП была принята в большинстве зарубежных стран и получила свою реализацию в обосновании допустимых уровней воздействия как для профессионалов, так и для населения. За гигиенический критерий допустимой интенсивности облучения был принят так называемый порог теплового действия ЭМП. Величина этого порога рассчитана с учетом колебаний значений тепловыделения, обусловленного процессами метаболизма организма, с которыми справляется система терморегуляции. На основании термодинамических расчетов ППЭ излучения в 10 мВт/см² может привести к дополнительной интегральной тепловой нагрузке, но по величине гораздо меньшей предела колебаний собственной теплопродукции организма.

Эта величина как порог теплового действия получила широкое распространение для разных частотных диапазонов и биологических объектов и считался единственно возможной причиной биологических эффектов.

Вместе с тем тепловая концепция биодействия фактора противоречила результатам многочисленных исследований по влиянию облучений низких интенсивностей. Был выдвинут ряд гипотез и предположений о возможных первичных механизмах действия ЭМП нетеплово-

го характера. Так, действие стационарного ЭП связывают с поляризацией кожи, вызывающей через рецепторную систему по каналам обратной связи, изменения регуляции различных физиологических функций. Значение кожных покровов, как первичной локализации воздействия ЭСП, подтверждается многочисленными исследованиями. Возможен механизм взаимодействия ЭСП с макромолекулами тканей. Поляризация макромолекул под воздействием поля приводит к разделению белковых цепей в мышечных волокнах и цепей ДНК, что может послужить пусковым механизмом биоэффектов.

Исследованиям механизмов действия ПМП посвящено наибольшее число публикаций. Однако теоретические и экспериментальные данные, полученные на модельных биологических структурах, показывают, что реального понимания механизма действия ПМП к настоящему времени еще не достигнуто. Вместе с тем, выделяются такие гипотезы, как «жидкокристаллическая» для МП с индукциями более $0,1 \text{ Тл}$ и «спинового запрета» для полей меньшей или той же индукции. Согласно предположениям механизмы биомагнитных эффектов обусловлены физическими явлениями, которые возникают на молекулярном и даже на атомном уровне. Причиной биоэффектов ПМП является ориентация диамагнитных или парамагнитных молекул в МП, которая может привести к изменению свойств биологических систем или биохимических реакций. Отмеченные концепции не исключают и другие специфические механизмы для целого организма. Например, макроскопические биомагнитные эффекты в системе крови и кровообращении. Рассмотрены эффекты МП на токи тканей либо на подвижные проводящие жидкости, которые не намагничиваются в поле. Выявлен эффект магнитодинамического торможения крови, который может привести к заметному биодействию. Эти эффекты обнаруживаются при воздействии только сильных ПМП. Установлено взаимодействие ПМП и с ферромагнитными включениями в биосредах. Огромное количество публикаций о действии ПМП и ПеМП на нервную систему, на увеличение онкологических заболеваний, расстройство психики не объясняют эти явления с точки зрения механизма их действия. До сих пор не разработаны физические основы действия МП на биосистемы. Экспериментальные данные не очень убедительны из-за слабой воспроизводимости результатов исследований.

В последние десятилетия обнаружено изменение концентрации свободного кальция во вне – и внутриклеточных средах при одновременном воздействии ПеМП и ПМП, вектора которых направлены параллельно. Выраженный эффект наблюдался на частоте ПеМП, близ-

кой к циклотронной частоте (десятки Гц), соответствующей иону Ca и определен как циклотронный резонанс [1.15]. Экспериментальная проверка показала, что слабое комбинированное МП, настроенное на параметрический резонанс для Ca^{2+} , существенно увеличивает скорость регенераций утраченной головной части планарий [1.10]. Ими установлена зависимость выраженности биоэффекта ПеМП, настроенного на резонанс для Ca^{2+} и Mg^{2+} , от соотношений величин индукции, компонент МП и от частоты ПеМП. Экспериментальные данные подтверждают предположение авторов о магнитном параметрическом резонансе в биосистемах при воздействии комбинированных МП, способного существенно влиять на метаболические и функциональные свойства биосистем. Вместе с тем, проведенный теоретический анализ закономерностей резонансного увеличения энергии иона в условиях воздействия ПеМП и ПМП показал, что выраженные резонансно подобные эффекты могут быть и при действии одного лишь ПМП и в комбинации с ПеМП. Эти эффекты обусловлены прецессией тепловых ионных колебаний в макромолекуле и не имеют отношения к параметрическому резонансу. Показано, что МП могут вызвать изменения энергии теплового движения ионов, которые составляют несколько процентов от его начальной тепловой энергии, но эквивалентные температурным сдвигам до десятков градусов. Этого вполне достаточно для изменения состояния иона в макромолекуле и ее конформационных преобразований.

ЭМП в диапазоне радиочастот, согласно ионной и дипольной теорий биодействия [1.13], влияют на заряженные и нейтральные молекулы, усиливая колебания их, увеличивая кинетическую энергию и подвижность, в зависимости от частоты. Высказывается также возможность кооперативных конформационных перестроек, изменений проницаемости и других свойств биологических мембран, нарушения кальциевого обмена клеток. Экспериментально установлено влияние радиочастотных ЭМП на работу ионных каналов, полученное на искусственных фосфолипидных мембранах. ЭМП могут влиять на ритмику клеточных и физиологических процессов. Предполагают, что биологические отклики, вызываемые этими нарушениями, имеют резонансную частотную зависимость. Так, на примере изменения степени выброса кальция из мозговой ткани на воздействие ЭМП с разной частотной модуляцией (9 Гц, от 11 до 16 Гц, 20 Гц), были установлены «частотные окна». Описан нелинейный характер зависимости биоэффекта от интенсивности ЭМП, что позволило выделить «энергетиче-

ские окна», которые смещались в зависимости от частоты. Выдвинутые гипотезы о биофизических механизмах действия рассматриваются как дополнительные к тепловому и не могут объяснить в настоящее время действие низкоинтенсивных ЭМП. Крайне затруднена и экспериментальная оценка их значимости. Между тем, «тепловая концепция» биодействия ЭМП получила дальнейшую разработку и базировалась на гипотезе микролокальных тепловых эффектов. Эта теория впервые была выдвинута еще в 1938 г. Согласно этой теории локальный микронагрев возможен на границах биологических сред, имеющих различные электрические проводимости и диэлектрические проницаемости. В результате этого возможно образование стоячих электромагнитных волн (ЭМВ) с интенсивностью на один-два порядка выше, а для отдельных структур и более, по сравнению с величиной энергии падающей ЭВМ. Существенное значение в распределении энергии поля имеют пространственные формы и объемы биологических объектов, ориентация их относительно векторов поля и др. Тепловизионные экспериментальные исследования, выполненные американскими учеными на разнообразных фантомах и животных, показали неравномерное поглощение энергии поля диапазона радиочастот различными структурами. Была показана реальная возможность образования «горячих пятен» при низкоинтенсивном воздействии. Так, термоселективный эффект при облучении головы кошки ЭМП низкого уровня частотой > 900 МГц проявляется образованием «горячего пятна» в области гипоталамуса, где сосредоточены центры регуляции различных функциональных систем. Тепловая концепция механизма действия ЭМП обосновывается в материалах международного симпозиума «Взаимодействие ЭМП с биологическими системами», 1995 г. В работе (Барнс Ф. и соавт.) рассматриваются теории и эксперименты, связанные с действием ЭМП на скорость химических реакций посредством теплового нагрева. Показано, что малые температурные сдвиги под воздействием ЭМП могут привести к выраженным изменениям в скорости химических реакций. Могут иметь место изменения и в связывании белка клеточными мембранами, в результате чего может происходить срыв белковых молекул при небольшом увеличении температуры. В случае модулированных волн тепловой нагрев может опосредовать демодуляцию сигнала и генерацию химического сигнала, воздействующего на биосистемы.

Концепция информационного воздействия, при котором определяющим параметром ЭМП является модуляция, практически не разработана. Вместе с тем в публикации (Хазен А.М. [1.4]) рассматриваются особенности синтеза информации при действии ЭМП на биосистемы.

Главным выводом работы является то, что «ЭМП не вносит и не может напрямую вносить информацию в организм». Электромагнитное воздействие, как внешний агент, создает возбуждение, необходимое для перевода биосистемы из одного равновесного состояния в другое. В зависимости от конкретного спектра облучения неравновесность может быть создана избирательно «по отношению к степеням свободы биосистемы». Автор считает, что выход из возбужденного состояния есть процесс синтеза информации, которым можно управлять с помощью «условий, заданных биохимическими особенностями внутренней среды организма».

Физиологические механизмы биоэффектов. Одной из главных особенностей биологического действия ЭМП является изменение функционального состояния центральной и вегетативной нервной системы, непосредственно или опосредованно влекущее за собой нарушения различных функций организма. Подобные физиологические отклонения различной степени выраженности достаточно убедительно доказаны многочисленными экспериментальными данными как на животных, так и на добровольцах. Установлено, что под влиянием ЭСП происходит изменение потока афферентных импульсов, идущих с экстерорецепторов кожи в соответствующие структуры мозга, что приводит к различным реакциям адаптационного характера. При действии ЭСП на биоэлектрическую активность коры головного мозга животных зарегистрирована реакция десинхронизации во время появления и исчезновения поля. Однако выраженные и более стойкие изменения активности коры и более глубоких структур мозга по данным ЭЭГ наблюдаются при действии ЭСП высокой напряженности. Систематическое повторение воздействий ЭСП углубляет эффект. Однако после прекращения контакта с фактором функции восстанавливались. Изменение функционального состояния отделов мозга под воздействием ЭСП сопровождается отклонением в регуляционной деятельности сердечно-сосудистой системы и дыхания. Наиболее ранним проявлением влияния ЭСП на организм являются нейрональные сдвиги. Отклонения системных реакций проявляются позднее, что, возможно, связано с защитно-приспособительным характером этих отклонений, направленных на стабилизацию гомеостаза.

Наибольшее внимание при исследованиях на протяжении десятилетий уделялось биологическому действию ПМП. Изучение и использование лечебного действия ПМП велось уже в XIX веке. Результаты многочисленных исследований указывали на преимущественное влияние поля на функции нервной системы. Вместе с тем результаты

дальнейших научных разработок проблемы магнитобиологии свидетельствовали о проявлениях реакций организма на различных уровнях структурной его организации – клеточном, тканевом, системном и организменном. Биоэффекты действия поля многообразны, что свидетельствует о вовлечении в процесс как регуляторных, так и исполнительных функций. Выраженные реакции отмечены со стороны центральной нервной и нейроэндокринной систем, аппарата кровообращения и дыхания, системы крови и др. Влияние ПМП на деятельность нервной системы проявляется в изменении биоэлектрических процессов мозга. Эта реакция носит генерализованный характер. Однако интенсивность реакций зависит от чувствительности структуры и от ее функционального состояния. Наибольшая реактивность к действию ПМП проявляется со стороны гипоталамуса и коры головного мозга, а меньшая – ретикулярной формации среднего мозга. Выраженные реакции мозга после прекращения кратковременных воздействий быстро проходят, воздействие ПМП не приводит к срыву компенсаторных механизмов.

Наблюдаемые реакции на воздействие ПМП неоднозначны, одни из них возникают в процессе воздействия и быстро нормализуются по прекращении контакта с полем (изменения биоэлектрических процессов в мозге), другие возникают во время действия и сохраняются в течение длительного времени (изменения периферической крови и сперматогенного аппарата). В возникновении, развитии, уровне и направленности реакций на воздействие ПМП существенное значение имеют его физические характеристики (напряженность, степень однородности, наличие пульсаций) и условия воздействия. Наряду с адаптацией некоторых функциональных систем к воздействию поля, имеют место и признаки состояния напряжения и истощения функций в период последствий, даже со стороны тех же систем, которые нормализовались в процессе воздействия.

Общие реакции организма на воздействие ПМП не являются специфическими, хотя некоторые проявления действия поля отличаются от наблюдаемых при воздействии других физических факторов.

Многочисленные экспериментальные данные изучения эффектов воздействия переменных ЭМП от КНЧ до КВЧ свидетельствуют о разнообразных проявлениях – от летальных исходов до адаптационных реакций, зависящих от многих параметров. Гибель животных под воздействием ЭМП разных частотных диапазонов наблюдали многие исследователи. Так, ЭП частотой от 50 до 500 Гц вызывало гибель мышей в 70% случаев при интенсивности 650 кВ/м в течение часовой экс-

позиции. 100% летальный исход крыс отмечен при воздействии ЭП частотой 14,8 МГц в течение 10 мин. напряженностью 9 кВ/м, а при облучении ЭП частотой 69,7 МГц напряженностью 5 кВ/м в течение 5 мин. ЭМП частотой 200 МГц вызывало гибель собаки через 15 мин при интенсивности 330 мВт/см^2 и т.д. Летальный исход животных связывается не только с тепловым эффектом, но и с необратимыми нарушениями регуляторных функций организма. Морфологические изменения в тканях и органах под воздействием ЭМП могут быть самыми различными – от выраженных изменений (ожоги, некроз тканей, кровоизлияние, дегенеративные нарушения и др.) до умеренных. Однако при многократных воздействиях ЭМП более низких интенсивностей от 1 мВт/см^2 также обнаружены морфологические отклонения. Наиболее чувствительными к таким воздействиям оказываются первные ткани – кожные рецепторы, интерорецепторы и структуры центральной нервной системы (синапсы коры головного мозга, таламо-гипоталамическая область, ствол мозга, нейроглия). Характерно, что такие нарушения однотипны при воздействии ЭМП разных частот вплоть до постоянного МП.

Одним из ранних проявлений биоэффектов ЭМП разных интенсивностей и частотных диапазонов являются реакции, связанные с прямым, либо опосредованным действием фактора на центральную нервную систему (ЦНС). Действие ЭМП проявляется в изменении поведенческих реакций животных – изменении двигательной активности, реакции избегания, ориентационных реакций, а также нарушений условных и безусловных рефлексов. Более высокие уровни ЭМП вызывают усиление тормозных процессов, малые интенсивности полей обладают стимулирующим действием. Однако, многократные воздействия ЭМП слабых интенсивностей приводят к кумуляции функциональных нарушений и, как следствие, к развитию тормозных процессов. Результаты многочисленных исследований биоэлектрической реакции головного мозга на воздействие ЭМП разных частот и характера (непрерывное, прерывистое, импульсное) подтверждает высокую чувствительность и неспецифичность реакции ЦНС. Электрические реакции головного мозга животных по данным электроэнцефалограмм характеризуются десинхронизацией при включении и выключении поля длительным латентным периодом реакции и длительным последствием.

Действие ЭМП вовлекает в реакцию не только ЦНС, но и многие регулируемые физиологические процессы. Исследованиями доказано влияние ЭМП на функции сердечно-сосудистой системы, вызывая реакции ваготонической (снижение артериального давления, урежение

пульса) или симпатикотонической (повышение давления и частоты пульса) направленности, в зависимости от параметров ЭМП, времени и локализации их воздействия. Установлено действие ЭМП на эндокринную систему и процессы обмена. Данные экспериментальных исследований свидетельствуют о реакциях щитовидной железы, гипофиза, коры надпочечников и половых желез на воздействие ЭМП разных интенсивностей. Отмечены функциональные нарушения белкового, углеводного обмена, окислительных процессов, отклонения в кроветворной функции, изменения в иммунокомпетентной клеточной системе организма. Выявлены генетические эффекты, влияние ЭМП на репродуктивную функцию и эмбриогенез.

Во всех описанных проявлениях воздействия ЭМП разных частот и интенсивностей выявляются общие физиологические закономерности: реакции неспецифичны, возможна адаптация к фактору (постоящая), при хроническом действии малых интенсивностей отмечена кумуляция скрытых изменений, установлена фазность развития реакций, зависящая от интенсивности и продолжительности воздействия. Экспериментально показано, что ЭМП как проникающий фактор, обладает прямым и опосредованным механизмом действия. Отмечается избирательность (селективность) воздействия ЭМИ на определенные органы, которые рассматриваются как критические, являющиеся мишенями для определенных видов воздействия (хрусталик глаза, семенники, слизистая желудка и кишечника). Высказывается мнение, что высокой чувствительностью к действию электромагнитного фактора обладают целостные организмы. Функциональные нарушения организма, вызванные воздействием ЭМП, как правило, обратимы. Однако, известны и необратимые изменения, которые проявляются в возникновении катаракты, хромосомных aberrациях клеток, в развитии патологических процессов.

Клинико-физиологические проявления воздействия ЭМП. Эффекты воздействия ЭМП на организм человека изучались как в эксперименте на добровольцах, так и при исследовании состояния здоровья специалистов, работающих с источниками ЭМП. Основное внимание было направлено на оценку состояния нервной системы, как ее центральных образований, так и различных анализаторных функций. Изучение изменений нейрофизиологических и психофизиологических показателей функционального состояния ЦНС, а также оценка характера и направленности этих изменений свидетельствует о сходстве этих отклонений при воздействии различных физических параметров ЭМП. Высокие уровни ЭМП, будь это ЭСП, ПМП или переменное МП, при

различной экспозиции вызывают процессы угнетения (торможения) биоэлектрической активности мозга, замедление процесса обучения при выполнении соответствующих тестов. Воздействие ЭМП низких интенсивностей сопровождается превалированием возбудительного процесса. Отмечена многофазность реакций. Реакции ЦНС на действие ЭМП больше выражены при действии интермиттирующей экспозиции, чем при действии в непрерывном режиме. Большинство исследователей приходят к заключению о функциональных сдвигах в звеньях центральной и периферической нервной системы на основании наблюдений за результатами действия ЭМП на различные функциональные системы. Описаны зрительные, слуховые тактильные, тепловые и другие эффекты, вызываемые ЭМП невысоких интенсивностей. Весьма чувствительны к воздействию ЭМП температурный и зрительный анализаторы. При облучении микроволнами области спины и затылочной части головы отмечено повышение возбудимости зрительного анализатора и изменение зрительной функции, свидетельствующие об усилении возбудительного процесса коры головного мозга. Однако длительная экспозиция приводила к противоположной реакции, с неполным восстановлением после прекращения облучения. Этот факт свидетельствует о длительном последствии электромагнитного раздражителя. Кумуляция эффекта приводит при продолжающейся экспозиции к глубокой и стабильной перестройке уровня функционирования нервной системы. Подобная направленность реакции отмечена и со стороны температурного анализатора. При длительном воздействии ЭМП разных частот невысоких интенсивностей отмечено повышение порога температурной чувствительности и снижение количества активных тепловых точек на действие теплового раздражителя. Подобная демобилизация элементов температурной рецепции и адекватное повышение порога термочувствительности наблюдается и при действии инфракрасной радиации. Механизм подобной настройки тепловых рецепторов объясняется изменением соотношения процессов теплопродукции и теплоотдачи. Снижение активности кожных терморецепторов связывается с увеличением отдачи тепла, хотя интенсивности ЭМП относятся к «нетермогенным» уровням. Установлено, что при длительных повторяющихся облучениях в терморегуляционном центре возникает очаг доминанты, о чем свидетельствуют реакции усиления теплоотдачи в ответ на условный раздражитель (без применения облучения).

При исследовании слухового анализатора человека на воздействие импульсных микроволн и ЭМП более низких частот испытуемые ощущали жужжание, свист. При экранировании головы ощущение

«радиозвука» исчезало. Исследование функционального состояния обонятельного анализатора людей, работающих с микроволновой аппаратурой, показало, что невысокие интенсивности электромагнитных излучений, при длительном воздействии, способствуют повышению порогов ощущения ряда химических веществ. Установлено влияние ЭМП на моторные функции- нарушение координации движения, тремор пальцев рук, повышение двигательной активности во время сна. Эти изменения свидетельствуют об усилении возбуждательного процесса не только коры головного мозга, но и подкорковых образований.

Реакции сердечно-сосудистой системы человека в эксперименте с воздействием ЭМП неоднозначны. Отмечено повышение артериального давления с увеличением ударного и минутного объема сердца и изменением периферического сопротивления сосудов. Многие исследователи констатировали гипотензивные реакции. Однако при длительных воздействиях ЭМП, как правило, имеет место фазное течение реакции. Установлены изменения биохимических, гематологических показателей. Страдают и неспецифические защитные функции организма, такие как фагоцитарная активность лейкоцитов, комплементарная активность и бактерицидные свойства сыворотки крови и др. Снижение иммунологической реактивности и сопротивляемости организма при систематическом воздействии ЭМП малых интенсивностей приводит к более частым и длительным инфекционным заболеваниям.

Повышенная электромагнитная нагрузка на организм человека способна вызывать реакции различных систем, связанные с их стимуляцией, угнетением, либо с кумуляцией биоэффекта. Частая активация адаптивных механизмов может привести к их напряжению, лимитированию и, как следствие, к нарушению регуляции функций и развитию патологических состояний. В этом и проявляется особенность действия электромагнитного фактора, способного, при длительном контакте, радикально изменить статус здоровья и структуру заболеваемости. В силу различной степени реагирования человека (метеотропность) на внешнее ЭМП могут развиваться заболевания условно обозначенные (В.П. Казначеев) как «электромагнитные заболевания».

Для обеспечения безопасности и предупреждения негативного воздействия на статус здоровья людей, контактирующих с ЭМП, должны выполняться гигиенические требования, регламентирующие уровни воздействия и экспозиции как в производственных условиях, так и в окружающей среде.

1.3.2. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕХНОСФЕРЕ

Принципы нормирования ЭМП. По определению предельно допустимый уровень (ПДУ) - это уровень вредного фактора, который не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований, в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. Предельно допустимый уровень устанавливается по биологически активному параметру воздействующего фактора.

ЭМП, действующее на биологические объекты, характеризуется целым рядом параметров: интенсивностью ЭМП (напряженности ЭП и МП); частотой излучения; продолжительностью облучения; модуляцией сигнала; сочетанием частот ЭМП; периодичностью действия и др. Биологическая активность почти всех перечисленных параметров уже доказана и степень их воздействия стараются учесть в разрабатываемых нормативных документах.

Параметры ЭМП, регламентируемые санитарно-гигиеническими нормативами. Гигиеническая оценка ЭМП производится по фактическим уровням измеренных ЭМП и соответствие их гигиеническим нормативам, гарантирующим безопасность человека и обеспечивающим благоприятные условия его жизнедеятельности. Контролируемые параметры ЭМП представлены табл. 1.5.

Согласно санитарным нормам в диапазоне частот 0 – 300 МГц контролируются напряженность ЭП и напряженность МП (индукция МП). В диапазоне 300 МГц – 300 ГГц измеряется ППЭ. Дозу облучения ЭМП называют энергетической экспозицией – ЭЭ (иногда энергетической нагрузкой – ЭН). В диапазоне частот до 300 МГц для ЭП – ЭЭ_Э нормируется в (В/м)² · ч, а для МП – ЭЭ_Н в (А/м)² · ч. В диапазоне частот выше 300 МГц энергетическая экспозиция нормируется по плотности потока энергии – ЭЭ_{ППЭ} с размерностью (Вт/м)² · ч, (мкВт/см)² · ч.

Энергетические экспозиции рассчитываются по формулам:

$$\text{энергетическая экспозиция по ЭП} - \text{ЭЭ}_E = E^2 T,$$

$$\text{энергетическая экспозиция по МП} - \text{ЭЭ}_H = H^2 T,$$

$$\text{энергетическая экспозиция по ППЭ} - \text{ЭЭ}_{ППЭ} = ППЭ \cdot T,$$

где T - продолжительность экспозиции в ч.

При проведении электромагнитного мониторинга не следует забывать о структуре поля, которая в общем случае может быть весьма сложной и представлять собой до шести компонент напряженности ЭП и МП. В отечественной и зарубежной санитарно-гигиенической практике принята энергетическая концепция учета отдельных составляющих поля. Если в данной точке пространства создается ЭМП, описываемое несколькими несинфазными пространственными компонентами в декартовой E_x, E_y, E_z (или H_x, H_y, H_z) или круговой цилиндрической E_r и E_z (или H_φ) системах координат, то суммарная напряженность поля E_Σ (или H_Σ) от каждого такого ТС определяется в виде:

$$E_\Sigma = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}; E_\Sigma = \sqrt{E_r^2 + E_z^2};$$

$$H_\Sigma = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}; H_\Sigma = H_\varphi.$$

1. Изолированным – от одного источника ЭМП. В этом случае оценка опасности ЭМО производится непосредственно по предельно допустимому уровню (ПДУ) ЭМП, определяемому по рабочей частоте ТС.

2. Сочетанным – от двух и более источников ЭМП, имеющих одинаковую величину ПДУ одного и того же нормируемого параметра.

3. Смешанным – от двух и более источников ЭМП, имеющих различные величины ПДУ одного или различных нормируемых параметров.

Таблица 1.5

Параметры ЭМП, измеряемые при санитарно-гигиеническом контроле

Наименование поля	Диапазон частот	Контролируемый параметр	Обозначение	Единица измерения
ЭСП	0 Гц	Напряженность ЭП Потенциал ЭП	E Φ	В/м В
ПМП	0 Гц	Напряженность МП Индукция МП	H B	А/м Тл
ЭМП	0,1 – 300	Напряженность ЭП Напряженность МП Индукция МП	E H B	В/м А/м Тл

Наименование поля	Диапазон частот	Контролируемый параметр	Обозначение	Единица измерения
ЭМП	0,3 кГц – 300 МГц	Напряженность ЭП Напряженность МП Индукция МП	E H B	В/м А/м Тл
ЭМП	0,3 – 300 ГГц	Плотность потока энергии	ППЭ	мВт/см^2 , мкВт/см^2
ЭМП	30 кГц – 300 МГц	Энергетическая экспозиция по ЭП Энергетическая экспозиция по МП	\mathcal{E}_E \mathcal{E}_H	$(\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}$ $(\text{А/м})^2 \cdot \text{ч}$
ЭМП	300 МГц – 300 ГГц	Энергетическая экспозиция плотности потока энергии	$\mathcal{E}_{ПП}$	(мкВт/см^2)

С критериями оценки опасности ЭМП тесно связан характер воздействия, под которым понимают совокупное загрязнение окружающей среды ЭМП и другими факторами. Характер воздействия ЭМП может быть комбинированным – в случае воздействия ЭМП и какого-либо другого неблагоприятного загрязняющего фактора (материального или энергетического).

Сочетанное, смешанное и комбинированное воздействие ЭМП предполагает введение критериев и алгоритмов, по которым производится оценка состояния окружающей среды. Воздействие может быть постоянным и прерывистым. Типичным случаем прерывистого воздействия является облучение от сканирующих антенн РЛС. Воздействию может подвергаться все тело человека (общее облучение) или части тела (локальное облучение), например, в случае облучения ЭМП радиотелефона.

Отметим, что нормирование ЭМП осуществляется в зависимости от частоты ЭМП (с увеличением частоты имеется четкая тенденция уменьшения предельно допустимого уровня, т. е. нормы становятся строже), от категории облучаемых людей (население, производственный персонал, пользователи), от вида ТС (телевидение, сотовая связь, радиолокаторы, ЛЭП, печи СВЧ, видео-дисплейные терминалы и т. д.).

В последние годы появились публикации [1.4, т. II], в которых содержатся весьма важные указания о наличии так называемых резонансных эффектов при воздействии на биобъекты ЭМП, о роли в био-

эффектах некоторых форм модуляции; показано наличие частотных и амплитудных окон, обладающих высокой биологической активностью на клеточном уровне, а также при воздействии ЭМП на центральную нервную и иммунную системы. Во многих работах указываются на "информационный" механизм биологического действия ЭМП. Опубликованы данные о неадекватных патологических реакциях людей на модулированные ЭМП.

Однако, действующие гигиенические нормативы, основанные лишь на регламентации энергетической нагрузки, слагаемой из интенсивности и времени контакта с ЭМП, не позволяют распространить ПДУ на условия воздействия ЭМП со сложными физическими характеристиками, в частности применительно к конкретным режимам модуляции.

Следует остановиться и на комбинированном действии ЭМП и других факторов. Имеющиеся результаты свидетельствуют о возможной модификации биоэффектов ЭМП как тепловой, так и нетепловой интенсивности под влиянием ряда факторов как физической, так и химической природы. Условия комбинированного действия ЭМП и других факторов позволили выявить значительное влияние ЭМП сверхмалых интенсивностей на реакцию организма, а при некоторых сочетаниях может развиваться ярко выраженная патологическая реакция [1.4, т. III].

Категории людей, подвергающихся воздействию ЭМП. Ограничение воздействия техногенных ЭМП на человека обеспечивается гигиеническим регламентированием. Условно население распределяется на три группы риска.

К первой группе риска относят специалистов, которые в силу своих служебных обязанностей систематически подвергаются воздействию ЭМП. В число их входят наладчики и регулировщики радиоаппаратуры; работники, занятые эксплуатацией, наладкой и ремонтом высокочастотных устройств, РЛС, ЛЭП и силового высоковольтного оборудования.

Вторую группу риска составляют лица, профессионально не связанные с обслуживанием источников облучения, но по расположению рабочих мест и мест возможного их нахождения подвергаются облучению. К второй группе риска относятся работники наземных служб аэропортов, заводов, учреждений, организаций, предприятий, учебных заведений и строительно-монтажных управлений гражданской авиации, экипажи морских, рыболовецких и речных судов, работники морских портов и т.д.

К третьей группе риска относятся жители городов и населенных пунктов, находящихся в зоне действия ЭМП ЛЭП, РЛС, радиоцентров, телецентров и мобильных средств связи.

Перечень специалистов и населения к разным группам риска, а также ПДУ параметров ЭМП можно узнать из [1.2, 1.3].

Гигиеническое нормирование ЭМП

Общие сведения. Нормальная жизнедеятельность человека в «зоне экологического комфорта» возможна в ЭМП со значениями параметров, близкими к «фоновым». Превышение значений этих параметров ухудшает среду обитания. Так, техногенные ЭМП, интенсивно загрязняющие окружающую среду, могут рассматриваться как экологогигиенический фактор риска, негативно влияющий на состояние среды и здоровья не только специалистов, работающих с источниками излучения, но и населения с возможными отдаленными последствиями. Восстановление качества среды обитания в определенной степени обеспечивается регламентированием антропогенных ЭМП, создаваемых разнообразными по техническим характеристикам источниками.

Вопросы обеспечения безопасности и защиты человека от воздействия ЭМП актуальны и решаются различными путями. Основным фундаментальным профилактическим направлением по улучшению условий жизнедеятельности человека является гигиеническое нормирование воздействия ЭМП как для производственных условий, так и для окружающей среды.

Пространственно-временная регламентация ЭМП разработана в различных странах. Однако, анализ нормативных материалов свидетельствует о значительном расхождении стандартов. Объясняется это отличием принципиальных концепций методологического подхода и различием критериев оценки биологического действия ЭМП на человека. В настоящее время гигиеническое регламентирование продолжается в части корректировки имеющихся нормативов, разработки нормативов отдельных частотных диапазонов составляющих ЭМП и с учетом взаимодействия ЭМП с другими факторами окружающей среды.

Далее приводятся основные нормативные документы, регламентирующие уровни параметров ЭМП.

Отечественные нормативы ЭМП. Отечественные гигиенические нормативные документы разработаны по частотным диапазонам: ЭМП радиочастотного диапазона от 30 кГц до 300 ГГц; ЭМП участка спектра электромагнитных колебаний от 10 кГц до 30 кГц; ЭП и МП

частотой 50 Гц; ЭСП; ПМП и по видам отдельных радиоэлектронных средств (персональные электронно-вычислительные машины, средства сухопутной подвижной радиосвязи, передающие радиотехнические объекты, бытовая электротехника). Для обеспечения безопасности населения ЭМП регламентируются как для жилых помещений, так и для селитебных и других территорий (сельскохозяйственные земли, дороги, труднодоступная местность).

Для защиты населения разработаны межгосударственные правила и нормативы допустимых уровней ЭМП, при применении товаров народного потребления (ТНП) в бытовых условиях. Законодательный документ устанавливает допустимые уровни ЭМП, которые обеспечивают безопасное и безвредное использование в бытовых условиях электротоваров различного назначения. Гигиенические требования распространяются на ТНП как отечественного производства, так и на ввозимые из-за рубежа, и являются обязательными при разработке нормативной документации на ТНП (стандарты, технические условия, технологические инструкции и др.), а также при производстве и эксплуатации ТНП. Основные регламентируемые параметры ЭМП, излучаемые ТНП, приведены табл. 1.6.

Допустимый уровень напряженности ЭП частотой 50 Гц, создаваемого ТНП, не должен превышать 0,5 кВ/м. Напряженность ЭСП при использовании ТНП (например: бытовые электрические приборы, радиоэлектронная аппаратура, ткани, обувь, одежда, мебель, игрушки, ковровые покрытия, отделочные и строительные материалы и т.п.) как в жилых, так и в нежилых помещениях составляет 15 кВ/м. Этот норматив распространяется на полимерные и полимер-содержащие строительные материалы, изделия и конструкции. В этом документе содержится перечень групп ТНП, которые рассматриваются как источники ЭМП, ЭП промышленной частоты и ЭСП.

Таблица 1.6

Допустимые уровни напряженности ЭП и ППЭ ЭМП, создаваемых товарами народного потребления

Диапазон частот	0,3–300 кГц	0,3–3 МГц	3–30 МГц	30–300 МГц	0,3–300 ГГц
Допустимые уровни	25 В/м	15 В/м	10 В/м	3 В/м	10 мкВт/см ²

Для бытовых индукционных печей, работающих на частоте 20–22 кГц, рекомендуются безопасные уровни напряженностей: ЭП – 0,5 кВ/м, МП – 4 А/м. ППЭ, излучаемая микроволновыми печами не должна превышать 10 мкВт/см^2 на расстоянии 50 см от печи. Предусмотрен контроль ЭМП заводом–изготовителем при проверке качества готовой продукции и мастерами, осуществляющими ремонт этих изделий.

ВДУ ЭМП, создаваемых ПЭВМ в помещениях дошкольных, образовательных и развлекательных учреждений представлены в табл. 1.7.

В области промышленных частот (50 Гц), источниками которых являются ЛЭП, действуют ограничения воздействия ЭП на население как для условий внутри жилищ, так и на территориях с длительным и кратковременным пребыванием людей. В санитарных нормах и правилах защиты населения от воздействия ЭП приводятся дифференцированные допустимые уровни. В помещениях жилых зданий напряженность ЭП не должна превышать 0,5 кВ/м, ВДУ индукции МП не должен быть выше 5 мкТл (временный норматив). К этой категории относятся детские, лечебно-оздоровительные учреждения, профилактории, дома для престарелых, дома отдыха и другие подобные учреждения. На территориях таких учреждений, в зонах жилой застройки и в местах отдыха, величина напряженности ЭП не должна превышать 1 кВ/м, ВДУ индукции МП составляет 10 мкТл. В местах непродолжительного пребывания людей (поселки, сельские населенные пункты, пригородные зоны, садоводческие участки) уровни напряженности ЭП могут достигать 5 кВ/м. На участках пересечения ЛЭП с автомобильными дорогами I–IV категорий напряженность ЭП не должна превышать 10 кВ/м. В ненаселенной местности, на сельскохозяйственных землях величины напряженности ЭП допускаются до 15 кВ/м. В труднодоступных местах для транспорта и сельскохозяйственной техники, выгороженной для доступа населения, допускается уровень напряженности поля до 20 кВ/м. В системе передачи электрической энергии источниками ЭМП, кроме ЛЭП, могут быть трансформаторные подстанции, открытые распределительные устройства и др., вблизи которых могут формироваться зоны повышенных уровней ЭМП, которые также подлежат ограничению по тем же действующим санитарным нормам и правилам.

Таблица 1.7

ВДУ ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров			ВДУ ЭМП
Напряженность ЭП	Диапазон частот	5 Гц – 2 кГц	25 В/м
		2,0 – 400 кГц	2,5 В/м
Индукция МП	Диапазон частот	5 Гц – 2 кГц	250 нТл
		2,0 – 400 кГц	25 нТл
Напряженность ЭСП			15 кВ/м

Таблица 1.8

Предельно допустимые уровни напряженности ЭП и ППЭ ЭМП спектра радиочастот для населения

Объект Жилые помеще- ния, включая балконы и лоджии	Диапазон частот				
	30-300 кГц	0,3-3,0 МГц	3-30 МГц	30-300 МГц	0,3-300 ГГц
	Напряженности ЭП РЧ				ППЭ
	В/м	В/м	В/м	В/м	мкВт/см ²
	25,0	15,0	10,0	3,0*	10,0 100**

* Кроме средств радио- и телевизионного вещания, работающих в диапазоне частот 48,5 – 108; 174 – 230 МГц.

**Для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20.

Защита населения от воздействия ЭМП диапазона 30 кГц – 300 ГГц, создаваемых передающими радиотехническими объектами (ПРТО), РЛС, обеспечивается, если напряженность ЭП и ППЭ ЭМП не превышают величин, указанных в табл. 1.8. Эти нормативы распространяются на жилые, общественные помещения, селитебные территории, места общего отдыха.

Независимо от продолжительности воздействия параметры ЭМП не должны превышать ПДУ. При эксплуатации РЛС специального назначения, используемых для контроля космического пространства и работающих в диапазоне частот 150–300 МГц в режиме электронного сканирования луча, на территории населенных мест, расположенных в ближней зоне диаграммы излучения, уровень ППЭ не должен превышать 10 мкВт/см² (6 В/м), а на территориях, расположенных в дальней зоне диаграммы излучения – 100 мкВт/см² (19 В/м).

ПДУ ЭМП, излучаемых антенными системами радио - телевизионных центров в диапазоне частот 48,5–108; 174–230 МГц определяются по формуле:

$$E_{\text{ПДУ}} = 21 f^{-0,37},$$

где $E_{\text{ПДУ}}$ - значение ПДУ напряженности ЭП, В/м; f - частота, МГц.

Уровни ЭМП, создаваемые антеннами базовых станций на селитебных территориях, внутри жилых и общественных зданий, не должны превышать ПДУ в следующих диапазонах частот:

$$27 \text{ МГц} \leq f < 30 \text{ МГц} - 10,0 \text{ В/м};$$

$$30 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} - 3,0 \text{ В/м};$$

$$300 \text{ МГц} \leq f \leq 2400 \text{ МГц} - 10,0 \text{ мкВт/см}^2.$$

Для подвижных станций сухопутной радиосвязи (переносные радиостанции, сотовые радиотелефоны, абонентские терминалы спутниковой связи) устанавливаются следующие ВДУ ЭМП непосредственно у головы человека: в диапазоне частот $27 \text{ МГц} \leq f < 30 \text{ МГц} - 45,0 \text{ В/м}$; в диапазоне частот $30 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} - 15,0 \text{ В/м}$; в диапазоне частот $300 \text{ МГц} \leq f \leq 2400 \text{ МГц} - 100,0 \text{ мкВт/см}^2$.

При одновременном излучении нескольких источников, для которых установлены единые ПДУ, должно соблюдаться условие:

$$\left[\sum_{i=1}^n E_i^2 \right]^{0,5} \leq E_{\text{ПДУ}} \text{ или } \sum_{i=1}^n \text{ППЭ}_i \leq \text{ППЭ}_{\text{ПДУ}},$$

где E_i (ППЭ_{*i*}) - напряженность ЭП (ППЭ), создаваемая в данной точке каждым из источников ЭМП радиочастот; $E_{\text{ПДУ}}$ (ППЭ_{ПДУ}) - ПДУ напряженности (ППЭ) нормируемого диапазона; n — количество источников ЭМП.

Если нормативы для источников ЭМП разные, то

$$\sum_{j=1}^m (E_{\Sigma j} / E_{\text{ПДУ}j})^2 + \sum_{k=1}^q (\text{ППЭ}_{\Sigma k} / \text{ППЭ}_{\text{ПДУ}k}) \leq 1,$$

где $E_{\Sigma j}$ - суммарная напряженность ЭП, создаваемая источниками ЭМП j -го нормируемого диапазона; $E_{\text{ПДУ}j}$ - ПДУ напряженности

ЭП j -го нормируемого диапазона; $ППЭ_{\Sigma k}$ - суммарная ППЭ, создаваемая источниками ЭМП k -го нормируемого диапазона; $ППЭ_{ПДУk}$ - ПДУ ППЭ k -го нормируемого диапазона; m - количество диапазонов, для которых нормируется E ; q - количество диапазонов, для которых нормируется ППЭ.

Воздействие ЭМП, используемых для лечения пациентов, санитарными правилами не регламентируется, и интенсивность ЭМП определяется соответствующими медицинскими рекомендациями. Вместе с тем, на персонал, отпускающий процедуры, нормативы распространяются как на профессиональную категорию лиц, обслуживающих радиочастотные устройства.

Гигиенические нормативы ЭМП для условий производства являются основой профилактики профессиональной патологии. На протяжении более 40 лет разрабатываются гигиенические нормативы с периодическим уточнением, корректировкой, дифференцированием и изучением надежности этих регламентов. В настоящее время действующие законодательные документы включают нормативы: ВДУ ослабления ГМП; ПДУ ЭСП; ПДУ ПМП; ПДУ ЭП и МП частоты 50 Гц; ПДУ ЭМП в диапазоне частот $\geq (10 \text{ кГц} - 30 \text{ кГц})$.

Степень ослабления ГМП в экранированных помещениях оценивается коэффициентом $K_0^{ГМП}$ ослабления ГМП, который равен

$$K_0^{ГМП} = B_0 / B_g,$$

где B_0 - индукция в открытом пространстве, Тл; B_g - индукция в помещении, Тл.

Допустимое значение коэффициента ослабления ГМП на рабочих местах персонала в течение смены не должно превышать 2 ($K_0^{ГМП} \leq 2$). Допустимые уровни напряженности ЭСП в зависимости от экспозиции, распространяются на ЭСП, создаваемые легко электризующимися материалами и изделиями, а также различными ТС постоянного тока, но без учета электрических разрядов, для предупреждения которых применяется соответствующие защитные меры. Согласно гигиеническим нормативам, ПДУ напряженности ЭСП на рабочем месте не должен превышать 60 кВ/м при часовой экспозиции. При воздействии ЭСП от 1 ч. до 8 ч. допустимая величина напряженности ЭСП составляет:

$$E_{\text{дон}} = \frac{60}{\sqrt{T}}, \text{ кВ/м,}$$

где T - время, ч.

Если напряженности ЭСП составляют (20 – 60) кВ/м, то допустимое время пребывания персонала определяется по формуле:

$$t = \left(E_{\text{пдд}} / E_{\Phi} \right)^2,$$

где E_{Φ} — измеренная фактическая напряженность ЭСП, кВ/м.

При эксплуатации подстанций, ЛЭП и других ТС ультравысокого напряжения на рабочих местах персонала создаются не только ЭСП, но и аэроионы, возникающие вследствие коронирования токоведущих частей. Аэроионы в ЭСП создают ионный ток. Поэтому ионные токи, наряду с ЭСП, также подлежат гигиенической регламентации. Персонал при обслуживании высоковольтных установок постоянного тока СВН подвергается одновременно воздействию этих двух факторов.

Допустимые уровни напряженности ЭСП и плотности ионного тока устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала на рабочих местах. При напряженности ЭСП менее 15 кВ/м и плотности ионного тока, не превышающей 20 нА/м², время пребывания допускается в течение рабочего дня.

ПДУ напряженности ЭСП устанавливается в 60 кВ/м в течение одного часа. При превышении этого значения пребывание в ЭСП без средств защиты не допускается. При напряженности ЭСП от 15 до 20 кВ/м и плотности ионного тока не более 25 нА/м² допустимое время пребывания персонала в ЭСП не должно превышать 5 ч. Если напряженность ЭСП выше, то время пребывания человека в ЭСП рассчитывается:

$$t_{\text{дон}} = \frac{E_{\text{нр}}^2 \cdot t_1}{(E_{\Phi} + \beta j_{\Phi})^2},$$

где $t_{\text{дон}}$ - допустимое время, ч; $E_{\text{нр}}=60$ кВ/м - предельно допустимое значение напряженности ЭСП; $t_1=1$ ч, время в течение которого допустимо $E_{\text{нр}}$; E_{Φ} и j_{Φ} - фактические значения напряженности ЭСП,

кВ/м и плотности ионного тока, нА/м^2 , $\beta = 0.25 \text{ кВ} \cdot \text{м/н} \cdot \text{А}$ - эмпирический коэффициент.

Допустимые уровни напряженности ПМП устанавливаются для условий труда специалистов, работающих с различными магнитными ТС: электромагнитами, соленоидами, импульсными установками различного типа, металлокерамическими и литыми магнитами, электромагнитными ТС разнообразных технологических процессов. Специалисты, работающие с магнитными ТС, подвергаются воздействию ПМП различной интенсивности при общем и локальном облучении. Действие ПДУ распространяется на проектирование, монтаж и эксплуатацию магнитных ТС и магнитных материалов всех отраслей промышленности. ПДУ напряженностей ПМП на рабочем месте не должно превышать 8 кА/м (10 мТл).

Допустимые уровни воздействия ПМП с учетом экспозиции и условий облучения (общее и локальное) представлены табл. 1.9.

Таблица 1.9

ПДУ воздействия ПМП на работающих

Время воздействия, мин	Условия воздействия			
	Общее на все тело		Локальное (ограниченное кистями рук, плечевым поясом)	
	Напряженность МП, кА/м	Магнитная индукция, мТл	Напряженность МП, кА/м	Магнитная индукция, мТл
0–10	24	30	40	50
11–60	16	20	24	30
61–480	8	10	12	15

Ограничение воздействия ЭП частоты 50 Гц как по уровню напряженности, так и по временному параметру, предусмотрено санитарными правилами. Требования и гигиенические нормативы по ЭП частотой 50 Гц распространяются на персонал, профессионально связанный с эксплуатацией открытых распределительных устройств и ЛЭП сверх- и ультравысокого напряжения, а также других электроустановок, при эксплуатации которых создаются ЭП, регламентируемые этими документами. Установлен ПДУ ЭП, равный 25 кВ/м. Работа в условиях воздействия ЭП выше этого уровня без применения средств защиты не допускается. Разрешается работа в течение смены при напряженности ЭП до 5 кВ/м включительно. При напряженности ЭП от 20 кВ/м до 25 кВ/м время пребывания в зонах повышенных уровней поля не

должно превышать 10 мин. Допустимое время пребывания в ЭП напряженностью от 5 до 20 кВ/м включительно определяется по формуле:

$$T = (50 / E) - 2,$$

где T - допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч.; E - напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

Расчет допустимого значения напряженности ЭП в зависимости от времени пребывания в поле производится по формуле:

$$E = 50 / (T + 2),$$

где T - время пребывания в ЭП в интервале от 0,5 до 8 ч.

Для удобства пользования нормами допустимого времени рекомендуется табл. 1.10 с дифференцированными значениями напряженности ЭП.

Если персонал в течение рабочего дня находится в зонах с различным уровнем напряженности ЭП, то время пребывания равно:

$$T_{np} = 8 \left(\frac{t_{E_1}}{T_{E_1}} + \frac{t_{E_2}}{T_{E_2}} + \dots + \frac{t_{E_n}}{T_{E_n}} \right),$$

где T_{np} - приведенное время, эквивалентное биологическому эффекту пребывания в ЭП нижней границы нормируемой напряженности, ч.; $t_{E_1}, t_{E_2} \dots t_{E_n}$ - время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью $E_1, E_2 \dots E_n$, ч.; $T_{E_1}, T_{E_2} \dots T_{E_n}$ - допустимое время пребывания в ЭП для контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

Таблица 1.10

Допустимое время пребывания персонала в ЭП частотой 50 Гц

Напряженность ЭП, кВ/м	Допустимое время пребывания в ЭП в течение сут., ч., мин.	Примечание
До 5 включительно	480 (8ч)	Нормативы действительны при условии исключения воздействия на чело-
6	378 (6ч. 18 мин.)	
7	308 (5ч. 15 мин.)	

Напряженность ЭП кВ/м	Допустимое время пребывания в ЭП в течение сут., ч., мин.	Примечание
8	255 (4ч. 15 мин.)	века электрических раз- рядов и тока стекапия. Пребыва- ние сверх указанного времени без средств за- щиты не допускается, но возможно нахождение в зонах напряженностью поля не более 5 кВ/м
9	213 (3ч. 33 мин.)	
10	180 (3ч.)	
11	152 (2ч. 32 мин.)	
12	130 (2ч. 10 мин.)	
13	110 (1ч. 50 мин.)	
14	94 (1ч. 34 мин.)	
15	80 (1ч. 20 мин.)	
16	68 (1ч. 8 мин.)	
17	56	
18	46	
19	38	
20	36	
Свыше 20 до 25 (вк.	10	
Свыше 25	Не допускается	

Таблица 1.11

Допустимые уровни магнитного поля частотой 50 Гц

Время воздействия, ч.	Уровни воздействия МП, Н (А/м)/В (мкТл).	
	Общее	Локальное
≤ 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Для ограничения влияния на персонал МП частотой 50 Гц разработаны ориентировочные безопасные уровни воздействия при производстве работ под напряжением на ЛЭП 220–1150 кВ. Согласно этому документу уровень для условий общего воздействия МП устанавливается в 3,2 кА/м, а для условий локального воздействия – 5,2 кА/м. Допустимые уровни распространяются на все виды работ на неотключенных линиях под напряжением с непосредственным касанием токоведущих частей. На условия работы с энергетическими установками промышленного, научного, сельскохозяйственного, медицинского и

других назначений распространяются следующие нормативы по ограничению воздействия МП частотой 50 Гц (табл. 1.11).

Если же работа сменная, то ПДУ МП не должен превышать установленное значение в 100 мкТл для полного рабочего дня, равного 8 ч.

Таблица 1.12

Допустимые величины напряженности переменного МП частотой 50 Гц (амплитудное значение)

Время пребывания, ч.	Напряженность МП, А/м		
	Прерывистые МП $\tau_u \geq 0.02c; t_n \leq 2c$	Прерывистые МП $60c \geq \tau_u \geq 1c; t_n > 2c$	Прерывистые МП $0.02c \leq \tau_u < 1c; t_n > 2c$
До 1,0 (вкл.)	6,000	8000	10,000
1,5	5,500	7,500	9,500
2,0	4,900	6,900	8,900
2,5	4,500	6,500	8,500
3,0	4,000	6,000	8,000
3,5	3,600	5,600	7,600
4,0	3,200	5,200	7,200
4,5	2900	4900	6900
5,0	2,500	4,500	6500
5,5	2300	4300	6,300
6,0	2000	4000	6000
6,5	1,800	3800	5,800
7,0	1600	3600	5600
7,5	1500	3500	5500
8,0	1400	3400	5400

Другим документом регламентируются МП частотой 50 Гц с учетом прерывистого (импульсного) воздействия с определенной длительностью импульса и пауз между импульсами для условий производства, где изготавливается и эксплуатируется соответствующее ТС. Допустимые уровни напряженности МП в зависимости от времени воздействия приведены в табл. 1.12. Здесь τ_u - длительность импульса, t_n - длительность паузы.

Для предупреждения неблагоприятного действия ЭМП на состояние здоровья специалистов, работающих с установками промышленного, научного и медицинского назначения, использующих электромагнитную энергию в диапазоне частот 10-30 кГц, установлены сле-

дующие гигиенические нормативы: напряженности ЭП и МП на рабочих местах персонала на должны превышать 500 В/м и 50 А/м при воздействии в течение полного рабочего дня; 1000 В/м и 100 А/м при 2-х ч. экспозиции за рабочий день. В диапазоне радиочастот от 30 кГц до 300 ГГц ЭМП регламентируются энергетической экспозицией по напряженности ЭП — ЭЭ_Е, энергетической экспозицией по МП — ЭЭ_Н и энергетической экспозицией по ППЭ — ЭЭ_{ППЭ}. Предельно допустимые значения ЭЭ указаны в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Предельно допустимые значения ЭЭ

Диапазон частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	ЭЭ _Е , (В/м) ² ·ч.	ЭЭ _Н , (А/м) ² ·ч.	ЭЭ _{ППЭ} , (мкВт / см ²)·ч.
30 кГц – 3 МГц	20000	200	–
3 – 30 МГц	7000	Не разработана	–
30 – 50 МГц	800	0.72	–
50 – 300 МГц	800	Не разработана	–
300 МГц – 300 ГГц	–	–	200

Расчетные допустимые уровни воздействия ЭМП по электрической и магнитной составляющим и по ППЭ в зависимости от времени даны в табл. 1.14 и табл. 1.15.

При продолжительности воздействия меньше 0,08 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

При продолжительности воздействия меньше 0,20 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

На рабочих местах, попадающих в зону воздействия ЭМИ от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20, допустимая интенсивность воздействия определяется по формуле:

$$ППЭ_{ПДУ} = K \frac{ЭЭ_{ППЭ_{ПДУ}}}{T},$$

где $K=10$ - коэффициент ослабления биологической активности преувеличенных воздействий.

Таблица 1.14

Предельно допустимые уровни напряженностей ЭП и МП в диапазоне частот 30 кГц-300 МГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность *) воздействия, Т, ч.	$E_{ПДУ}$, В/м			$H_{ПДУ}$, А/м	
	0,03 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	0,03 – 3 МГц	30 – 50 МГц
8,0 и более	50	30	10	5,0	0,30
7,5	52	31	10	5,0	0,31
7,0	53	32	11	5,3	0,32
6,5	55	33	11	5,5	0,33
6,0	58	34	12	5,8	0,34
5,5	60	36	12	6,0	0,36
5,0	63	37	13	6,3	0,38
4,5	67	39	13	6,7	0,40
4,0	71	42	14	7,1	0,42
3,5	76	45	15	7,6	0,45
3,0	82	48	16	8,2	0,49
2,5	89	52	18	8,9	0,54
2,0	100	59	20	10,0	0,60
1,5	115	68	23	11,5	0,69
1,0	141	84	28	14,2	0,85
0,5	200	118	40	20,0	1,20
0,25	283	168	57	28,3	1,70
0,125	400	236	80	40,0	2,40
0,08 и менее	500	296	80	50,0	3,00

Интенсивность воздействия независимо от продолжительности не должна превышать ПДУ – 1000 мкВт/см². Интенсивности ЭМП РЧ на рабочих местах лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности, должны соответствовать гигиеническим нормативам для населения. В случаях, когда рабочие места находятся в зонах одновременно облучаемых от нескольких источников ЭМИ РЧ, для которых установлены единые ПДУ, определяется суммарное значение величин напряженности ЭМП, умноженное на время воздействия. Это произведение не должно быть более допустимой ЭЭ или соответствующей допустимой величины напряженности ЭП или ППЭ. При облучении от нескольких источников ЭМП РЧ, для которых установлены разные нормативы, должны соблюдаться следующие условия:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{ЭЭ}_i}{\text{ЭЭ}_{\text{ПДУ}}} \right) < 1; \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{E_{\text{ПДУ}_i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i}{H_{\text{ПДУ}_i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{ППЭ}_i}{\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}_i}} \right) < 1,$$

где ЭЭ_i — энергетическая экспозиция i -го нормируемого диапазона;
 $\text{ЭЭ}_{\text{ПДУ}}$ — ПДУ энергетической экспозиции i -го нормируемого диапазона;
 $E_{\text{ПДУ}_i}$ - ПДУ напряженности ЭП i -го нормируемого диапазона;
 $H_{\text{ПДУ}_i}$ - ПДУ напряженности МП i -го нормируемого диапазона
 $\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}_i}$ - ПДУ ППЭ нормируемого диапазона; n - число нормируемых диапазонов.

Таблица 1.15

Предельно допустимые уровни ППЭ в диапазоне частот
 300 МГц – 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия, T , ч.	$\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}}$, мкВт/см ²
8,0 и более	25
7,5	27
7,0	29
6,5	31
6,0	33
5,5	36
5,0	40
4,5	44
4,0	50
3,5	57
3,0	67
2,5	80
2,0	100
1,5	133
1,0	200
0,5	400
0,25	800
0,20 и менее	1000

В связи с массовым использованием видео-дисплейных терминалов, персональных ЭВМ, не только в условиях различных отраслей производства, но и в учебном процессе, а также в бытовых условиях, для ограничения неблагоприятного воздействия комплекса факторов, в том числе и ЭМП, введены в действие санитарные нормы и правила

организации работы с этими устройствами. Для ЭМП определены следующие допустимые уровни воздействия для всех категорий населения – пользователей ВДТ. Ограничения по уровню напряженности ЭП на расстоянии 50 см в радиусе монитора составляют: в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 25 В/м; в диапазоне частот 2 –400 кГц - 2,5 В/м.

Магнитная составляющая поля регламентируется по индукциям МП: для диапазона частот 5 Гц – 2 кГц — 250 нТл; для диапазона частот 2 –400 кГц - 25 нТл.

Ограничивается и величина поверхностного электростатического потенциала до 500 В.

В настоящее время в РФ одновременно действует более десятка законодательных документов, установленных Госсанэпиднадзором и Государственным комитетом стандартизации, которые регламентируют параметры ЭМП и экспозицию в широком диапазоне – от ЭСП и ПМП до переменных ЭМП частотой 300 ГГц, как для профессиональных категорий, так и для населения. Сравнительный анализ гигиенических нормативов действующих документов показывает некоторую несогласованность ПДУ в определенных частотных диапазонах. Так, в диапазоне (0,3–300) кГц, при использовании населением бытовых электроприборов, ПДУ по ЭП составляет 25 В/м. Аналогичный норматив для населения, но в диапазоне (30–300) кГц дан в СанПин 2.1.8/2.2.4.1383–03. В диапазоне 5 Гц – 2 кГц нормативы для дисплеев, широко используемых населением, составляют также 25 В/м, а в диапазоне (2–400) кГц - 2,5 В/м. Вместе с тем, для ЭП от электротоваров народного потребления (50 Гц) ЭМП регламентируются величиной в 500 В/м, т.е. в 20 раз выше. Подобное расхождение нормативных материалов создает условие для их разночтения и усложняет контроль электромагнитной безопасности. К сожалению, корректировка гигиенических регламентов осуществляется редко.

Приведенная отечественная нормативная документация обеспечивает защиту населения и профессионалов от воздействия ЭМП техногенного происхождения в большинстве диапазонов частот.

Однако еще не разработана нормативная документация в ряде биологически важных частотных диапазонах. Не дифференцировано нормирование ППЭ на участках спектра (УКВ, СВЧ и КВЧ) в диапазоне 300 МГц – 300 ГГц. Требуется корректировка ряда существующих нормативных документов. Нет нормативов для МП в диапазоне 3–30 МГц, 50–300 МГц.

Допустимые уровни ЭП, МП и ЭМП, содержащиеся в международных стандартах не всегда согласуются с уровнями Российских стандартов. Здесь они не приводятся. Желаящих с ними познакомиться отсылаем к [1.2, 1.3].

ГЛАВА 2. ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1. ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

Видимое излучение - единственный диапазон электромагнитных волн, воспринимаемым человеческим глазом. Световые волны занимают достаточно узкий диапазон: 380-780 нм ($f = 3,85 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14}$ Гц). Источником видимого излучения являются валентные электроны в атомах и молекулах, изменяющие свое положение в пространстве, а также свободные заряды, движущиеся ускоренно. Эта часть спектра дает человеку максимальную информацию об окружающем мире. По своим физическим свойствам она аналогична другим диапазонам спектра, являясь лишь малой частью спектра ЭМВ. Излучение, имеющее разную длину волны (частоты) в диапазоне видимого излучения, оказывает различное физиологическое воздействие на сетчатку человеческого глаза, вызывая психологическое ощущение света. Цвет - не свойство электромагнитной световой волны самой по себе, а проявление электрохимического действия физиологической системы человека: глаз, нервов, мозга. Приблизительно можно назвать семь основных цветов, различаемых человеческим глазом в видимом диапазоне (в порядке возрастания частоты излучения): красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Видимое излучение может влиять на протекание химических реакций в растениях (фотосинтез) и в организмах животных и человека.

2.1.1. ИСТОЧНИКИ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Известно, что видимое излучение создается естественными и искусственными источниками света, различающимися спектральной характеристикой.

При изложении материалов о гигиеническом значении видимого излучения, которое в естественных условиях меняется в широких пределах, речь в конечном итоге идет об изменениях функций зрительного анализатора, ибо изменения, происходящие в анализаторе, с известной полнотой отражают влияние адекватного раздражителя.

Зрительный анализатор (ЗА) - один из основных органов чувств. Он не только выполняет роль периферического рецепторного аппарата, но и способствует объединению всех органов чувств в единую функциональную систему анализаторов. Кроме того, ЗА принадлежит важ-

нейшая роль в регуляции биологических ритмов, следовательно и основных процессов жизнедеятельности организма.

Естественные источники видимого излучения. Естественным источником видимого излучения является Солнце, температура поверхности которого равна примерно 6000 °С. Интегральное излучение Солнца, приходящее к верхней границе атмосферы, характеризуется солнечной постоянной, т.е. тем количеством лучистой энергии, которое проходит за минуту через площадку 1 см² перпендикулярно к солнечным лучам. Различают тепловую солнечную постоянную, равную 1,895 кал/см²•мин (около 1317 Вт/м²), и световую солнечную постоянную, равную 137 000 лк. На поверхности Земли указанные постоянные несколько меньше и определяются как астрономическими факторами (вращение Земли вокруг оси и отклонение Солнца), так и оптическими свойствами атмосферы, через которую проходит солнечное излучение.

Для характеристики естественного светового климата местности имеют значение длительность астрономического дня, продолжительность периода сияния Солнца, высота его стояния. От высоты стояния Солнца зависит и его спектральная характеристика, которая в свою очередь предопределяет биологическое действие интегрального солнечного излучения. В зависимости от высоты стояния Солнца меняется уровень освещенности как при безоблачной - в тени и на солнце, так и при пасмурной погоде [2.1].

При идеальных условиях прозрачности атмосферы освещенность колеблется в довольно широких пределах. В реальных же условиях, когда изменяется прозрачность атмосферы и содержание водяных паров, радиационные потоки могут и ослабляться, и возрасти. Кроме того, в реальных условиях небо не бывает постоянно безоблачным, поэтому меняется как суточный, так и сезонный ход потока солнечной радиации. На территории нашей страны от севера до юга величина суммарной радиации, поступающей на Землю в сутки, значительно различается. Следовательно, реальные значения прихода естественной радиации определяют широта местности, облачность и мутность атмосферы.

Процесс проектирования естественного освещения производственных помещений осложняется рядом обстоятельств, присущих естественному источнику света. К ним относится, прежде всего, непостоянство естественного света, который может резко изменяться даже в течение нескольких минут. Весьма большое влияние на естественное освещение производственных помещений оказывают эксплуатацион-

ные условия, связанные с загрязнением остекления и инсоляцией помещения.

Существует три системы естественного освещения: боковое (через окна), верхнее (через фонари) и комбинированное (через окна и фонари). Применение той или иной системы освещения зависит от назначения и размеров помещения, расположения его в плане здания, а также от климатических особенностей местности.

При инсоляции, характеризующейся резкими колебаниями уровня освещенности в пределах 700 - 16 000 лк (т.е. в 10-20 раз), зрительная работоспособность может значительно снижаться, эти данные подтверждают требование о необходимости предусматривать в производственных цехах свето-регулирующие устройства, способствующие созданию в них равномерной естественной освещенности при сохранении высокого ее уровня.

Искусственные источники видимого излучения. Для искусственного освещения помещений используются газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Газоразрядные лампы. В осветительных установках используются газоразрядные лампы низкого давления (люминесцентные) и высокого давления. Действующими нормами искусственного освещения эти источники света приняты в качестве основных для производственного освещения. Причиной этого являются такие их достоинства, как значительная световая отдача (что позволяет создать высокие уровни освещенности), экономичность, благоприятный спектральный состав света, диффузность светового потока и сравнительно невысокая яркость (3500-10000 кд/м²).

Лампы накаливания. Более эффективными являются галогенные лампы накаливания. Спектр галогенных ламп накаливания близок к естественному свету, поэтому их используют для освещения общественных зданий (библиотек, столовых и др.).

Для освещения на производстве лампы накаливания применяют: для аварийного и эвакуационного освещения; в помещениях, для питания освещения которых допускается напряжение не более 42 В; в помещениях с кратковременным пребыванием людей; в помещениях со взрывоопасными зонами и тяжелыми условиями среды; для местного освещения; в случаях, если применение газоразрядных ламп невозможно по технологическим причинам (высокая температура воздуха, вибрация).

Светильники. Создание в помещениях высококачественного и экономичного освещения обеспечивается применением рациональных

светильников. Назначение светильника состоит также в защите глаз от слепящего действия источника света. С этой целью могут быть использованы конструкции светильников, обеспечивающие защитный угол и ослабление яркости источников света с помощью рассеивателей из молочного, опалового или матированного стекла.

Защитным углом называют плоский угол, образуемый пограничным световым лучом светильника (лучом, проходящим через край отражателя) и горизонталью, проходящей через светящее тело накала (для светильников с лампами накаливания) или через нижнюю поверхность трубки (для светильников с люминесцентными лампами). Защитные свойства светильника тем лучше, чем больше его защитный угол. Наконец, осветительная арматура служит также для предохранения источника света от загрязнения и механического повреждения.

С точки зрения перераспределения светового потока различают светильники прямого, отраженного и рассеянного света. Светильники прямого света направляют в нижнюю полусферу не менее 90 % всего светового потока. При этом большая часть светового потока концентрируется на рабочих поверхностях. Такие светильники рекомендуется применять в производственных цехах высотой 4-10 м при невысоких коэффициентах отражения стен (механические, механосборочные, прокатные, литейные). Светильники отраженного света основную часть светового потока (не менее 90 %) направляют вверх. Оно рекомендуется для чертежно-конструкторских и машинописных бюро и других помещений, когда необходимо особо равномерное распределение яркости по помещению, а также для работ с блестящими поверхностями (металл, стекло, пластмасса). Светильники рассеянного света распределяют световой поток более или менее равномерно в обе полусферы. Их применяют в помещениях со светлым потолком и стенами - там, где требуются большая равномерность освещения и необходимость смягчить резкость теней и бликов на поверхностях с направленным и направленно-рассеянным отражением.

2.1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСВЕЩЕНИЯ

Для оптимизации эффективной деятельности человека в домашних или производственных условиях имеет большое значение уровень освещения.

Задачи организации освещённости рабочих мест следующие: обеспечение различаемости рассматриваемых предметов, уменьшение

напряжения и утомляемости органов зрения. Освещение должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Различают естественное, искусственное и совмещенное освещение.

Обследование условий освещения заключается в замерах, визуальной оценке или определении расчетным путем следующих показателей: коэффициента естественной освещенности; освещенности рабочей поверхности; показателя ослепленности; отраженной блескости; коэффициента пульсации освещенности; освещения на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ; освещенности на поверхности экрана; яркости белого поля; неравномерности яркости рабочего поля; контрастности для монохромного режима; пространственной нестабильности изображения.

Надо сказать, что в справочной, методической и др. литературе, кроме отмеченных показателей, могут использоваться другие трактовки. Так, под контрастом понимают различия восприятия двух составных частей поля зрения, например объекта и фона. Это субъективная оценка контраста, а для его объективной оценки используется специальная формула. Характеристики яркостного контраста и (или) цвета между объектом и фоном во многом определяют зрительное восприятие объекта в окружающем пространстве и зависят от ряда факторов.

Яркость также имеет другое определение: физическая величина, создающая ощущение светлоты, выраженная силой света в заданном направлении (обычно к наблюдателю), с единицы площади поверхности, которая сама светится за счет отражения или за счет пропускания света (ГОСТ ИСО 8995-2002). А освещенность определяют и как отношение светового потока, падающего на элемент поверхности, содержащий данную точку, к площади этого элемента.

Для характеристик естественного освещения часто используется термин "второй свет".

Наряду с термином "расчетная поверхность" выделяют расчетную рабочую поверхность - условная горизонтальная поверхность, на которой рассчитывают среднюю освещенность при проектировании освещения (обычно выбирают ее на расстоянии 0,85 м от уровня пола).

Основная характеристика условий световой среды - освещенность (отношение падающего на поверхность светового потока (измеряется специальной единицей - люмен) к величине площади этой по-

верхности. Уровень освещенности измеряют и оценивают специальной единицей люкс (лк). Например, максимальный уровень освещенности, установленный СНБ 2.04.05-98, для самых напряженных, точных или прецизионных зрительных работ составляет 5000 лк. При наиболее высоком стоянии солнца уровни освещенности, создаваемые на поверхности земли, достигают 120000-130000 лк при мощности светового потока на каждый квадратный метр земной поверхности около 700 Вт. При стоянии солнца над горизонтом освещенность на поверхности земли составляет около 1000 лк, тогда как, например, лунный свет дает освещенность менее 1 лк.

На рабочих местах наиболее распространенных профессий, не требующих высокого напряжения со стороны органа зрения, нормируемые уровни освещенности составляют 150-250 лк. Напомним, что для зрительного восприятия основное значение придается не падающему световому потоку от источника света, а уровню яркости освещаемых объектов, которая отражается от освещаемой поверхности в направлении глаза. Иными словами, зрительное восприятие определяется не освещенностью, а яркостью как характеристикой светящихся тел, объектов, поверхностей. Яркость - основная световая величина, на которую реагирует зрительный анализатор, орган зрения. Определяется она плотностью силы света в направлении глаза. Основная единица измерения яркости - кандела на 1 кв. м (кд/м^2); в литературе можно встретить и такие (в основном ранее используемые) единицы измерения яркости, как стильб (сокращенно сб) и нит (нт). Для характеристики восприятия яркости одного цвета по отношению к другому или яркости окружения используют термин светлота, который по существу является субъективным аналогом яркости. Яркость освещенных поверхностей, в свою очередь, зависит от их световых свойств, степени освещенности и угла, под которым поверхность рассматривается.

Качество производственного освещения определяет ряд условий, в том числе равномерное распределение яркостей в поле зрения и ограничение теней, ограничение прямой и отраженной блескости, уменьшение или устранение колебаний светового потока ("вибрации света"), степень неравномерности освещенности и др. Рассмотрим некоторые из них.

Учитывая, что сегодня при контроле за состоянием освещения не всегда уделяется должное внимание такому существенно влияющему на качество освещенности на рабочем месте показателю качества света, как блескость, приведем некоторые пояснения.

Чрезмерно слепящую яркость (блескость) рассматривают, как свойство различных ярко светящихся поверхностей вызывать нарушения зрительных функций, условия комфортного зрения или ухудшать контрастную чувствительность. Условно различают две формы блескости. Так, слепящая блескость нарушает и искажает видность деталей или объектов, но не обязательно вызывает выраженные зрительные неудобства, тогда как дискомфортная блескость, напротив, проявляется, в первую очередь, неудобством, ощущаемым работником дискомфортом, а качество видимости рассматриваемых объектов чаще всего и не нарушается. Изменение нормального состояния зрительных функций, возникающее при наличии в поле зрения блескости, ярких светящихся поверхностей, называется ослепленностью или слепимостью, что приводит к нарушению видности, утомлению органа зрения, снижению работоспособности и т.п. Отметим, что показатель ослепленности подлежит контролю при обследовании и входит в число нормируемых показателей, установленных СНБ 2.04.05-98.

Приведем и мнение специалистов, которые считают, что больше проблем часто создает не слепящая, а дискомфортная блескость, при этом меры, принятые для устранения дискомфортной блескости (создаваемые светильниками, окнами), чаще всего достаточны и для сглаживания, устранения слепящей блескости [2.8].

2.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ВИДИМОГО СВЕТА НА ЧЕЛОВЕКА

Ежедневно человек подвергается действию солнечного света и света от искусственных источников с самой различной спектральной характеристикой и чрезвычайно обширным диапазоном интенсивности: от 100000 лк и более днем при прямом солнечном свете и до 0,2 лк ночью при свете луны. Видимому свету принадлежит важная регуляторная роль. Известно, что в пасмурные дни у многих людей возникает синдром «осенней грусти», сопровождающийся психической депрессией. Экспериментально доказано, что подобную депрессию можно снять, если человека помещать на несколько часов в течение ряда дней подряд в ярко освещенную комнату.

С обнаружением в 2002 году нового фоторецептора появилась возможность более глубоко осмысления биологического эффекта, которое оказывает свет на организм человека. Спектральная чувствительность нового типа рецепторов, до конца еще не изученная, по-

казывает что излучение синей области спектра оказывает больший эффект чем излучение с большей длинной волны.

В последнее время основные факторы, сопутствующие выполнению зрительных задач, такие как освещенность, яркость, слепимость, цветопередача и др. интенсивно исследовались и обсуждались в печати. Соответствующие результаты этих исследований и легли в основу существующих норм освещения. В то же время знаний о воздействии света на физиологию накоплено значительно меньше. Тем не менее, результаты последних исследований показали, как свет может влиять на самочувствие людей.

Об актуальности исследования влияния света на функционирование различных систем организма свидетельствует огромное количество публикаций по этой проблеме [2.1, 2.2]. Полученные в ходе этих исследований результаты представляют интерес для многих отраслей науки, в том числе и светотехники. Стремительный рост числа публикаций свидетельствует о том, что это направление исследований находится в стадии бурного развития. За несколько десятилетий экспериментальных исследований было выявлено несоответствие нормируемых характеристик световой среды при искусственном освещении реальным биологическим потребностям человеческого организма. Также показана необходимость увеличения искусственно создаваемой освещенности приблизительно в 7-10 раз по сравнению с уровнями освещенности, используемыми в настоящее время.

Влияние освещения на зрение и его практические следствия были предметом исследования многих сотен лет. Более 150 лет исследователи полагали, что в глазу имеются фоторецепторы только двух видов: палочки и колбочки. В 2002 г. Дэвид Берсон обнаружил в сетчатке млекопитающих новый тип фоторецепторов, который отвечает за биологическое воздействие света [2.2]. Чувствительность нового фоторецептора неодинакова к свету различных длин волн. Авторами [2.3] показано, что оптическое излучение в диапазоне $\Delta\lambda = 430-470$ нм оказывает прямое воздействие на образование в организме человека гормона усталости - «мелатонина».

Организм человека сформировался под воздействием 24-часового биоритма («циркадного ритма») с активной дневной фазой и фазой отдыха ночью. Свет синхронизирует повторяемость этого биоритма. Световые сигналы регулируют внутренние часы независимо от известных фоторецепторов (палочек и колбочек), благодаря которым видит человек. Г. Ван Бельд утверждает, действие видимого света зависит от уровня освещенности, спектральной чувствительности,

продолжительности и времени суток [2.4]. Уровень освещенности порядка 1000-2000 лк на глаз в течение 3 ч. может привести к фазовому сдвигу от 2 до 4 ч. в зависимости от времени суток. Фазовый сдвиг биологических часов является функцией спектральной характеристики излучения.

Создание математической модели явлений синхронизации организма человека световыми воздействиями, позволило ученым ВНИСИ сделать выводы о том, что имеют значение лишь энергетические характеристики световых воздействий, время их начала и продолжительность [2.5]. В качестве нормируемой световой величины, обеспечивающей синхронизацию гипоталамических структур и организма в целом, целесообразно использовать экспозицию на зрачке глаза.

Если говорить об уровнях освещенности, то речь идет о количестве света попадающего в глаз наблюдателя. Освещенность следует измерять на глазах, а не как освещенность нормируемую на горизонтальных поверхностях в помещениях, нормируемую в настоящее время [2.6]. Высокие уровни освещенности на поверхностях внутри помещений или на предметах, которые редко попадают в поле зрения, не оказывают значительного биологического воздействия.

При анализе множества противоречивых данных, полученных в ходе различных исследований воздействия видимого света на человеческий организм, возникают вопросы, требующие время для получения ясных и определенных ответов для дальнейшей разработки практических рекомендаций. Действительно, свет дает информацию для работы зрительного аппарата, а осветительные установки создаются для обеспечения видимости. Но, сегодня стало известно, что одновременно возникают другие биологические процессы, которые требуют нового подхода к созданию освещения при одновременном решении прежних задач.

Медицинский аспект воздействия видимого излучения на организм человека. В настоящее время изучению ответных реакций организма человека на световые воздействия уделяется большое внимание. Имеется большое количество исследований по использованию интенсивного белого света в лечении нарушений циркадных ритмов и депрессивных состояний [2.9]. Тем не менее, в публикациях мало данных о влиянии видимого света на психофизиологическое состояние человека.

Давно известно лечебное действие света (светотерапия) при недостатке витамина Д в организме, кожных заболеваниях, а также

при так называемых «сезонно-зависимых депрессиях». Известно также общее оздоравливающее влияние света на человека [2.7].

Терапия ярким белым светом занимает ведущее место среди применяемых немедикаментозных методов лечения депрессии и различных психических расстройств [2.8]. Существует целый ряд исследований в области медицины, фотобиологии, биохимии и хронобиологии, которые подтверждают тот факт, что видимый свет является эффективным регулятором биологических ритмов, а в некоторых случаях и терапевтическим фактором [2.1, 2.9-2.12].

Имеются данные о том, что свет может оказывать и негативное влияние на человека [2.5]. Так, действие излучения высокой интенсивности с длиной волны 380-500 нм вызывает в зрительном органе фотохимические процессы. Спектр действия эффекта так называемой «опасности голубого света» расположен довольно близко к функции циркадной эффективности. Этот факт указывает на необходимость учета мощности излучения и спектра ламп при оценке условий освещения. Так как «опасность голубого света» в настоящее время поддается расчетной оценке и зависит от уровня облученности в условиях общего освещения, ее легко учесть. Солнечный свет также опасен и в больших дозах наносит непоправимый вред.

Механизм незрительных реакций и процесс выработки мелатонина под действием света. Строение участка мозга, имеющего отношение к рассматриваемым процессам представлено на рис. 2.1 [2.4].

При попадании света в клетки-рецепторы начинается сложная химическая реакция (с участием фотопигмента меланопсина) с продуцированием электрических импульсов. Эти клетки имеют нервные связи с двумя образованиями в мозгу: супрахиазматическими клетками (SCN), являющимися биологическими часами мозга, и с шишковидной железой (эпифизом). Шишковидная железа регулирует секрецию определенных гормонов в организме. В сетчатке глаза световые волны определенной длины волны превращаются в энергию нервного импульса. Эта энергия передается по зрительному нерву в верхнюю часть спинного и в затылочную долю головного мозга, где она не только запечатлевает увиденный образ, но и влияет также на основные центры управления организмом, расположенные в головном мозге. Считается, что эта энергия заставляет шишковидное тело вырабатывать мелатонин.

Хотя действие мелатонина в организме не вполне ясно, опыты на животных дают основания полагать, что он усиливает функции таких

стимулирующих деятельность организма эндокринных желез, как гипофиз, надпочечники, половые железы и поджелудочная железа. Максимальное количество мелатонина вырабатывается ночью, пик активности приходится примерно на 2 ч. ночи, а уже к 9 ч. утра его содержание в крови падает до минимальных значений.

Солнечный свет является самым сильным фактором, подавляющим деятельность железы эпифиза по выработке мелатонина (в самом названии лежит греческое слово «тьма»). Действительно, этот гормон, который исполняет ритмозадающую, антиоксидантную (противовоспалительную) и иммуномодуляторную функции, может вырабатываться только в темноте. Самые оптимальные для его производства условия - это длительный сон ночью в зимнее время. Именно в этих условиях мелатонин, который призван обеспечить организму правильный переход к темному времени, максимально вырабатывается в ядрах гипоталамуса и затем начинает исполнять свою главную роль - обеспечивает перестройку биоритмов и включает иммунную систему [2.7].

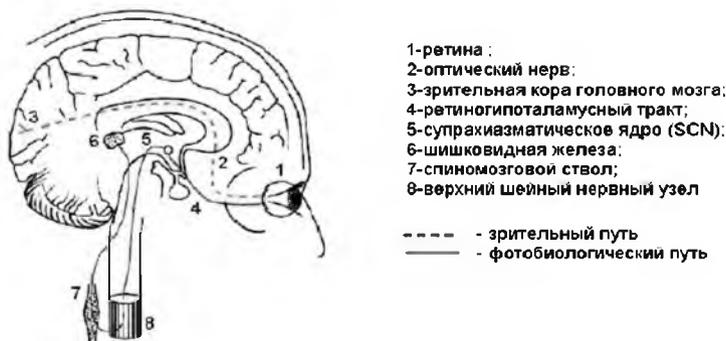


Рис. 2.1. Структуры мозга, обеспечивающие влияние света на функционирование различных систем организма [2.4]

Таким образом, мелатонин представляет собой гормон, обладающий уникальными адаптивными возможностями. Нарушение его продукции, как количественно, так и ритма, является пусковым механизмом, приводящим на начальных этапах к возникновению десинхроза, за которым следует возникновение органической патологии.

Открытие электрического освещения повлияло на внутренние биоритмы человека, сложившиеся под влиянием природных факторов. Последние исследования направлены, на то, как с помощью искусственного освещения улучшить самочувствие и мотивацию работающих,

в том числе в условиях сменной работы. Для обеспечения высокого качества освещения важным критерием является возраст работников, с повышением которого растут и требования к освещению, поскольку зрительная работоспособность зависит и от собственных «зрительных возможностей» [2.13, 2.14].

Промышленное освещение используется для обширного числа зрительных работ и интерьера. В промышленности бодрость имеет первостепенное значение, так как является не только фактором настроения, но и работоспособности и предотвращения несчастных случаев. Существует ряд исследований [2.15-2.17], которые показывают, что использование более высоких уровней освещенности для того, чтобы справиться с усталостью, дают возможность оставаться бодрыми дольше. Это доказывает, что яркий свет оказывает воздействие на бодрствование через центральную нервную систему.

В металлургической промышленности уровень освещенности должен быть увеличен от 300 до 2000 лк [2.13]. При таких уровнях освещенности возникают биологические эффекты без оптического изображения (БОИ-эффекты). При этом наблюдается повышение зрительной работоспособности на 16%, снижение брака на 29%, а количество несчастных случаев уменьшается на 52% - все это приводит к росту производительности труда более чем на 20%.

Недавнее открытие БОИ-эффектов окулярного света позволило разработать новые концепции и опции освещения для работы днем, вечером и ночью [2.18]. Концептуальный алгоритм построен на использовании повышенных уровней освещенности в определенный момент времени, а также изменении цветовой температуры источников света.

Требованиями существующих стандартов или рекомендаций определены уровни освещенности помещения офиса при отсутствии естественного света в пределах 100-500 лк. Новые исследования показали, что люди предпочитают высокие уровни дополнительного искусственного освещения в помещении офиса в среднем около 800 лк при преобладающем дневном освещении.

По мнению специалистов [2.17], все еще нет общей модели, которая могла бы указать, каким образом имеющееся изобилие явлений, механизмов и понятий можно собрать и систематизировать в практическом руководстве для проектировщика светотехника. Наряду с этими существуют публикации, в которых авторы подтверждают необходимость пересмотра существующих норм и правил проектирования осветительных установок разного назначения [2.13].

Состояние нормирования и возможные пути развития с учетом новых воззрений. В основе существующих стандартов, как отечественных, так и международных лежит требование комфортного выполнения зрительной задачи для достижения хорошего зрительного восприятия. Нормы освещения периодически пересматриваются с учетом экономических, энергетических и технических возможностей общества в сторону оптимизации условий освещения. Область исследований воздействия света на циркадную систему очень важна для понимания того, как создавать оптимальное внутреннее освещение. В мире уже предприняты первые шаги разрешения актуальных задач в области освещения. Так в Австралии с 2005 года запрещено использование люминесцентных ламп с индексом цветопередачи $R_a < 80$. Это решение открыло дорогу лампам с энергетическим индексом «Группа А», не только более экономичным, но и имеющим более высокую стабильность цветности в процессе срока службы [2.7]. В новых Европейских нормах DIN EN № 12464-1 [2.16] рассмотрены условия, соответствующие различным зрительным задачам; а также учитывается эффект циркадного воздействия и, одновременно, хозяйственные экономические аспекты.

Необходимо дальнейшее развитие концепции качества освещения. При разработке рекомендаций необходимо расширить набор критериев, предъявляемых к осветительным установкам, как это сделано в руководстве IESNA по нормированию, где содержится указание для проектировщиков, рассматривающее относительную важность данной зоны в данном окружении и таких критериев, как яркость поверхностей в данном помещении, геометрия расположения глаза по отношению к источнику света, наличие блеска, цветопередача, наличие цвета, блескость [2.17]. Показана необходимость разработки простого способа количественной оценки света, попадающего в глаз наблюдателя, а также программного обеспечения для расчета этой величины, с дальнейшим формированием нового критерия при создании норм освещения.

Чувствительность третьего типа фоторецепторов сетчатки к коротковолновым спектрам излучения ассоциируется с особенностями спектра естественного света в дневные и в вечерние часы, с обусловленной ими врожденной динамикой активности человека в разные периоды светового дня. В нормах России регламентируется требование достаточного естественного освещения в помещениях с длительным пребыванием людей, особенно для детей и для больных. По мнению российских ученых, перед исследователями стоит задача

оценки чувствительности новых рецепторов к тем излучениям, которые присутствуют в спектре естественного света, но отсутствуют в спектрах излучения наиболее распространенных искусственных источников света. В этой связи может возникнуть необходимость повышения требований к максимальному использованию естественного освещения при совершенствовании норм и развития сопутствующих им строительных и архитектурных решений.

Результаты исследований [2.13] привели к выводу о большей чувствительности или большей плотности нового типа фоторецепторов в нижней части сетчатки, поскольку, свет, падающий на глаз сверху и достигающий нижней части сетчатки воздействует сильнее, чем свет, падающий снизу. Максимальная чувствительность или большая концентрация рецепторов в нижней части сетчатки объясняет особую биологическую ценность света, поступающего сверху, как это имеет место при пребывании под открытым небом. Поэтому для искусственного освещения важны условия, создаваемые светильниками общего освещения. При совершенствовании норм с учетом новых открытий, возможно повышение биологического воздействия света путем повышения интенсивности светового потока от светильников общего освещения и использования в них ламп с достаточным излучением в коротковолновой области спектра видимого света [2.7].

Результатом исследований должна стать разработка новой системы световых измерений, основанная на открытии меланопсипо-содержащих светочувствительных клеток вместе с новыми спектрами действия для восприятия света циркадной системой. В конечном счете, должна быть разработана новая система световых измерений, учитывающая, что свет служит регулятором циркадной и эндокринной систем и вызывает нейро-поведенческие реакции. Такая фотометрическая система должна основываться на понимании физиологии новых фоторецепторов и их специфической спектральной чувствительности. До тех пор, пока эта задача не решена, свет, с точки зрения циркадного эффекта, следует количественно оценивать в единицах облученности или плотности потока фотонов с четким определением спектрального распределения энергии излучения источников света.

Профессор Д. Галл [2.13] предложил ввести эффективные циркадные величины аналогично световым, т.е. построить циркадную метрию – циркадометрию и разработать методы измерений для оценки светотехнических систем.

В работе [2.13] отмечена связь циркадных эффективных характеристик излучения и световых величин, которую можно записать следующим образом:

$$\frac{X_{ec}}{X_v} = \frac{k}{k_m} \frac{\int X_{el} c(\lambda) d(\lambda)}{\int X_{el} v(\lambda) d(\lambda)} d(\lambda)$$

Отношение интегралов циркадных и фотометрических функций называется коэффициентом циркадной эффективности a_{cv}

$$a_{cv} = \frac{\int X_{el} c(\lambda) d(\lambda)}{\int X_{el} v(\lambda) d(\lambda)}$$

Тогда, между циркадными и световыми характеристиками существует следующее соотношение:

$$X_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} X_v$$

Поэтому одни величины легко могут быть переведены в другие.

Коэффициент циркадной эффективности можно измерить спектро-радиометрами и детекторами, скорректированными к функции $c(\lambda)$. Уже имеются первые результаты таких измерений. Немецкие ученые провели измерения с использованием цифровой камеры ROLLEI, спектральная чувствительность которой подобна функции циркадной эффективности $c(\lambda)$, и измерительной камеры LMK color, снабженной специальным корректирующим фильтром. Эти устройства позволяют проводить измерения a_{cv} с пространственным разрешением. Исследования проводились в реальной рабочей обстановке (в офисах и промышленных помещениях). Полученные результаты измерений a_{cv} находятся в области между 0,35 и 0,45, уровни облученности, оказывающие циркадное воздействие, составляют от 0,06 Вт/м² до 0,24 Вт/м².

Таким образом, для создания оптимальных светотехнических систем существенно измерение и расчет коэффициента циркадной эффективности ламп, светильников, осветительных установок.

Анализ публикаций и литературных данных по теме биологического воздействия видимого света на организм человека, обобщение

результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать выводы:

1. Помимо формирования зрительных образов свет оказывает биологическое воздействие на человека и его здоровье. Нормируемые характеристики световой среды при искусственном освещении не соответствуют реальным биологическим потребностям человеческого организма. Видимый свет является эффективным регулятором биологических ритмов, а также терапевтическим фактором.

2. Спектральная чувствительность нового типа фоторецепторов, до конца не изученная, показывает, что наиболее эффективно воздействие излучения в диапазоне 410-460 нм.

3. Действие видимого света зависит от уровня освещенности, спектральной чувствительности, продолжительности и времени суток. Для световой адаптации важно обеспечить не только уровень освещенности, но и цвет. Увеличение уровней освещенности в определенный момент времени, а также изменение цветовой температуры, особенно в ночные смены, приводит к увеличению производительности труда. Отмечено, что высокие уровни освещенности на поверхностях внутри помещений или на предметах, которые редко попадают в поле зрения, не оказывают значительного биологического воздействия, а важно количество света, попадающего непосредственно в глаз наблюдателя.

4. Создание осветительных установок с учетом новых знаний физиологии и фотобиологии должно стать важным шагом в реализации идеи качественного освещения рабочих мест. Разработка новых норм и правил проектирования качественных осветительных установок должна опираться на исследования биологических эффектов видимого света.

5. Необходимо создание соответствующей системы единиц, описывающей биологическое действие, характеризующей интенсивность воздействия, его длительность, а также устойчивость циркадных ритмов и синхронизацию структур головного мозга.

6. Показана целесообразность разработки способа количественной оценки незрительного воздействия света, попадающего на глаз наблюдателя, что станет новым критерием при создании норм освещения.

7. Применение измерительных средств, содержащих приемники излучения с чувствительностью, близкой к функции циркадной эффективности позволит измерять циркадные характеристики в поле зрения.

8. Для обработки результатов измерений и расчета циркадных величин, в том числе и коэффициента циркадной эффективности требуется разработка специального программного обеспечения.

9. Важно проведение измерений световых и циркадных величин с помощью одного универсального устройства, что заметно упрощает процесс исследования. Полученные данные в дальнейшем позволяют определить такие параметры эффективности воздействия как интенсивность излучения и его длительность, а значит рассчитать необходимые и допустимые световые дозы.

2.3. НОРМИРОВАНИЕ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

2.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Нормирование естественного освещения. Нормирование естественного освещения производится при помощи коэффициента естественной освещенности или сокращенно *КЕО*. *КЕО* - отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражений), к одновременному значению наружной горизонтальной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода, выраженное в %:

$$КЕО = \frac{E_{ВН}}{E_H} \cdot 100, \%, \quad (2.1)$$

где $E_{ВН}$ - освещенность внутри помещения; E_H - наружная освещенность.

При одностороннем боковом естественном освещении нормируется минимальное значение *КЕО* в точке, расположенной на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от световых проемов, на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Характерный разрез помещения - поперечный разрез посередине помещения, плоскость которого перпендикулярна плоскости остекления световых проемов (при боковом освещении) или продольной оси пролетов помещения. В характерный разрез помещения должны попадать участки с наибольшим количеством рабочих мест, а также точки рабочей зоны, наиболее удаленные от световых проемов.

При двустороннем боковом освещении нормируется минимальное значение KEO в точке посередине помещения на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола).

При верхнем или верхнем и боковом естественном освещении нормируется среднее значение KEO в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Существенное значение имеет то, в каком поясе светового климата размещается помещение, так как естественное освещение зависит от числа солнечных дней в году, а также от устойчивости снежного покрова.

Качество естественного освещения оценивается равномерностью. Неравномерность не должна превышать 3:1 (отношение KEO максимального к KEO минимальному) в помещениях производственных и общественных зданий с верхним и боковым естественным освещением. Неравномерность естественного освещения не нормируется для помещений с одним боковым освещением, а также при верхнем или комбинированном при работах с крупными объектами различения.

Расчет естественного освещения заключается в определении коэффициента естественной освещенности в различных точках характерного разреза помещения, Учитывается световой поток прямого диффузного света от небосвода, а также отраженного от внутренних поверхностей помещения и от противостоящих зданий. Результат расчета - определение площади световых проемов для помещений. Поэтому для расчета естественного освещения необходимо иметь следующие данные: длину и ширину помещения, количество пролетов, значения коэффициентов отражения стен и потолков, коэффициентов светопропускания и затемнения окон противостоящими зданиями, а также степень точности выполняемой работы. Зная площадь остекления S_0 и площадь окон S_{OK} определяют количество окон:

$$n = S_0 / S_{OK}. \quad (2.2)$$

Нормирование искусственного освещения. При выборе соотношений нормируемых значений освещенности по разрядам точности и напряженности зрительной работы необходимо учитывать следующие показатели: точность зрительной работы и коэффициент отражения рабочей поверхности; продолжительность напряженной зрительной работы в общем бюджете рабочего времени; характеристики качества освещения; технико-экономические показатели применяемой системы освещения; требования обеспечения безопасности работы.

Классификация зрительных работ по точности определяется угловым размером и яркостным контрастом объекта наблюдения с фоном. Объектом наблюдения принято называть деталь рассматриваемого предмета, которую требуется различать в процессе работы.

Угловые размеры объектов наблюдения, выраженные в угловых минутах, группируют по их линейным размерам, принимая расстояние от объекта до глаза наблюдателя равным 0,35-0,5 м, что позволяет линейный размер 0,1 мм принять эквивалентным угловому размеру в одну угловую мин. Объекты различения классифицируются по размерам на шесть разрядов: от 1 - наивысшей точности (размер объекта различения менее 0,15 мм) до 6 - грубая работа (размер объекта различения более 5 мм). Последующие три разряда - 7, 8, 9 - не учитывают размеры объекта различения, поскольку к ним относятся работы, требующие только общего наблюдения за ходом производственного процесса, склады, а также работы с самосветящимися объектами.

Контраст K объекта наблюдения с фоном принято считать малым при $K < 0,2$; средним при $0,2 < K < 0,5$ и большим при $K > 0,5$. Рабочие поверхности, являющиеся фоном, на котором объект зрительно обнаруживается и опознается, классифицируются по коэффициенту их отражения ρ на три группы: темные ($\rho < 0,2$), средние ($0,2 < \rho < 0,4$) и светлые ($\rho > 0,4$).

Нормируемую освещенность позволяют определить три характеристики: точность зрительной работы, контраст объекта с фоном и коэффициент отражения рабочей поверхности.

Если работа связана с повышенной опасностью травматизма, размещением деталей на движущихся поверхностях, если напряженная зрительная работа производится непрерывно в течение рабочего дня или различаемые объекты расположены от глаз далее чем на 0,5 м, нормы освещенности повышаются на одну ступень согласно специальной шкале освещенностей. Так, в указанных случаях наибольшая освещенность для зрительной работы A может быть повышена до 6000 и даже до 7500 лк.

В реальных условиях работы глаза яркость поля зрения неодинакова из-за различия коэффициентов отражения отдельных участков поля зрения, из-за распределения светового потока по освещаемым поверхностям и наличия в поле зрения светящихся пятен. В результате наличия в поле зрения пятен с яркостью, значительно превышающей яркость адаптации наблюдателя, возникает ощущение неудобства или напряженности - зрительный дискомфорт. Зрительный дискомфорт

вызывает отвлечение внимания и уменьшение сосредоточенности, а также может привести к зрительному и общему утомлению. Утомляют также неправильная передача цвета освещаемых предметов и пульсация яркости рабочих поверхностей во времени. В связи с этим нормируются следующие качественные показатели освещения: ослепленность, дискомфорт, пульсация и спектр излучения.

Показатель ослепленности P - критерий оценки слепящего действия осветительной установки

$$P = (S - 1) \cdot 1000, \quad (2.3)$$

где коэффициент ослепленности $S = V_1 / V_2$; V_1 - видимость объекта наблюдения при экранировании блеских источников; V_2 - то же при наличии в поле зрения блеских источников.

Нормируемые значения показателей ослепленности не должны превышать $P = 20$ для точных зрительных работ и $P = 40$ для работ меньшей точности.

Показатель дискомфорта M - критерий оценки дискомфортной блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения, выражающийся формулой

$$M = \frac{L_c \omega^{0.5}}{\Phi_0 L_{ad}^{0.5}}, \quad (2.4)$$

где L_c - яркость блестящего источника, кд/м², ω - угловой размер блестящего источника, ср, Φ_0 - индекс позиции блестящего источника относительно линии зрения, L_{ad} - яркость адаптации, кд/м².

Таким образом, основными параметрами осветительной установки, определяющими уровень предельно допустимой яркости по дискомфорту, являются яркость адаптации и расположение световых приборов в поле зрения. Поэтому для местного освещения светильники предусматриваются с непросвечивающими отражателями, имеющими защитный угол не менее 30°.

Пульсация яркости рабочих поверхностей во времени вызывает зрительное утомление и снижение производительности труда. Излучение газоразрядных источников света пульсирует с удвоенной частотой переменного тока, питающего осветительную установку. Критерием оценки относительной глубины колебаний освещенности служит коэффициент пульсации освещенности:

$$K_{II} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{cp}} \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

где E_{\max} и E_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения освещенности за период ее колебания, лк; E_{cp} – среднее значение освещенности за этот же период, лк.

Для уменьшения коэффициента пульсации принято пользоваться следующими методами: включение смежных ламп в различные фазы электрической сети, питание установок током повышенной частоты, а также применение двухламповых светильников с емкостным и индуктивным сопротивлениями.

Максимально допустимые значения коэффициента пульсации при системе комбинированного освещения для 1 и 2 разрядов работы равны 10 для местного и 20 для общего освещения, для 4-8 разрядов - 20.

2.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ОСВЕЩЁННОСТИ

Нормативные величины искусственного освещения для промышленных предприятий в РФ неоднократно пересматривались в основном в сторону повышения требований к уровням освещенности рабочих мест.

В настоящее время параметры освещенности регламентируются следующими документами:

1. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.
2. СНиП II-4-79. Естественное и искусственное освещение.
3. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение (Актуализированная редакция СНиП 23-05-95).
4. СН 357-77 Инструкция по проектированию силового и осветительного электрооборудования промышленных предприятий.
5. СН 541-82 Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов.
6. ВСН 59-88 Ведомственные строительные нормы. Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования.
7. ВСН 332-74 Инструкция по монтажу электрооборудования, силовых и осветительных сетей взрывоопасных зон.

8. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

9. ГОСТ 21.608-84 (2002) Внутреннее электрическое освещение. Рабочие чертежи (устанавливает состав проекта внутреннего электроосвещения, а также правила оформления рабочих чертежей).

10. ГОСТ 21.607-82 (2002).СПДС. Электрическое освещение территории промышленных предприятий.

11. ГОСТ 8607-82. Светильники для освещения жилых и общественных помещений. Общие технические условия.

12. ГОСТ 15597-82 (1990). Светильники для производственных зданий. Общие технические условия.

13. ГОСТ 27900-88. Светильники для аварийного освещения. Технические требования.

Это основные документы, принятые в России. Дополнительные требования, рекомендации по оптимизации условий освещения отражены и в других нормативных и методических документах [2.15].

ГЛАВА 3. ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

3.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Инфракрасное излучение (ИКИ) представляет собой невидимое ЭМИ с длиной волны от 0,76 до 420 мкм, обладающее волновыми и световыми свойствами. При этом диапазон от 0,76 до 15 мкм считается коротковолновым, от 15 до 100 мкм - средневолновым, а от 100 до 420 - длинноволновым.

Коротковолновая часть спектра примыкает к видимому свету, а длинноволновая сливается с областью ультракоротких радиоволн. Поэтому ИКИ обладает как свойствами видимого света (распространяется прямолинейно, отражается, преломляется, как и видимый свет), так и свойствами радиоволн (оно может проходить сквозь некоторые материалы, непрозрачные для видимого излучения).

ИК излучатели с температурой на поверхности от 700 С до 2500 С имеют длину волны 1,55-2,55 мкм и называются "светлыми" - по длине волны они ближе к видимому свету, излучатели с более низкой температурой поверхности имеют большую длину волны и называются "темными".

Основные законы физики инфракрасного излучения следующие:

Закон Кирхгофа: лучеиспускание обуславливается только состоянием излучающего тела и не зависит от окружающей среды. Лучеиспускательная способность любого тела пропорциональна его лучепоглощающей способности. Тело, поглощающее все падающие на него лучи (абсолютно черное тело), обладает максимальным излучением.

Закон Стефана-Больцмана: с повышением температуры излучающего тела мощность излучения увеличивается пропорционально 4-й степени его абсолютной температуры:

$$E = \sigma \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.1)$$

где E - мощность излучения; σ - постоянная Стефана-Больцмана, равная $5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; T - абсолютная температура, К.

В соответствии с этим законом даже небольшое повышение температуры тела приводит к значительному росту отдачи тепла излучением. Используя этот закон можно определить величину теплообмена излучением в производственных условиях.

Количество тепловой энергии, передаваемое излучением, определяется законом Стефана-Больцмана по формуле [3.1-3.2]:

$$E = C_1 C_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (3.2)$$

где E - теплоотдача, Вт/м², C_1 и C_2 - константы излучения с поверхностей, σ - постоянная Стефана-Больцмана; T_1 и T_2 - температуры поверхностей (°К), между которыми происходит теплообмен излучением.

При расчете теплоотдачи излучением учитывают температуру стен и других поглощающих тепловую радиацию поверхностей (средне-радиационная температура).

Закон Вина: произведение абсолютной температуры излучающего тела на длину волны излучения ($\lambda_{\text{макс}}$) с максимальной энергией - величина постоянная

$$\lambda_{\text{макс}} \cdot T = C, \quad (3.3)$$

где $C = 2880$; T - абсолютная температура °К; λ - длина волны в мкм.

Исходя из закона Вина, длина волны максимального излучения нагретого тела обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_{\text{макс}} = C / T. \quad (3.4)$$

Основная физическая характеристика инфракрасного излучения - интенсивность излучения (плотность потока) E (Вт/м²) зависит от температуры излучателя, его площади и расстояния до исследуемой точки пространства и определяется по следующим формулам [3.3]:

$$\text{при } r \geq \sqrt{S} - E_u = \frac{0,91S[(0,01T_u) - 85]}{r^2}, \quad (3.5)$$

$$\text{при } r < \sqrt{S} - E_u = \frac{0,91S[(0,01T_u) - 85]}{r}. \quad (3.6)$$

где S - площадь поверхности излучателя, м², T_u - абсолютная температура излучателя, °К, r - расстояние от излучателя до точки замера, м.

3.1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Инфракрасное излучение – один из частных видов ЭМВ. В 1832 году Фарадей высказал предположение о существовании ЭМВ. В 1865 году Максвелл теоретически доказал, что ЭМВ распространяются в вакууме со скоростью света, из чего ученый сделал вывод, что и свет представляет собой, по существу, ЭМВ. Герц в 1888 году в опытах подтвердил правильность теории Максвелла. Эти открытия позволили доказать, что радиоволны, видимый спектр света, рентгеновские лучи и гамма лучи – это проявление электромагнитных колебаний с различной длиной волны, причем на этой шкале ЭМВ между двумя соседними диапазонами нет резкой границы.

На существование невидимых глазом тепловых лучей указывал еще в 1791 году французский физик Пьер Прево, однако честь их открытия в 1800 году принадлежит Гершелю, который дал им название «инфракрасные лучи». ИКИ занимает на шкале ЭМВ спектральную область между концом красного цвета видимой части спектра (с длиной волны равной 0,74 мкм) и коротковолновым радиоизлучением (длина волны равная 1-2 мкм). Для удобства инфракрасную область спектра условно разделяют на отдельные участки. В частности, В.В. Зарецкий и А.Г. Выховская (1976) различают ближнее ИКИ (0,76-1,5 мкм), коротковолновое (1,5-5,5 мкм), длинноволновое (5,6-25 мкм) и дальнее (25-1000 мкм) [3.4].

3.1.2. ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Естественные источники ИКИ. Мощным источником ИКИ является Солнце, около 50% излучения которого лежит в инфракрасной области. Диапазон ИК лучей достаточно широк. Это волны с длиной от 7 и до 14 микрометра (мкм). Частичное поглощение и рассеяние ИК лучей происходит в атмосфере Земли. О масштабах солнечного ИКИ говорит тот факт, что на него приходится 58% всего спектра ЭМВ солнца.

Естественными источниками ИКИ являются и биообъекты, в том числе и человек. Излучение тела человека находится в том же диапазоне волн (от 7 и до 14 мкм) с максимумом на длине волны около 10 мкм.

Искусственные источники ИКИ. Источником ИКИ в производственных условиях являются нагретые поверхности слитков, чу-

шек, листов, поковок, разливаемый жидкий металл, открытое пламя печей, сварочное пламя (при электро- и газосварке) и т.п.

По характеру излучения производственные источники тепла и лучистой энергии подразделяются на четыре основные группы [3.1]:

- источники с температурой до 500 °С - спектр содержит исключительно длинноволновое ИКИ;

- источники с температурой от 500 °С до 1200°С - в спектре содержится ИКИ-А, ИКИ-В, ИКИ-С, но появляется также видимое излучение слабой интенсивности, сначала красное, а затем белое;

- источники с температурой от 1200 °С до 2000°С - спектр содержит как все виды ИКИ, так и видимое излучение высокой яркости;

- источники с температурой от 2000 °С до 4000°С - спектр наряду с инфракрасным и видимым излучением содержит ультрафиолетовое излучение.

Интенсивность ИКИ на рабочих местах может колебаться от 175 Вт/м² до 13956 Вт/м². К горячим цехам относят цеха, в которых тепловыделение превышает 23 Дж/м². В литейных цехах (нагрев и обработка деталей) интенсивность излучения составляет 1392-3480 Вт/м². В производственных помещениях с большим тепловыделением (горячие цеха) доля тепла, приходящее на ИКИ, может составлять до 2/3 выделяемого тепла и только 1/3 составляет конвекционное тепло, т.е. тепло, передающееся при контакте с нагретым воздухом.

3.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

Человек как биологическое тело, имеющее температуру в интервале от 31 до 42 °С, является источником преимущественно ИКИ. Основная часть собственного излучения кожи человека приходится на диапазон волн с длиной от 4 до 50 мкм. Максимальная спектральная плотность лежит в диапазоне около 10 мкм, то есть в длинноволновой области ИКИ. Точнее можно распределить ИКИ кожи человека следующим образом: на излучение с длиной волны до 5 мкм приходится до 1% всего излучения, с длиной волны от 5 до 9 мкм – 20%, от 9 до 16 мкм – 30% и на более длинноволновое излучение – 41%.

Исследования Харди [3.5] показали, что в длинноволновой области ИКИ (8-14 мкм) кожа человека излучает как абсолютно черное тело независимо от возраста, степени пигментации и других особен-

стей. Поэтому коэффициент излучения кожи человека можно считать равным единице. На практике доказано, что различие между характеристиками излучения кожи человека и абсолютно черного тела все же существует, но оно невелико и зависит, в основном, от влияния окружающего фона. В.В. Зарецкий и соавт. (1976) [3.3] указывают, что при проведении измерений в помещении с температурой 22 °С температура кожи человека будет отличаться от истинной на 0,3°С. Это правило нельзя отнести к излучению с длиной волны короче 5 мкм, но доля этого излучения небольшая по сравнению с общим ИКИ (не более 1%).

Любое нагретое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля (273 °К), в том числе организм человека, излучает ЭМВ в широком спектре частот. Физическая сущность теплового радиоизлучения заключается в наличии заряженных частиц (электроны, ионы), которые находятся в хаотическом движении и обладают свойствами электрической или магнитной полярности. ЭМВ распространяются по всему объему тела, достигают поверхности и, пройдя через кожу, частично излучаются в окружающую среду. Интенсивность этих процессов пропорциональна температуре тела и его излучательной способности. Поскольку движение частиц хаотическое, они создают радиоволны различной длины.

Глубина эффективного измерения температуры равна толщине излучающего слоя (скин-слой) и определяется как расстояние, на которое распространяется ЭМВ от поверхности объекта до того слоя, в котором ее интенсивность уменьшается в 2,73 раза. При прочих равных условиях, чем больше длина волны, тем больше глубина, с которой можно регистрировать температурные возмущения. Максимум интенсивности теплового радиоизлучения при обычной температуре окружающей среды лежит в инфракрасной области спектра (на длине волны около 10 мкм). Это обусловило целесообразность создания ИКИ тепловидения (термографии) для исследования температурных аномалий. Однако, измерение теплового излучения тела человека в ИК диапазоне дает истинную температуру только самого верхнего слоя кожи толщиной в доли миллиметра. О температуре подлежащих тканей и органов можно судить опосредованно и только, когда температурные изменения «проецируются» на кожные покровы.

Интенсивность теплового излучения тела человека в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне на несколько порядков меньше, чем в ИК части спектра. В частности, на длине волны 17 см она меньше в 10 раз, поэтому для регистрации тепловых сигналов в этом диапазоне требуется аппаратура с более высокой чувствительностью. Преимущест-

вом данного диапазона измерений является то, что глубина проникновения излучения гораздо больше, и можно получать данные о температурных параметрах от внутренних органов и структур тела человека, однако значительно уменьшается пространственная разрешающая способность, вследствие чего нельзя получить тепловой портрет исследуемой области.

Лучистое тепло имеет ряд особенностей. ИК излучения, помимо усиления теплового воздействия на организм работающего, обладает и специфическим влиянием, зависящим от интенсивности энергии излучения отдельных участков его спектра. Существенное влияние на лучистый теплообмен организма оказывают оптические свойства кожного покрова с его избирательной характеристикой коэффициентов отражения, поглощения и пропускания по отношению к различным участкам спектра инфракрасной радиации.

Воздействие ИК излучения на организм человека проявляется как общими, так и местными реакциями. Местная реакция - выражается сильнее при длинноволновом облучении, поэтому при одной и той же интенсивности облучения время переносимости при длинноволновом облучении короче, чем при коротковолновой радиации. За счет большой глубины проникновения в ткани тела коротковолновая область спектра ИК излучения обладает выраженным общим действием на организм человека, вызывая повышение температуры глуболежащих тканей: например, при длительном облучении глаза может привести к помутнению хрусталика (профессиональная катаракта).

Под влиянием ИКИ в организме человека возникают биохимические изменения функционального состояния центральной нервной системы: образуются специфические биологически активные вещества типа гистамина, холина, повышается уровень фосфора и натрия крови, усиливается секреторная функция желудка, поджелудочной и слюнной желез, в центральной нервной системе развиваются тормозные процессы, уменьшается нервно-мышечная возбудимость, понижается общий обмен.

Таблица 3.1

Время переносимости (в секундах) инфракрасной радиации в зависимости от ее интенсивности и длины волны

Интенсивность радиации, Вт/м ²	Длина волны, мкм	
	3,6	1,07
1400	159	305
2800	27,3	37,9
4200	12,9	21,2

При ИК облучении кожи повышается ее температура. При значительных интенсивностях возникают ощущения жжения, боль. Время переносимости тепловой радиации уменьшается с увеличением длины волны и ее интенсивности (табл. 3.1) [3.6].

Участки кожи, подвергающиеся ИК облучению, получают большое количества тепла и перегреваются. Перегрев сначала носит местный характер, но вследствие циркуляции крови он вскоре охватывает весь организм и самочувствие работающего значительно ухудшается.

Влияние радиационного тепла различно в зависимости от зоны облучения: максимальный эффект наблюдается при облучении шейной области верхней половины туловища; минимальный при облучении ног (области бедра).

Выносливость к облучению возрастает с увеличением периода облучения, при котором наблюдаются процессы приспособления (адаптация), сохраняющиеся довольно долго.

3.3. НОРМИРОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Интенсивность ИКИ на расстоянии 1 см от нагретых поверхностей оборудования производственных помещений не должна превышать в рабочей зоне 50 Вт/см^2 .

ИКИ как интегральный показатель некоторых характеристик нагретых поверхностей. Между интенсивностью ИКИ и температурой, цветом, гладкостью нагретой поверхности, физическими свойствами вещества и структурой поверхностного слоя существует непосредственная зависимость:

а) Интенсивность ИКИ меняется с изменением абсолютной температуры нагретой поверхности.

б) При одной и той же температуре нагретой поверхности ее излучательная способность меняется в зависимости от цвета поверхности. Разница в излучении от поверхностей, окрашенных в разные цвета, достигает 40 - 100%.

в) При одинаковой температуре нагретой поверхности ее излучательная способность меняется в зависимости от гладкости поверхности ^{*)}. Разница в излучении от "гладкой" и "шероховатой" поверхности со-

ставляет 30 - 90%, а "гладкой" и "обычной" - 3 - 7%. Наименьшая излучательная способность у "гладкой" и "обычной" поверхности.

*) Имеются в виду следующие виды гладкости: а) "обычная" поверхность теплоизоляционных материалов, выпускаемых промышленностью без дополнительной обработки, и поверхность покрытий при монтаже теплоизоляции; б) "шероховатая" поверхность, имеющая неровности в виде выступов и углублений размерами 1 - 3 мм; г) "гладкая" поверхность, отшлифованная на корундовом камне.

г) Излучательная способность нагретой поверхности определяется также физическими свойствами вещества и структурой поверхностного слоя толщиной не более 35 - 40 мк (толщина алюминиевой фольги, керамического покрытия, двойного слоя масляной краски и т.п.).

Излучательная способность разных видов покрытий, применяемых для теплоизоляции (мастичные, керамические, алюминиевая фольга и др.) различна. Наименьшая излучательная способность у мастичных покрытий и алюминиевой фольги. Теплоизоляционные материалы, имеющие одно и то же покрытие, при одинаковой температуре поверхности излучают инфракрасную радиацию одной и той же интенсивности.

Методы измерения интенсивности ИКИ от нагретых поверхностей. Интенсивность ИКИ следует определять дифференциальными радиометрами различных типов и производственными актинометрами. Точность показаний радиометров должна быть не менее 2,5 Вт/см².

Температура нагретых поверхностей замеряется термопарами и термощупами разных конструкций.

Ввиду отсутствия строго фиксированных рабочих мест в производственных помещениях измерение интенсивности ИКИ следует производить непосредственно у источников излучения (в 1 см от излучающей поверхности) на различных участках каждой из нагретой поверхности не менее чем в 5 точках.

Нормирование параметров микроклимата воздуха рабочей зоны производственных помещений предприятий осуществляется согласно ГОСТ ССБТ 12.1.005-88 по следующим показателям: 1) температура воздуха, °С; 2) относительная влажность воздуха, %; 3) скорость движения воздуха, м/с; 4) интенсивность теплового излучения, Вт/м², 5) температура нагретых поверхностей, °С.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, инсоляции на постоянных и непостоянных рабочих местах зависит от доли облучаемой поверхности тела (табл. 3.2).

Интенсивность теплового облучения работающих от открытых источников (нагретый металл, стекло, «открытое» пламя и др.) не должна превышать 140 Вт/м^2 , при этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

В тех производственных помещениях, где допустимые нормативные величины показателей микроклимата невозможно установить из-за технологических требований к производственному процессу или из-за экономически обоснованной нецелесообразности, условия микроклимата следует рассматривать как вредные и опасные.

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия (например, системы местного кондиционирования воздуха; воздушное душирование; компенсация неблагоприятного воздействия одного параметра микроклимата изменением другого; спецодежда и другие средства индивидуальной защиты по ГОСТ ССБТ 12.4.045-87; помещения для отдыха и обогрева; регламентация времени работы: перерывы в работе, сокращение рабочего дня, увеличение продолжительности отпуска, уменьшение стажа работы и др.).

Таблица 3.2

Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м^2 , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

Во избежание чрезмерного общего перегрева организма и локального повреждения (ожог) регламентируются продолжительность периодов непрерывного ИК облучения человека и пауз между ними (табл. 3.3).

Интенсивность теплового облучения работающих от открытых источников (нагретый металл, стекло, "открытое" пламя и др.) не должна превышать 140 Вт/м^2 , при этом облучению не должно подвергаться более 25%) поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз [3.1].

Рекомендуется принимать на работу в нагревательной среде лиц не моложе 25 лет и не старше 40, обладающих высокой тепловой устойчивостью.

Контроль за соблюдением норм. Контроль за соблюдением норм возлагается на санитарно-эпидемиологические станции. При приемке производственных помещений следует особое внимание обращать на состояние тепловой изоляции нагретых поверхностей оборудования и ограждений:

а) на поверхности изоляции не должно быть трещин, заметных на глаз шероховатостей (выпуклостей, углублений и т.д.) и других повреждений поверхностного слоя;

б) все излучающие поверхности должны быть окрашены в светлые тона (желательно белый цвет).

Работники санэпидстанций должны систематически контролировать состояние тепловой изоляции и требовать у ответственных лиц данные об интенсивности инфракрасного излучения от нагретых поверхностей в производственных помещениях (во время работы двигателей).

Ответственность за состояние тепловой изоляции нагретых поверхностей в период эксплуатации возлагается на ответственного в производственном помещении.

Таблица 3.3

Влияние интенсивности ИКИ на продолжительность периодов непрерывного облучения человека и пауз между ними

Интенсивность инфракрасного излучения, Вт/м^2	Продолжительность периодов непрерывного облучения, мин.	Продолжительность паузы, мин.	Соотношение продолжительности облучения и пауз
350	20,0	8,0	2,50
700	15,0	10,0	1,50
1050	12,0	12,0	1,00
1400	9,0	13,0	0,70
1750	7,0	14,0	0,50
2100	5,0	15,0	0,33
25003,5	3,5	12,0	0,30

Измерение плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Тепловой поток - количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность в единицу времени. Тепловой поток измеряется в ваттах или ккал/ч ($1 \text{ Вт} = 0,86 \text{ ккал/ч}$). Тепловой поток, отнесённый к единице изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока или тепловой нагрузкой; обозначается обычно q , измеряется в Вт/м^2 или $\text{ккал}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$. Плотность теплового потока - вектор, любая компонента которого численно равна количеству теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению взятой компоненты.

Измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции, производятся в соответствии с ГОСТ 25380-82 "Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции".

Настоящий стандарт устанавливает единый метод определения плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции жилых, общественных, производственных и сельскохозяйственных зданий и сооружений при экспериментальном исследовании и в условиях их эксплуатации.

Измерения плотности тепловых потоков проводят при температуре окружающего воздуха от 243 до 323 К (от -30 до $+50^\circ\text{C}$) и относительной влажности воздуха до 85%.

Измерения плотности тепловых потоков позволяют количественно оценить теплотехнические качества ограждающих конструкций зданий и сооружений и установить реальные расходы тепла через наружные ограждающие конструкции.

Указанный стандарт не распространяется на свето-прозрачные ограждающие конструкции.

Метод измерения плотности теплового потока основан на измерении перепада температуры на "вспомогательной стенке" (пластинке), устанавливаемой на ограждающей конструкции здания. Этот температурный перепад, пропорциональный в направлении теплового потока его плотности, преобразуется в ЭДС батарей термопар, расположенных во "вспомогательной стенке" параллельно по тепловому потоку и соединённых последовательно по генерируемому сигналу. "Вспомогательная стенка" и батареи термопар образуют преобразователь теплового потока.

Плотность теплового потока отсчитывается по шкале специализированного прибора, в состав которого входит преобразователь теплового потока, или рассчитывается по результатам измерения ЭДС на

предварительно отградуированных преобразователях теплового потока.

3.1. Схема измерения плотности теплового потока приведена на рис.

Интенсивность (плотность потока) ИК излучения q определяется по формуле [3.7]:

$$q = 0,78 \cdot S(T^4 \cdot 10^{-8} - 110) / r^2, \text{ Вт/м}^2, \quad (3.7)$$

где S - площадь излучающей поверхности, м^2 ; T - температура излучающей поверхности, $^{\circ}\text{K}$; r - расстояние от источника излучения, м.

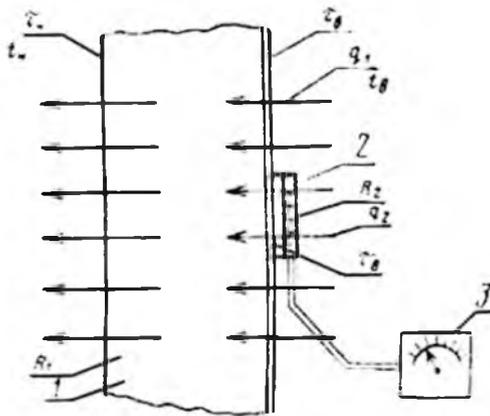


Рис. 3.1. Схема измерения плотности теплового потока:

1 - ограждающая конструкция; 2 - преобразователь теплового потока; 3 - измеритель ЭДС; $t_{в}$, $t_{н}$ - температура внутреннего и наружного воздуха; $\tau_{н}$, $\tau_{в}$ - температура наружной, внутренней поверхностей ограждающей конструкции вблизи и под преобразователем соответственно; R_1 , R_2 - термическое сопротивление ограждающей конструкции и преобразователя теплового потока; q_1 , q_2 - плотность теплового потока до и после закрепления преобразователя.

Для измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции, и проверки свойств теплозащитных экранов разработаны приборы серии ИПП-2 с диапазоном измерения плотности теплового потока от 10 до 250, 500, 2000, 9999 Вт/м^2 [3.1].

3.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНФРАКРАСНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Нормирование ИКИ осуществляется по интенсивности допустимых суммарных потоков энергии с учетом длины волны, размера облучаемой поверхности, защитных свойств спецодежды и продолжительности воздействия в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 [3.1] и СанПиН 2.2.4.548-96 [3.2]. Так, интенсивность теплового излучения от нагретых до темного свечения поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, материалов (и т. д.) на постоянных и непостоянных рабочих местах не должна превышать 35 Втм^{-2} при облучении 50 % поверхности тела и более, 70 Втм^{-2} - при облучении от 25 до 50 % и 100 Втм^{-2} - при облучении не более 25 % поверхности тела. Интенсивность теплового облучения от открытых источников, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, пламя и т. д.), не должна превышать $140 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, при этом воздействию не должно подвергаться более 25 % поверхности тела, и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз. При наличии теплового излучения температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 25 и 24 °С для I, а и I, б категорий работ соответственно, 22 и 21 °С - для II, а и II, б категорий работ соответственно и 20 °С - для III категории работ [3.3-3.5]. Температура нагретых поверхностей оборудования в рабочей зоне не должна превышать 45 °С, а для оборудования с температурой внутри ниже 100 °С должна быть не более 35 °С.

Гигиенические нормы интенсивности ИКИ от нагретых поверхностей в производственных помещениях отражены в [3.6-3.9].

ГЛАВА 4. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

4.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Оптический диапазон ЭМИ Солнца, достигающий границ земной атмосферы (от 100 до 60000 нм), условно делится на три части (инфракрасную, ультрафиолетовую и видимую части солнечного спектра), так как с изменением длины ЭМВ изменяются свойства лучистой энергии.

Ультрафиолетовое излучение (УФИ) - это ЭМИ в оптической области в диапазоне 200-400 нм с частотой колебаний от 10^{13} до 10^{16} Гц, примыкающее со стороны коротких волн к видимому свету. Оно относится к неионизирующим излучениям. Естественным источником УФИ является Солнце.

УФИ, так же как и ИКИ, в зависимости от длины волны, делится на три области [4.1]:

- ◆ УФИ-А- длинноволновая (400-320 нм);
- ◆ УФИ-В - средневолновая (320-280 нм);
- ◆ УФИ-С - коротковолновая (280-200 нм).

УФИ Солнца в диапазоне 10-200 нм полностью расходуется на образование ионосферы на высоте 50-80 км от поверхности Земли. Коротковолновое УФИ в диапазоне 280-200 нм (УФИ-С), оказывающее выраженное *бактерицидное* действие, не достигает поверхности Земли; большая его часть расходуется в стратосфере на высоте 20-25 км на образование озонового слоя, остальная часть поглощается кислородом тропосферы. Часть УФИ, достигающая поверхности Земли и непосредственно оказывающая воздействие на природу Земли и человека, это *длинноволновое*, 400-320 нм (УФ-А), и *средневолновое*, 320-280 нм (УФ-В). В промышленных городах, особенно зимой, УФИ Солнца полностью поглощается техногенными компонентами городского воздуха (например, оксидами азота) и не поступает в помещение. В помещении может поступать лишь незначительная часть УФИ с длиной волны 300-400 нм, так как УФИ короче 300 нм задерживается обычным оконным стеклом, содержащим в своем составе оксиды титана, хрома и железа. Специальные увиолевые стекла пропускают УФИ с длиной волны до 254,4 нм.

4.2. ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Естественные источники. Основным источником УФ-излучения на Земле – это Солнце. К естественным источникам относятся также и другие небесные светила, разряды молнии. Соотношение интенсивности излучения УФ-А и УФ-Б, общее количество УФ-лучей, достигающих поверхности Земли, зависит от следующих факторов [4.3]: от концентрации атмосферного озона над земной поверхностью, от возвышения Солнца, от высоты над уровнем моря, от атмосферного рассеивания, от состояния облачного покрова, от степени отражения УФ-лучей от поверхности (воды, почвы).

Искусственные источники. К искусственным источникам УФ-излучения относятся все твердые тела, у которых $t > 1000$ °С, в том числе лазерные установки; газоразрядные лампы с трубками из кварца (кварцевые лампы), ртутные; ртутные выпрямители и др.

К искусственным источникам УФ-излучения можно отнести электрическую дугу с угольными электродами или содержащими металлы в виде примесей или стержней, специальные газоразрядные лампы (например, ртутно-кварцевая лампа типа ПРК), водородные, бактерицидные, ксеноновые, люминесцентные, лампы-фотовспышки.

Благодаря созданию и совершенствованию искусственных источников УФ-излучения, шедшими параллельно с развитием электрических источников видимого света, сегодня специалистам, работающим с УФ-излучением в медицине, профилактических, санитарных и гигиенических учреждениях, предоставляются существенно большие возможности, чем при использовании естественного УФ-излучения.

В отличие от осветительных, УФ-источники, как правило, имеют селективный спектр, рассчитанный на достижение максимально возможного эффекта для определенного фотобиологического процесса.

Таблица 4.1

Свойства УФ-излучения	Техническое применение
Вызывает люминесценцию	Используется в люминесцентных лампах, люминесцентном анализе и дефектоскопии
Вызывает фотоэффект	Применяется в промышленной электронике и автоматике
Вызывает фотохимические реакции	Применяется в текстильном производстве
Производит бактерицидное действие	Используется для стерилизации воздуха в промышленных помещениях и в медицинской практике
Вызывает эритему	Применяется в профилактике заболеваний и лечении

УФИ обнаруживается с помощью фотоэлементов, фотоумножителей, люминесцентных веществ. В табл. 4.1 приведены основные свойства УФИ и примеры его технического применения [4.4].

4.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УФИ [4.12]

4.3.1. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

Излучение солнца имеет электромагнитную колебательную природу и носит непрерывный характер. Этот спектр излучений можно разделить на несколько областей: рентгеновское излучение – ниже 2 нм; УФИ – от 2 нм до 400 нм; видимый участок спектра – от 400 нм до 750 нм; ИКИ – выше 750 нм.

Биологическая роль каждого вида излучений имеет свои характерные особенности. Здесь рассмотрены роль и механизмы биологического действия УФИ, которое имеет лишь часть УФ электромагнитного спектра в области 180 ÷ 400 нм. Энергия квантов этого излучения (70–140 ккал/моль) превосходит энергию активации большинства химических реакций. Поэтому УФИ является весьма фотохимически активной частью спектра. УФИ в области 2 ÷ 180 нм интенсивно поглощается кислородом воздуха. Поэтому оно реально существует лишь в космическом пространстве или в специальных лабораторных условиях. Рассматриваемый спектр УФИ, имеющих биологическое значение, подразделяется на три диапазона по своей проникающей способности и фотохимической активности: область А (320÷400 нм), область В (275÷320 нм), область С (180÷275 нм).

В настоящее время в фотобиологии принято также выделять так называемый экологический диапазон (295÷400 нм) и УФИ искусственных источников (короче 295 нм). В атмосфере Земли коротковолновое излучение Солнца, рентгеновское, и короткий ультрафиолет, взаимодействуя с молекулярным кислородом, приводят к образованию озонового слоя на высоте от 20 до 30 км. Озон поглощает все виды излучений с длиной волны короче 295 нм и экранирует поверхность Земли и нижележащие слои атмосферы от нежелательных воздействий этих излучений.

С другой стороны, экологическое УФИ является постоянно действующим фактором внешней среды, оказывающим мощное воздействие на многие физиологические процессы, протекающие в организме.

Также оно сыграло важную роль в эволюционных процессах, протекавших на Земле.

Прежде всего, УФИ, наряду с космическими лучами и радиоактивными элементами земной коры, с электрическими разрядами в атмосфере, извержениями вулканов и ударами метеоритов, было важнейшим фактором, способствовавшим абиогенному синтезу органических соединений на Земле. Мутагенное действие УФИ на простейшие формы жизни стимулировало ход биологической эволюции, способствовало увеличению разнообразия жизненных форм.

В ходе эволюции земные организмы приобрели способность использовать для своих нужд энергию различных частей солнечного спектра. Хорошо известна роль видимой части солнечного света – фотосинтез, зрение, инфракрасной – тепло. Оказалось, что используются и ультрафиолетовые компоненты солнечного диапазона и, в частности, при фотохимическом синтезе витамина D, важнейшего регулятора обмена кальция и фосфора в организме. Предшественники витамина D, такие как 7,8-дегидрохолестерин, эргостерин и другие, поступающие в организм с пищей, выносятся на поверхность кожи в составе секрета сальных желез – кожной смазки. Кванты УФИ в ходе инсоляции взаимодействуют с молекулами провитамина D. Полученный в результате фотохимического преобразования витамин D всасывается обратно в кровь.

Дефицит витамина D в организме приводит к развитию рахита в детском возрасте и остеомалации (уменьшению содержания кальция в костной ткани) во взрослом организме. Характерными симптомами нарушения минерального обмена являются повышенная утомляемость, головные боли, повышение заболеваемости простудными и другими воспалительными заболеваниями. Наиболее физиологический метод профилактики и лечения этих состояний – инсоляция, а также освещение эритемными лампами совместно с приемом препаратов – витамина D или богатых им продуктов. В то же время дефицит УФ облучения, наблюдаемый у жителей крайнего Севера, зимовщиков и, периодически (в зимне-весенний период), у всех жителей умеренного географического пояса, в крупных городах с пониженной прозрачностью атмосферы для УФИ, проявляется не только в нарушениях минерального обмена и не устраняются полностью только назначением витамина D.

Этот синдром светового голодания означает, что физиологическая роль УФИ не ограничивается синтезом витамина D. Так, умеренное облучение кожи человека в дозах порядка 0,1-1,5 пороговых эритемных доз оказывает на весь организм неспецифическое стимули-

рующее действие. Увеличивается продукция и активность клеточных и гуморальных факторов иммунитета, сопротивляемость простудным и другим заболеваниям, интоксикациям, ускоряется заживление ран и срастание переломов. В физиологических дозах УФ стимулирует функции кроветворной, иммунокомпетентной и эндокринной систем организма. Предварительное УФ облучение повышает устойчивость к воздействию рентгеновских и гамма-лучей, т.е. радиорезистентность. На фоне иммунодепрессии, вызванной опухолевым процессом и лучевой терапией, стимулирующее действие профилактического курса УФ облучения проявляется в сокращении сроков заживления лучевых дерматитов и язв на 40-50%. Клинические испытания на больных раком кожи и нижней губы подтвердили высокую эффективность метода. Наблюдалось смягчение тяжести лучевых изменений и ускорение ликвидации последствий на 3-4 недели и хороший косметический эффект.

В основе общестимулирующего действия УФ заложено несколько механизмов. Во-первых, это нормализация минерального обмена и повышение барьерных свойств тканей, т.к. кальций уплотняет клеточные и сосудисто-тканевые мембраны. Во-вторых, стимуляция иммунокомпетентной системы и всей физиологической системы соединительной ткани. В-третьих, повышение реактивности и трофики органов и систем органов. Очевидно, УФ в физиологических дозах вызывает такую степень неспецифического раздражения, которая необходима для оптимальной жизнедеятельности организма. Естественно, что стимулирующее действие УФ максимально проявляется на фоне его недостаточности и выражается в резком повышении работоспособности, устойчивости к разнообразным вредным агентам, в нормализации повышенной или аллергической реактивности, в десенсибилизирующем эффекте. Поэтому применение УФ показано не только для профилактики и лечения рахита и синдрома светового голодания, но и во всех многочисленных случаях, когда необходимы стимуляция и нормализация иммунореактивности, мобилизация защитных сил и систем регуляции обмена веществ и гомеостаза в организме. Знание и целенаправленное использование УФ как физиологического стимулятора жизненных функций и мощного природного средства закаливания, повышения сопротивляемости и оптимизации жизнедеятельности организма уже дают и способны дать еще больший профилактический и лечебный эффект.

Обобщив в первой части обзора положительную роль УФ в регуляции разнообразных процессов в организме, перейдем к рассмотрению вопросов, связанных с механизмами повреждающего действия

УФИ на различные молекулярные и клеточные структуры, бактерицидного, мутагенного и канцерогенного действия. Поэтому вначале коротко остановимся на молекулярных основах биологического действия УФИ.

4.3.2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

УФИ, взаимодействуя с веществом, в том числе и органическим, часто вызывает его ионизацию, так называемый фотоэлектрический эффект. Однако в механизме биологического действия он не играет большой роли. Главное значение в биологическом эффекте УФИ имеет процесс возбуждения молекул. Поэтому УФИ и относят к неионизирующим излучениям. Длительность состояния электронного возбуждения составляет миллиардные доли секунды, и в дальнейшем энергия возбуждения целиком или частично переходит в тепловую энергию колебания и вращения атомов. Порция энергии, соответствующая разнице уровней основного и возбужденного состояния атома, отдается соседним атомам и молекулам малыми квантами дальнего ИКИ. Возбужденная молекула обладает запасом энергии, превышающим порог активации большинства химических реакций, в ходе которых эта энергия постепенно расходуется. Следовательно, именно фотохимический путь разрядки возбужденных электронных состояний играет решающую роль в механизме биологического действия УФИ. Нуклеиновые кислоты и белки непосредственно поглощают кванты УФИ с максимумами соответственно 260 нм и 280 нм. Фотосенсибилизаторы, такие как красители – эозин, акридин, флуоресцеин; каротиноиды, желчные пигменты, каменноугольная смола, деготь, канцерогенные вещества, хинин, соединения йода и т.д., поглощают свет в других участках спектра. Затем они передают эту энергию на молекулы биополимеров, вызывая их опосредованное поражение.

Молекулярные механизмы биологического действия УФИ могут быть разделены на три основные группы: изменение структуры и функции ДНК, фотоинактивация белков и повреждение биомембран. Эти процессы лежат в основе всех фото процессов, развивающихся на уровне клетки и организма. Коротко рассмотрим каждый из них.

Решающее значение в биологическом действии УФИ имеет его поглощение нуклеиновыми кислотами в области 240+290 нм. Хроматофорами служат азотистые основания ДНК, особенно пиримидино-

вые, которые поглощают УФ-И в 10-20 раз интенсивнее, чем хромофоры белковых молекул. Основным механизмом реализуется за счет фотолитза двойной связи между пятым и шестым атомами в молекулах близкорасположенных пиримидиновых оснований, что в конечном итоге приводит к образованию пиримидиновых димеров в молекуле ДНК. Наиболее фоточувствительны из пиримидиновых оснований молекулы тимина, образующие соответствующие димеры. Наряду с димерами в структуре ДНК под влиянием УФ-И возникают и другие фотопродукты: фото-гидраты пиримидинов, тиминовые гликоли, сшивки ДНК-белок. Наибольшее значение среди этих нарушений структуры ДНК и закодированной в ней генетической информации имеет образование циклобутановых димеров пиримидинов с замыканием ковалентных связей между основаниями, расположенными в одной цепи ДНК или в её комплементарных цепях. УФ-И - излучение может также вызывать одно- и двунитевые разрывы в молекуле ДНК. Однако для этого требуются дозы облучения на 3-4 порядка выше, чем при образовании димеров. Поэтому считается, что в механизме биологического действия УФ-И - излучения в отличие от ионизирующей радиации, этот механизм серьезного значения не имеет. Сшивки ДНК-белок образуются между пиримидиновыми основаниями ДНК и сульфидными и/или гидроксильными группами аминокислот. Фотолитз двойной связи между пятым и шестым атомами в тимине и урациле приводит к образованию их сшивок с такими аминокислотами как цистин, лизин, аргинин.

В механизме фотоинактивации белков ведущая роль принадлежит белковым хромофорам. Это остатки ароматических (триптофан, тирозин, фенилаланин), гетероциклических (гистидин) и серосодержащих (цистин) аминокислот. Триптофан поглощает УФ-И с максимумами при 220 нм и 280 нм, а флуоресцирует в зависимости от микроокружения в белках при 328–350 нм. Тирозин поглощает УФ-И при 222 нм и 275 нм, а флуоресцирует при 303 нм, фенилаланин – соответственно при 258 нм и 282 нм. Цистин монотонно поглощает излучение в области 200–300 нм и не флуоресцирует. Решающее значение в повреждающем воздействии УФ-И - излучения играет положение этих аминокислот. Деструкция аминокислотных остатков, входящих в активный центр белка или влияющих на их конформацию, будет в конечном итоге приводить к потере функциональной активности данного белка. Наиболее чувствительными в этом плане являются триптофан и цистин. Поглощенная остатками тирозина, фенилаланина, гистидина и цистина энергия света способна мигрировать к триптофану, вызывая его деструкцию. В молекуле цистина при поглощении кванта УФ-И ди-

сульфидная связь восстанавливается до тиоловых групп цистеина. Разрыв дисульфидных мостиков нарушает конформацию и инактивирует белки.

Особого внимания заслуживает действие УФИ на биологические мембраны. Фото-повреждения белков и фосфолипидов, входящих в их состав, взаимосвязаны и нередко усиливают друг друга. Фотоокисление липидов представляет собой двухэтапный, двух-вантовый процесс. На первом этапе липиды под действием ультрафиолета окисляются по свободно радикальному механизму с образованием гидроперекисей. На второй стадии при поглощении второго кванта УФИ перекиси расщепляются с образованием стабильных продуктов, и, прежде всего, альдегидов. Хроматофорами и инициаторами окисления служат порфирины и рибофлавин, а также остатки аминокислоты триптофана в составе мембранных белков, с которых поглощенная энергия передается на липиды. Присутствующие в мембранах жирорастворимые антиоксиданты, такие как токоферолы, ингибируют окисление, но сами при этом подвергаются фото-деструкции. Повреждение фосфолипидов биомембран будет усиливать инактивацию мембранных белков-ферментов, вызванную действием УФИ, приводить к разобщению окисления и фосфорилирования и, следовательно, подавлять синтез АТФ, повышать проницаемость мембран для различных низкомолекулярных соединений, ионов и т.д.. Находящиеся в мембранах витамины, антиоксиданты и другие биологически активные вещества также окисляются под действием ультрафиолета и теряют свою активность.

Прежде чем перейти к рассмотрению механизмов биологического действия УФИ на клеточном уровне, необходимо сказать несколько слов о деятельности внутриклеточных систем репарации, биологической ролью которых является устранение повреждений структуры ДНК, возникающих под влиянием разнообразных агентов. Именно деятельность этих систем ограничивает реализацию механизмов повреждения клетки под действием не только УФИ, но и радиации и химических мутагенов. Однако, первый из открытых механизмов репарации – фото-реактивация – полностью направлен против димеров пиримидинов – основных повреждений, индуцированных УФИ в ДНК. Фото-реактивация, как и репарация в целом, это ферментативный процесс. Фермент ДНК – фотолиаза в темноте перемещается вдоль молекулы ДНК, отыскивает димер и фиксируется около него. При облучении сине-фиолетовым светом или действием ближнего УФ света (310 ÷ 480 нм) фотолиаза использует энергию этого света и восстанавливает исходную структуру ДНК, мономеризуя димеры. Поэтому ослабление

любого биологического эффекта УФИ при последующем освещении видимым светом рассматривается как доказательство участия в этом эффекте димеров как непосредственных продуктов воздействия УФИ.

Другие системы репарации, имеющиеся в клетке, менее специфичны, чем фотореактация, не нуждаются в свете и, наряду с димерами, способны устранять и другие изменения структуры ДНК. Существование репаративных систем обеспечивает генетическую стабильность ДНК и представляет собой важнейший механизм относительной стабильности органических видов.

Возникновение при воздействии УФИ молекулярных повреждений ДНК, не устраняемых или устраняемых не полностью репаративными системами клетки, также фото-деструкция белков и биологических мембран обуславливает развитие многочисленных биологических эффектов.

Максимальной бактерицидной активностью обладает УФИ с длиной волны от 254 нм до 265 нм, т.е. в области максимума поглощения нуклеиновыми кислотами. Однако и фотоинaktivация белков, и недимерные повреждения ДНК вносят значительный вклад в механизм летального эффекта. Так, в спорах микроорганизмов, обладающих большой устойчивостью к УФИ, димеры практически не образуются, т.к. молекулы частично обезвоженной ДНК упакованы в спорах особым образом, препятствующим замыканию цикло-бутановых связей димеров. Поэтому основным фото-продуктом в спорах считается нерепарируемое в ходе фото-реактивации производное тимина – 5-тиминил-5,6-дигидротимин.

Таким образом, в механизме биологического действия экологического УФИ доминирует повреждение белков и мембран клетки, менее репарируемое, чем повреждение ДНК. В то же время, это излучение на 3 – 5 порядков менее эффективно, чем УФИ в области 240 – 290 нм. В эффекте экологического УФИ важная роль принадлежит фотолизу мембранных антиоксидантов – токоферолов. Это приводит к активации свободно-радикального окисления липидов и вторичному поражению белков и нуклеиновых кислот продуктами перекисного окисления. С другой стороны, эндогенные фотосенсибилизаторы (остатки триптофана) могут способствовать образованию сшивок ДНК – белок и других фото-продуктов. Экологическое УФИ вносит большой вклад в бактерицидное действие естественной солнечной радиации.

4.3.3. ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

В заключительном пункте рассмотрим действие УФИ на человека. Его особенности для млекопитающих и человека обусловлены, с одной стороны, принципиальной идентичностью фотохимических процессов, протекающих в клетках прокариотов и эукариотов, а с другой – относительно низкой проникающей способностью УФИ. Поэтому все основные проявления УФИ развиваются в покровных тканях млекопитающих – эпителии роговицы и конъюнктивы глаза и эпидермисе кожи. Также оказалось, что видимый свет в 1,8 раза ослабляет развитие эритемы кожи человека под действием УФИ. Следовательно, большая часть фото-повреждений клеток млекопитающих и человека, как и летальный эффект у микроорганизмов, подвержены репарации за счет фото-реактивации и имеют своей основой индукцию образования димеров в ДНК клеточных ядер под действием УФИ.

Длинноволновое УФИ обладает большей проникающей способностью, чем коротковолновое, и в больших дозах при многократном воздействии вызывает дегенеративные изменения и снижение прозрачности эпителия передней стенки хрусталика, вплоть до образования катаракты. Оказалось, что после удаления хрусталика при катаракте пациенты могут видеть УФИ в области 300 – 400 нм, в норме поглощаемое хрусталиком.

УФ эритема – это, в сущности, асептическое воспаление, развивающееся вследствие гибели клеток шиповидного и, в меньшей степени, базального слоев эпидермиса. Она проявляется в виде локальной гиперемии, припухлости, гипертермии и легкой болезненности. При более высоких дозах возникает отек кожи с образованием волдырей (II степень) и даже некрозов (III степень). Самый наружный, роговой слой эпидермиса толщиной 0,03 мм состоит из омертвевших клеток, которые постепенно отслаиваются наружу и слущиваются. Он выполняет барьерную функцию, поглощая коротковолновое УФИ, в том числе и в области нуклеинового пика. Лишь длинноволновое УФИ с максимумом действия 297 нм достигает жизнеспособных и делящихся клеток эпидермиса, оказывая на них летальное действие и вызывая тем самым утолщение рогового слоя. Коротковолновое УФИ вносит свой вклад в развитие эритемной реакции опосредованно, за счет фотохимического образования в клетках рогового слоя гистамина, радикалов, перекисей и других активных продуктов. Генерализация первоначально местного процесса обусловлена поступлением в кровь и лимфу продуктов рас-

пада клеток, перекисного окисления их компонентов, а также биологически активных веществ – гистамина, комплекса лизосомальных протеаз и нуклеаз, серотонина, гепарина, катехоламинов и других продуктов активации тучных клеток. Это приводит к раздражению нервных окончаний и развитию рефлекторных сосудистых реакций. В биологическом действии УФВ эритема – не только одно из важнейших локальных проявлений действия ультрафиолета, но и источник гуморальных и нервных влияний на весь организм.

Основная защитная реакция кожи на многократное УФВ облучение у белокожих европеоидов – реактивное утолщение рогового слоя эпидермиса и усиленная пролиферация клеток, расположенных более глубоко. Хроническое облучение ультрафиолетом сопровождается утолщением кожи, ее огрублением и постарением, развитием так называемого актинического кератоза, телеангиэктазий, келоидных рубцов на месте ожога, лейкоплакий и со временем у части лиц базиолом и плоскоклеточного рака кожи.

Существенные индивидуальные (врожденные и приобретенные), этнические и расовые различия в степени пигментированности кожи обуславливают и значительные различия в фото-резистентности. Пигментация, несомненно, имеет приспособительное значение для популяций, проживающих в районах с высоким уровнем инсоляции. У негроидов толщина рогового слоя такая же, как и у белокожих европеоидов. Повышенная фото-резистентность лиц черной расы обусловлена, прежде всего, высокой их пигментированностью. Кроме того, у них развит аппарат кожного потоотделения. Присутствие в составе пота урокапиновой кислоты, образующейся из гистамина в роговом слое облученной кожи, обеспечивает дополнительное экранирование кожи от УФВ. Среди европеоидов наибольшей фото-чувствительностью характеризуются ирландцы и скандинавы, лица с рыжей окраской волос, голубыми глазами и белой, склонной к образованию веснушек кожей.

Индукция УФВ молекулярных повреждений структуры и функций ДНК и генетического механизма клеток в целом создает предпосылки для мутагенеза. Мутагенез, индуцированный УФВ и другими физическими и химическими агентами, идет при участии ферментов репарации и возникает вследствие ее ошибок. За счет низкой проникающей способности УФВ сфера его мутагенных возможностей ограничивается вирусами, микроорганизмами, простейшими, пылью растений, яйцами насекомых и т.д. УФВ мутагенез успешно используется в промышленности антибиотиков, ферментов, аминокислот для получения и последующего отбора и культивирования наиболее высокопро-

изводительных штаммов микроорганизмов – производителей биологически активных веществ.

Применительно к человеку, мутагенная активность УФФИ выражается в индукции соматических мутаций в клетках кожи. Существуют многочисленные эпидемиологические и экспериментальные доказательства канцерогенного действия УФФИ.

Получены подтверждения связи с инсоляцией также этиологии злокачественной меланомы. Предполагают, что в этиологии меланомы УФФИ выступает в роли коканцерогена, взаимодействующего с химическими канцерогенами и вызывающими развитие опухоли.

Большое значение в росте заболеваемости меланомой и раком кожи имеет техногенное разрушение озонового слоя атмосферы. Оно может иметь длительные и серьезные последствия, т.к. расчеты показывают, что при снижении количества озона на 1 % интенсивность УФФИ возрастает на 2%, а заболеваемость раком кожи на 8%.

В механизме канцерогенного действия УФФИ решающее значение имеет, очевидно, прямое его поглощение ДНК ядер клеток кожи. Это приводит к образованию типичных молекулярных фото-продуктов и, прежде всего, димеров. Наблюдаемый факт фото-реактивации УФ канцерогенеза подтверждает участие димеров в его механизме. Дефектность систем репарации при некоторых наследственных заболеваниях также сопровождается повышенной заболеваемостью – опухолями кожи. Но рак кожи возникает не только у лиц с наследственными дефектами репаративных систем, но и при длительной и интенсивной инсоляции [4.5].

По-видимому, реализация канцерогенного действия УФФИ возможна несколькими путями. Один из них, на наш взгляд самый существенный и аргументированный, связан с прямым мутагенным воздействием на ДНК-матрицу. С другой стороны, УФФИ как важный фактор природной среды может оказывать канцерогенное и/или коканцерогенное действие в комбинации с другими агентами – онкогенными вирусами, химическими канцерогенами.

4.4. НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гигиеническое нормирование УФФИ в производственных помещениях осуществляется по СН 4557-88 “Санитарные нормы УФФИ в производственных помещениях”, которые устанавливают допустимые плотности потока излучения в зависимости от длин волн при условии защиты органов зрения и кожи [4.2, 4.6, 4.7, 4.9].

Допустимая интенсивность УФИ для работающих при наличии незащищенных участков поверхности кожи – не более $0,2 \text{ м}^2$ (лицо, шея, кисти рук) общей продолжительностью воздействия 50% времени рабочей смены и длительности однократного облучения свыше 5 мин не должна превышать 10 Вт/м^2 для области УФА- и $0,01 \text{ Вт/м}^2$ – для области УФВ-облучения. УФС-облучение при таких условиях не допускается.

При использовании спецодежды и средств защиты лица и рук допустимая интенсивность облучения в областях УФВ и УФС не должна превышать 1 Вт/м^2 . Нормируемым параметром УФИ является допустимая плотность потока излучения $W_{\text{н}}^{\text{УФ}}$, Вт/м^2 .

Основным нормативным документом является СН 4557-88. Согласно нормативного документа, облучение УФИ при однократном воздействии в течение 5 мин и суммарном воздействии не более 4 ч должно составлять [4.8]:

при УФА $W_{\text{н}}^{\text{УФ}} \leq 10 \text{ Вт/м}^2$;

при УФВ $W_{\text{н}}^{\text{УФ}} \leq 0,01 \text{ Вт/м}^2$;

при УФС $W_{\text{н}}^{\text{УФ}} \leq 1 \text{ Вт/м}^2$ при обязательном использовании специальной одежды и средств защиты лица и рук.

1. Общие положения

1.1. СН 4557-88 устанавливают допустимые величины УФИ на постоянных и непостоянных рабочих местах (облученность) от производственных источников с учетом спектрального состава излучения для областей: длинноволновой - 400 – 315 нм - УФА; средневолновой - 315 – 280 нм - УФВ; коротковолновой - 280 – 200 нм - УФС и содержат требования к методам контроля и оценки.

1.2. Нормативы распространяются на излучение, создаваемое источниками, имеющими температуру выше $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ (электрические дуги, плазма, расплавленный металл, кварцевое стекло и т.п.), люминесцентными источниками, используемыми в полиграфии, химическом и деревообрабатывающем производстве, сельском хозяйстве, при кино- и телесъемках, дефектоскопии и других отраслях производства, а также в здравоохранении.

1.3. Нормативы не распространяются на УФИ, генерируемое лазерами, используемое для обеззараживания сред при отсутствии обслуживающего персонала, а также применяемое в лечебных и профилактических целях.

1.4. Нормативы интенсивности излучения установлены с учетом продолжительности воздействия на работающих, обязательного ноше-

ния спецодежды, защищающей от излучения, головных уборов и использования средств защиты глаз (ГОСТ 12.4.080-79 "ССБТ. Светофильтры стеклянные для защиты глаз от вредных излучений на производстве").

2. Допустимые интенсивности УФ.

2.1.1. Допустимая интенсивность облучения работающих при наличии незащищенных участков поверхности кожи не более $0,2 \text{ м}^2$ и периода облучения до 5 мин, длительности пауз между ними не менее 30 мин и общей продолжительности воздействия за смену до 60 мин - не должна превышать: $50,0 \text{ Вт/м}^2$ - для области УФ-А; $0,05 \text{ Вт/м}^2$ - для области УФ-В; $0,001 \text{ Вт/м}^2$ - для области УФ-С.

2.1.2. Допустимая интенсивность УФ облучения работающих при наличии незащищенных участков поверхности кожи не более $0,2 \text{ м}^2$ (лицо, шея, кисти рук и др.), общей продолжительности воздействия излучения 50% рабочей смены и длительность однократного облучения свыше 5 мин и более не должна превышать [4.10]: $10,0 \text{ Вт/м}^2$ - для области УФ-А; $0,01 \text{ Вт/м}^2$ - для области УФ-В.

Излучение в области УФ-С при указанной продолжительности не допускается.

2.2. При использовании специальной одежды и средств защиты лица и рук, не пропускающих излучение (спилк, кожа, ткани с пленочным покрытием и т.п.), допустимая интенсивность облучения в области УФ-В + УФ-С (200 – 315 нм) не должна превышать 1 Вт/м^2 [4.11].

2.3. В случае превышения допустимых интенсивностей облучения, приведенных в разд. 2, должны быть предусмотрены мероприятия по уменьшению интенсивности излучения источника или защите рабочего места от облучения (экранирование), а также по дополнительной защите кожных покровов работающих.

3. Требования к методам контроля интенсивности УФ.

3.1. Интенсивность облучения работающих должна измеряться на постоянных и непостоянных рабочих местах, периодически, не реже 1 раза в год в порядке текущего санитарного надзора, а также при приемке в эксплуатацию нового оборудования и технологии при внесении технических изменений в конструкцию действующего оборудования, при организации новых рабочих мест.

3.2. Измерения следует производить на рабочем месте на высоте 0,5 - 1,0 и 1,5 м от пола, размещая приемник перпендикулярно максимуму излучения источника. При наличии нескольких источников сле-

дует проводить аналогичные измерения от каждого из них или через каждые 45 по окружности в горизонтальной плоскости.

3.3. Для измерения интенсивности излучения следует использовать приборы типа спектрометрических с известной спектральной чувствительностью. Погрешность измерений не должна превышать 10%.

3.4. При оценке результатов измерений следует исходить из того, что интенсивность облучения работающих в любой точке рабочей зоны не должна превышать допустимых величин, указанных в разделе 2.

ГЛАВА 5. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

5.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лазеры или *оптические квантовые генераторы* – это источники когерентного излучения, обладающие рядом уникальных свойств. Создание лазеров привело к значительным изменениям во разных областях науки и техники. Уже сейчас создано большое количество лазеров с различными характеристиками, излучающих свет в различных оптических диапазонах. Лазеры работают как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться от долей милливатта до 10^{12} – 10^{13} Вт (в импульсном режиме). Лазеры находят широкое применение во всех областях промышленной и военной техники.

В лазерах используется новый метод усиления и генерации электромагнитных колебаний при помощи вынужденного излучения квантовых систем. В создании лазеров определяющую роль сыграли работы русских ученых под руководством Н. Г. Басова и А. М. Прохорова и американских под руководством Ч. Таунса [5.1, 5.2].

5.2. ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С практической точки зрения, лазеры классифицируют по типу активного материала, по способу питания, длине волны и мощности генерируемого излучения.

Активной средой может быть газ, жидкость или твердое тело. Формы активной среды также могут быть различными. Чаще всего для газовых лазеров используются стеклянные или металлические цилиндры, заполненные одним или несколькими газами. Примерно так же обстоит дело и с жидкими активными средами, хотя часто встречаются прямоугольные кюветы из стекла или кварца. Жидкостные лазеры - это лазеры, в которых активной средой являются растворы определенных соединений органических красителей в жидком растворителе (воде, этиловом или метиловом спиртах и т.п.).

В газовых лазерах активной средой являются различные газы, их смеси или пары металлов. Эти лазеры разделяются на газоразрядные, газодинамические и химические. В газоразрядных лазерах возбуждение осуществляется электрическим разрядом в газе, в газодинамических - используется быстрое охлаждение при расширении предварительно нагретой газовой смеси, а в химических — активная среда воз-

буждается за счет энергии, освобождающейся при химических реакциях компонентов среды. Спектральный диапазон газовых лазеров значительно шире, чем у всех остальных типов лазеров. Он перекрывает область от 150 нм до 600 мкм. Эти лазеры имеют высокую стабильность параметров излучения по сравнению с другими типами лазеров.

Лазеры на твердых телах имеют активную среду в форме цилиндрического или прямоугольного стержня. Таким стержнем чаще всего является специальный синтетический кристалл, например рубин, александрит, гранат или стекло с примесями соответствующего элемента, например эрбия, гольмия, неодима.

Разновидностью активного материала в виде твердого тела являются также полупроводники. В последнее время (благодаря своей малым габаритам и экономичности полупроводящих материалов) полупроводниковая промышленность бурно развивается. Поэтому бурно развиваются и полупроводниковые лазеры.

По типу активного материала выделяют: газовые; жидкостные; на твердом теле (твердотельные) и полупроводниковые лазеры.

Тип активного материала определяет длину волны генерируемого излучения. Различные химические элементы в разных матрицах позволяют выделить в настоящее время более 6000 разновидностей лазеров. Они генерируют излучение от области так называемого вакуумного ультрафиолета (157 нм), включая видимую область (385-760 нм), до дальнего инфракрасного (> 300 мкм) диапазона. Все чаще понятие «лазер», вначале данное для видимой области спектра, переносится также на другие области спектра (табл. 5.1). Например, для более коротковолнового излучения, чем инфракрасное, используется понятие «рентгеновские лазеры», а для более длинноволнового, чем ультрафиолетовое, - понятие «лазеры, генерирующие миллиметровые волны»

В газовых лазерах используется газ или смесь газов в трубе. В большинстве газовых лазеров используется смесь гелия и неона (HeNe), с первичным выходным сигналом в 632,8 нм видимого красного цвета. Все газовые лазеры довольно похожи по конструкции и свойствам [5.3]. Например, CO_2 - газовый лазер излучает длину волны 10,6 мкм в дальней инфракрасной области спектра. Аргоновый и криптоновый газовые лазеры работают с кратной частотой, излучая преимущественно в видимой части спектра. Основные длины волн излучения аргонного лазера - 488 и 514 нм.

Таблица 5.1

Тип лазера	Агрегатное сос-тояние активного вещества	Длина волны, нм	Диапазон излучения
СО	Газ	10600	Инфракрасный
YAG:Er YSGG:Er YAG:Ho YAG:Nd	Твердое тело	2940 2790 2140 1064/1320	Инфракрасный
Полупроводниковый, например арсенид галлия	Твердое тело (полупроводник)	635-1500 904	От видимого до инфракрасного
Рубиновый	Твердое тело	694	Видимый
Гелий-неоновый (He-Ne)	Газ	540 632,8 1150	Зеленый, ярко-красный, инфракрасный
На красителях	Жидкость	350-950 (пере-страиваемая)	Ультрафиолет – инфракрасный
На парах золота	Газ	628,3	Красный
На парах меди	Газ	511/578	Зеленый/желтый
Аргоновый	Газ	488 515	Голубой,зеленый
Эксимерный: ArF KrF XeCl XeF	Газ	193 249 308 351	Ультрафиолет

Твердотельные лазеры используют лазерное вещество, распределенное в твердой матрице. Одним из примеров является неодим-лазер. Этот лазер излучает инфракрасный луч с длиной волны 1,064 мкм. Вспомогательные устройства, которые могут быть как внутренними, так и внешними по отношению к резонатору, могут использоваться для преобразования выходного луча в видимый или ультрафиолетовый диапазон. В качестве лазерных сред могут использоваться

различные кристаллы с разными концентрациями ионов-активаторов: эрбия (Er³⁺), гольмия (Ho³⁺), тулия (Tm³⁺).

В настоящее время в производстве лазеров в качестве активной среды используется свыше 200 видов полупроводниковых материалов (табл. 5.2) [5.4].

Таблица 5.2

Фирма, страна/модель	Средняя мощность, Вт	Радиус операционного поля, м	Минимальный размер пятна на ткани, мкм	Потребляемая мощность, Вт
Coherent. США/ Ultrapulse 5000c	0,05-100	1,8	300	3500
Sharplan. Израиль/40C	1-40	1,2	160	960
ДЕКА. Италия/Smartoffice	1-20	1,2	300	1000
Mattioli. Италия/Eagle 20	1-20	1,3	200	750
Lasering. Италия/Slim	0,2-20	1,3	200	600
КБП. Россия/Ланцет-2	0,1-20	1,2	200	600
НИС. Япония/НИС 15	1-15	0,4	100	480

5.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Степень того или иного воздействия зависит от вида лазерного излучения (ЛИ) и биологического материала (коэффициента поглощения, коэффициента рассеяния, плотности и т. д.), на которое оно направлено.

Воздействие ЛИ на биологические ткани зависит от: плотности энергии; продолжительности облучения, количества охлаждения; определенной длины волны, режима облучения; частоты повторения; характеристик ткани.

Потери из-за тепловой проводимости малы, если длительность импульса очень коротка, но они могут быть существенны при более длинных импульсах. Этот эффект может стать значительным в результате поглощения излучения в плазме, образованной испаренным веществом на целевой поверхности. Переизлучение от целевой поверхности обычно незначительно.

Высокий коэффициент термодиффузии обычно дает возможность более глубокого проникновения фронта плавления без теплового удара или растрескивания. Высокое значение коэффициента термодиффузии может также вызывать проблемы, быстро отводя тепло от поверхности. Это может привести к уменьшению глубины плавления.

Данные экспериментальных и клиничко-физиологических исследований свидетельствуют о превалирующем значении общих неспецифических реакций организма в ответ на хроническое воздействие низкоэнергетических уровней ЛИ по сравнению с местными локальными изменениями со стороны органа зрения и кожи. При этом ЛИ видимой области спектра вызывает сдвиги в функционировании эндокринной и иммунной систем, центральной и периферической нервной системы, белкового, углеводного и липидного обменов. ЛИ с длиной волны 0,514 мкм приводит к изменениям в деятельности симпатoadреналовых и гипofиз-надпочечниковых систем. Длительное хроническое действие ЛИ длиной волны 1,06 мкм вызывает вегетососудистые нарушения. Практически все исследователи, изучавшие состояние здоровья лиц, обслуживающих лазеры, подчеркивают более высокую частоту обнаружения у них астенических и вегетативно-сосудистых расстройств. Следовательно, низкоэнергетическое ЛИ при хроническом действии выступает как фактор риска развития патологии, что и определяет необходимость учета этого фактора в гигиенических нормативах.

Неоднородная слоистая структура кожи, а также ее состав, в котором доминируют белки, вода и меланин, обуславливают сильное рассеяние и поглощение. Основное ослабление света происходит на глубине залегания трех слоев кожи. Наибольшей глубины проникновения достигает излучение в красной и ИК-области спектра. При этом только 5-20 % поглощенной энергии приходится на подкожную клетчатку, остальная ее значительная часть отражается поверхностью кожи и/или слизистых оболочек. С одной стороны, все это обеспечивает возможность использования лазера как эффективного хирургического ножа или эффективного точного устройства для лечения отслоения сетчатки глаза, кариеса, доброкачественных и злокачественных новообразований (невусы, очаги меланомы, базилиома и другие опухоли и

ткани). С другой стороны, в биостимуляции и лазерной акупунктуре применением лазера (низкоинтенсивного) можно результативно практически в реальном времени на принципе обратной связи (диагностика по месту лечения) диагностировать и стимулировать позитивные энергетические и физиологические процессы (реабилитация). Сфокусированный свет лазера может быть опасен только для глаз и кожи (критические органы).

5.4. НОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Научно обоснованы два подхода к нормированию ЛИ: первый - по повреждающим эффектам тканей или органов, возникающим непосредственно в месте облучения; второй - на основе выявляемых функциональных и морфологических изменений ряда систем и органов, не подвергающихся непосредственному воздействию [5.5, 5.6].

Гигиеническое нормирование основывается на критериях биологического действия, обусловленного в первую очередь областью электромагнитного спектра. В соответствии с этим диапазон ЛИ разделен на ряд областей: от 0,18 до 0,38 мкм - ультрафиолетовая область; от 0,38 до 0,75 мкм - видимая область; от 0,75 до 1,4 мкм - ближняя инфракрасная область; свыше 1,4 мкм - дальняя инфракрасная область.

В основу установления величины ПДУ положен принцип определения минимальных «пороговых» повреждений в облучаемых тканях (сетчатка, роговица глаза, кожа), обнаруживаемых современными методами исследования во время или после воздействия ЛИ. Нормируемыми параметрами являются энергетическая экспозиция H ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$) и облученность E ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$), а также энергия W (Дж) и мощность P (Вт).

Первые ПДУ ЛИ в России для отдельных длин волн были установлены в 1972 г., а в 1981 г. введены в действие первые санитарные нормы и правила [5.7]. В США существует стандарт ANSI - Z 136. Разработан также стандарт Международной электротехнической комиссии (МЭК) - публикация 825. Отличительной особенностью отечественного документа по сравнению с зарубежными является регламентация значений ПДУ с учетом не только повреждающих эффектов глаз и кожи, но и функциональных изменений в организме.

Широкий диапазон длин волн, разнообразие параметров ЛИ и вызываемых биологических эффектов затрудняют задачу обоснования гигиенических нормативов. К тому же экспериментальная и особенно клиническая проверка требуют длительного времени и средств. Поэтому для решения задач по уточнению и разработке ПДУ ЛИ используют

математическое моделирование. Это позволяет существенно уменьшить объем экспериментальных исследований на лабораторных животных. При создании математических моделей учитываются характер распределения энергии и абсорбционные характеристики облучаемой ткани.

Метод математического моделирования основных физических процессов (термический и гидродинамические эффекты, лазерный пробой и др.), приводящих к деструкции тканей глазного дна при воздействии ЛИ видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с длительностью импульсов от 1 до 10^{-12} с, был использован при определении и уточнении ПДУ ЛИ, вошедших в последнюю редакцию «Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров» СНиП № 5804-91, которые разработаны на основании результатов научных исследований и учета основных положений следующих документов:

- Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров № 2392-81.

- Стандарт Международной электротехнической комиссии (МЭК), публикация 825, издание первое, 1984 - «Радиационная безопасность лазерных изделий, классификация оборудования, требования и руководство для потребителей».

- Изменения к стандарту МЭК, публикация 825 (1987).

Действующие правила устанавливают: предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения в диапазоне длин волн 180—10,6 мкм при различных условиях воздействия на человека; классификацию лазеров по степени опасности генерируемого ими излучения; требования к производственным помещениям, размещению оборудования и организации рабочих мест; требования к персоналу; контроль состояния производственной среды; требования к применению средств защиты; требования к медицинскому контролю.

РАЗДЕЛ II. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Человек и все живые организмы на Земле постоянно подвергаются воздействию ионизирующего излучения естественного фона космического и земного происхождения. Ионизирующее излучение со времени образования Вселенной постоянно наполняет космическое пространство, а в состав Земли с самого ее рождения вошли радиоактивные материалы. Даже человек слегка радиоактивен, так как радиоактивные вещества присутствуют во всякой живой ткани.

На поверхности Земли дозы от космического излучения невелики, так как нас защищает слой воздуха (атмосфера) толщиной примерно 1 кг/см^2 , что эквивалентно около 130 см железа. С увеличением высоты над уровнем моря уровень облучения повышается. Например, на высоте 20 км он примерно в 400 раз больше по сравнению с уровнем моря. В ближнем космосе вокруг Земли существует радиационный пояс, где уровень облучения повышается еще в десятки и сотни раз.

Развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников ионизирующего излучения практически во все сферы человеческой деятельности наряду с несомненной практической пользой создают потенциальную угрозу радиационной опасности. Опасность исходит не только от работающих установок. По данным МАГАТЭ на февраль 2009 г., в мире работало 436 и строилось 44 энергетических ядерных реактора. Атомные электростанции производят почти 16 % мировой электроэнергии. Блоки АЭС, которые отработали свой ресурс, необходимо демонтировать и хранить под надежной защитой, так как в их материалах большая наведенная активность. Отработанное горючее АЭС также представляет большую радиационную опасность и подлежит специальному захоронению.

Со времени открытия рентгеновских лучей в 1895 г. и радиоактивности в 1896 г. ионизирующие излучения играют огромную роль как в развитии современной физики, так и в смежных с ней областях науки. Этот гибкий инструмент обладает рядом характерных свойств, одним из которых является проникающая способность: излучение может проходить через вещество, причем некоторые виды излучения при малой потере энергии могут проникать на значительные расстояния.

Приведем некоторые примеры применения источников ионизирующего излучения в жизни общества:

- радиоактивные индикаторы применяются в металлургии, с их помощью регулируют процесс затвердевания чугуна и стали, контролируют износ внутренней поверхности доменных печей, измеряют толщину листа при прокатке;

- в химической промышленности ионизирующее излучение применяется для измерения и контроля уровня жидких и сыпучих материалов, для измерения плотности растворов, для определения содержания компонентов в продукте, измерения толщины стенок технологического оборудования, работающего под большим давлением, для стерилизации продукции на химико-фармацевтических заводах;

- большое развитие получила радиационная химия, в которой с помощью ионизирующих излучений получают новые материалы с необходимыми свойствами (в том числе и для атомной техники), стимулируют и инициируют различные химические реакции (например, радиационное сшивание полимерных материалов), изучают воздействие ионизирующих излучений на химические вещества и процессы;

- радиоактивные методы анализа чистоты материалов позволяют определить содержание примесей в количествах (10^{-6} - 10^{-8}) %;

- радиоизотопные источники энергии малой мощности (атомные батареи) широко применяются для получения электрической энергии в космосе, а также для различных автономных систем в отдаленных, труднодоступных местах (например, навигационное оборудование), где использование других источников энергии либо невозможно, либо нерентабельно;

- в медицине атомные батареи применяются для снабжения энергией сердечных регуляторов;

- в промышленности используются радиоизотопные нейтронизаторы статического электричества - текстильная промышленность, взрывоопасные производства;

- очень важный путь применения ионизирующего излучения - радиационная дефектоскопия, и томография различных изделий промышленных производств.

Проблема защиты от ионизирующих излучений, а в более общем плане - проблема радиационной безопасности, превратилась в одну из социальных проблем современности, решением которой занимаются многие международные, национальные и региональные организации. Надежная защита должна окружать все работающие установки. При этом необходимо отметить, что вопросы защиты от излучений охватывают очень обширную область. Это защита реакторов, ускорителей, изотопных и медицинских установок, защита при захоронении отхо-

дов, защита летательных аппаратов, защита передвижных установок и т. д.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И КОНСТАНТЫ

Z_1 - величина заряда налетающей частицы;

Z_2 - величина заряда ядер атомов вещества;

A - масса атомов вещества; масса 1 моля при определении n_0 ;

e - элементарный заряд; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл;

N_A - число Авогадро; $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ л/моль;

ρ - плотность вещества, г/см³.

n_0 - число атомов в 1 см³ (плотность атомов); $n_0 = (N_A / A) \cdot \rho$;

m_e - масса покоя электрона; $m_e = 9,1085 \cdot 10^{-28}$ г;

\hbar - постоянная Планка, деленная на 2π : $\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж•с;

r_e - классический радиус электрона; $r_e = e^2 / m_e c^2 = 2,818 \cdot 10^{-13}$ см;

β - скорость частицы в единицах скорости света в вакууме c -

$c = 2,9979 \cdot 10^{10}$ см/с;

$m_e c^2$ - энергия покоя электрона; $m_e c^2 = 0,511$ МэВ;

A - активность радионуклида;

Γ - гамма-постоянная радионуклида;

σ - микроскопическое сечение взаимодействия, см²;

Σ - линейный коэффициент ослабления, л/см;

μ - массовый коэффициент ослабления, см²/г;

R_0 - средний пробег заряженной частицы в приближении непрерывного замедления;

a_0 - радиус первой боровской орбиты (боровский радиус атома водорода); $a_0 = \hbar^2 / m_e e^2 = 5,29 \cdot 10^{-9}$ см;

α - постоянная тонкой структуры; $\alpha = e^2 / \hbar c = 1 / 137,036$;

X_0 - радиационная единица длины;

$\hat{\lambda}_c$ - комптоновская длина волны электрона $= \hbar / m_e c = 3,86 \cdot 10^{-11}$ см;

а. е. м., - атомная единица массы $= 1,66 \cdot 10^{-24}$ г, 1 а. е. м. $\cdot c^2 = 931,494$ МэВ;

D, \dot{D} - поглощенная доза, мощность поглощенной дозы;

H, \dot{H} - эквивалентная доза, мощность эквивалентной дозы;

E, \dot{E} - эффективная доза, мощность эффективной дозы;

K, \dot{K} - керма, мощность кермы;

X, \dot{X} экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы.

ГЛАВА 6. ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

6.1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Существуют два вида ионизирующих излучений: корпускулярное, состоящее из частиц с массой покоя, отличной от нуля (α , β и нейтронное излучение), и электромагнитное с очень малой длиной волны (γ и рентгеновское излучение).

Важнейшими характеристиками ионизирующих излучений является их проникающая и ионизирующая способность. Проникающая способность корпускулярных излучений определяется длиной пробега частицы в воздухе или других средах. Это наибольшее расстояние от источника излучения, на котором еще можно обнаружить частицу до ее поглощения веществом.

Длина пробега частицы зависит от заряда, массы, начальной энергии и среды, в которой происходит движение. С возрастанием начальной энергии частицы и уменьшением плотности среды длина пробега увеличивается. Если начальная энергия излучаемых частиц одинакова, то тяжелые частицы обладают меньшими скоростями, чем легкие.

Проникающая способность электромагнитного излучения зависит от длины волны и энергии фотона. Высокая энергия и малая длина волны обуславливают большую проникающую способность.

Ионизирующая способность излучений зависит от энергии частиц и скорости их движения. Если частицы движутся медленно, то их взаимодействие с атомами вещества среды более эффективно и частицы быстрее растрачивают имеющийся у них запас энергии.

α - Излучение представляет собой поток ядер гелия с массой 4 и зарядом +2, движущихся практически прямолинейно со скоростью примерно 15000 км/с. Энергия α - частиц не превышает нескольких МэВ. Они образуются при радиоактивном распаде ядер или при ядерных превращениях. В настоящее время известно более 120 искусственных и естественных α - радиоактивных ядер, которые, испуская α - частицу, теряют 2 протона и 2 нейтрона. Некоторые из α - излучате-

лей и их периоды полураспада: ^{238}U ($4,47 \times 10^9$ лет), ^{222}Rn (3,82 суток), ^{232}Th ($1,41 \times 10^{10}$ лет), ^{239}Pu (24 400 лет).

Длина пробега α - частиц в воздухе обычно менее 10 см. Так, например, α - частицы с энергией 4 МэВ обладают длиной пробега в воздухе примерно в 2,5 см. В воде или в мягких тканях человеческого тела, плотность которых более чем в 700 раз превышает плотность воздуха, длина пробега α - частиц составляет несколько десятков микрометров. За счет своей большой массы при взаимодействии с веществом α - частицы быстро теряют свою энергию. Это объясняет их низкую проникающую способность и высокую удельную ионизацию: при движении в воздушной среде α - частица на 1 см своего пути образует несколько десятков тысяч пар заряженных частиц – ионов.

α - Излучатели представляют огромную опасность для организма лишь в тех случаях, когда они попадают внутрь организма с пищей, напитками либо вдыхаемым воздухом, т. е. при внутреннем облучении.

β - Излучение представляет собой поток электронов или позитронов, возникающих при радиоактивном распаде. В настоящее время известно около 900 β - радиоактивных изотопов. Некоторые β - излучатели: ^{40}K ($1,18 \times 10^9$ лет), ^{137}Cs (30,2 года), тритий (12,3 года), ^{14}C (5730 лет), ^{131}I (8,07 суток).

Масса β - частиц в несколько десятков тысяч раз меньше массы α - частиц. В зависимости от природы источника β - излучений скорость этих частиц может лежать в пределах 0,3-0,99 скорости света. Энергия β - частиц не превышает нескольких МэВ, длина пробега в воздухе составляет приблизительно 1800 см, а в мягких тканях человеческого тела $\sim 2,5$ см. Проникающая способность β - частиц выше, чем α - частиц (из-за меньшей массы и заряда). Например, для полного поглощения потока β - частиц, обладающих максимальной энергией 2 МэВ, требуется защитный слой алюминия толщиной 3,5 мм.

β - Излучатели представляют особую опасность для человека, если они попали на кожу или поглощены организмом. Одна β - частица способна разорвать в живой ткани тысячи химических связей, но ионизирующая способность β - излучения ниже, чем α - излучения:

на 1 см пробега β - частиц в среде образуется несколько десятков пар заряженных ионов.

Нейтронное излучение образуется в результате различных ядерных превращений. Масса нейтрона приблизительно в 4 раза меньше массы α - частиц. В зависимости от энергии различают медленные нейтроны (с энергией менее 1 КэВ), нейтроны промежуточных энергий (от 1 до 500 КэВ) и быстрые нейтроны (от 500 КэВ до 20 МэВ). Среди медленных нейтронов различают тепловые нейтроны с энергией менее 0,2 эВ. Тепловые нейтроны находятся по существу в состоянии термодинамического равновесия с тепловым движением атомов среды. Наиболее вероятная скорость движения таких нейтронов при комнатной температуре составляет 2200 м/с.

Проникающая способность нейтронов зависит от их энергии, но она существенно выше, чем у α или β - частиц. Так, длина пробега нейтронов промежуточных энергий составляет около 15 м в воздушной среде и 3 см в биологической ткани, аналогичные показатели для быстрых нейтронов – соответственно 120 м и 10 см. Причем свободные нейтроны радиоактивны и распадаются на протон и электрон ($T_{0,5} = 10,6$ мин.).

Таким образом, нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью и из всех видов корпускулярного излучения представляет для человека наибольшую опасность при внешнем облучении. Мощность нейтронного потока измеряется плотностью потока нейтронов (нейтр./см²·с).

γ - Излучение – самое коротковолновое электромагнитное излучение, занимающее весь диапазон частот более 3×10^{20} Гц, что соответствует длинам волн менее 10^{-12} м.

Источником γ - излучения является изменение энергетического состояния атомного ядра, а также ускорение свободных заряженных частиц. Оно возникает при радиоактивном распаде ядер, при взаимодействии быстрых заряженных частиц с веществом (тормозное излучение), а также при аннигиляции (электронно-позитронных пар и др.).

Высокая энергия (0,01-3 МэВ) и малая длина волны обуславливают большую проникающую способность γ -излучения. В воздухе γ -излучение способно распространяться на километры, в тканях – на несколько сантиметров. Оно проходит сквозь метровый слой бетона и слой свинца толщиной несколько сантиметров. γ - Лучи не отклоня-

ются в электрических и магнитных полях. Это излучение обладает меньшей ионизирующей способностью, чем α и β - излучение. Оно обуславливает, прежде всего, внешнюю радиационную нагрузку на организм.

В качестве примера определим длину волны γ - излучения с энергией 0,048 МэВ. Используя известное соотношение 1 эВ = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж, выразим энергию γ - излучения в джоулях [6.2]:

$$E = 0,048 \cdot 10^{-6} (\text{эВ}) \frac{1,602 \cdot 10^{-19} (\text{Дж})}{1(\text{эВ})} = 0,077 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Энергия γ - излучения определяется следующей формулой:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ где } h - \text{ постоянная планка } (h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}); \nu -$$

частота кванта электромагнитной энергии, Гц; c - скорость света ($\sim 3,00 \cdot 10^8$ м/с); λ - длина волны, м.

Отсюда длина волны

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{0,077 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} = 0,26 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,6 \text{ нм.}$$

Рентгеновские лучи - это электромагнитное излучение, возникающее в диапазоне частот 3×10^{16} - 3×10^{20} Гц с длиной волны 10^{-12} - 10^{-8} м. Они испускаются при торможении быстрых электронов в веществе и при переходах электронов с внешних электронных оболочек атома на внутренние.

Рентгеновское излучение может быть получено в специальных рентгеновских трубах, в ускорителях электронов, в среде, окружающей источник β - излучения, и др. Энергия его обычно не превышает 1 МэВ. Рентгеновское излучение, как и γ - излучение, обладает малой ионизирующей способностью и большой глубиной проникновения.

6.1.2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основную часть облучения население Земли получает от естественных источников радиоактивного излучения. Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излуче-

ния падают на ее поверхность из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре.

Человек подвергается облучению двумя путями. 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 воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним. Облучению от естественных источников радиации подвергается любой житель 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, где залегают радиоактивные породы, оказывается значительно выше среднего, а в других местах - соответственно ниже.

Доза облучения зависит, кроме того, от условий жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для приготовления пищи, открытых угольных жаровней, герметизация помещений и даже полеты на самолетах - все это сказывается на уровне 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 дают более 5/6 годовой эквивалентной дозы, получаемой населением в основном вследствие внутреннего облучения.

Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения. Рассмотрим вначале некоторые данные о внешнем облучении от источников космического происхождения.

Космические лучи. Естественный радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации. Космические лучи в основном приходят к нам из глубин Вселенной, но некоторая их часть рождается на Солнце во время солнечных вспышек. 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 падали невидимые космические лучи. Но одни участки земной поверхности более подвержены их действию, чем другие. Северный и Южный полюсы получают больше радиации, чем экваториальные области, из-за наличия у ЗемлиМП, отклоняющего заряженные частицы, из которых в основном и состоят космические лучи.

Сушественнее, однако, то, что уровень облучения растет с высотой, поскольку при этом над нами остается все меньше воздуха, иг-

рающего роль защитного экрана. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космических лучей эквивалентную дозу около 300 мкЗв/год; для людей же, живущих выше 2000 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 4000 м (максимальная высота, на которой расположены поселения людей: деревни шерпов на склонах Эвереста) до 12000 м (максимальная высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз и продолжает расти при дальнейшем увеличении высоты.

Земные радиоактивные источники излучения. Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли - это ^{40}K , ^{17}Rb и изотопы двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от ^{238}U и ^{232}Th - долгоживущих изотопов, входящих в состав Земли с самого ее рождения. Разумеется, уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка. Мощность эквивалентной дозы естественного радиоактивного фона на Земле составляет в среднем 1 мЗв/год, или около 0,12 мкЗв/час. Для сравнения укажем, что просмотр одного хоккейного матча по телевизору дает дозу около 0,01 мкЗв.

Есть, однако, такие места, где уровни земной радиации намного выше. Например, на небольшой возвышенности, расположенной в 200 км от Сан-Паулу в Бразилии, уровень радиации в 100 раз превосходит средний и достигает примерно 251 мЗв/год. По каким-то причинам возвышенность оказалась необитаемой. Лишь чуть меньшие уровни радиации были зарегистрированы на морском курорте Гуарапари с населением примерно 12000 человек, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности [6.3, 6.4].

Сходная ситуация наблюдается в рыбацкой деревушке Меаипе, расположенной в 50 км к югу от Гуарапари. Оба населенных пункта стоят на песках, богатых торием.

В другой части земного шара на юго-западе Индии 70000 человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием. Исследования, охватившие 8513 человек из числа проживающих на этой территории, показали, что данная группа лиц получает в среднем 3,8 мЗв/год на человека. Из них

более 500 человек получают свыше 8,7 мЗв/год. Около шестидесяти человек получают годовую дозу, превышающую 17 мЗв/год, что существенно превышает годовую дозу внешнего облучения от земных источников радиации.

Территории в Бразилии и Индии - наиболее хорошо изученные «горячие точки» нашей планеты. Но в Иране, например в районе городка Рамсер, где бьют ключи, богатые радием, были зарегистрированы уровни радиации 400 мЗв/год.

Известны и другие места на земном шаре с высоким уровнем радиации, например, во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре.

Источники внутреннего облучения. 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 действием космических лучей. Все остальное поступает от источников земного происхождения. В среднем человек получает около 180 мкЗв/год за счет ^{40}K , который усваивается организмом вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходимыми для жизнедеятельности организма.

Значительно большую дозу внутреннего облучения человек получает от нуклидов радиоактивного ряда ^{238}U и в меньшей степени - от радионуклидов ряда ^{232}Th . Некоторые из них, например нуклиды свинца и полония, 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 радиоактивные изотопы свинца и полония присутствуют в довольно высокой концентрации. Особенно велико содержание ^{210}Po . Эти изотопы попадают в организм оленей зимой, когда они питаются лишайниками, в которых накапливаются оба изотопа. Дозы внутреннего облучения человека от ^{210}Po в этих случаях могут в 35 раз превышать средний уровень.

6.1.3. ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

За последние несколько десятилетий человек создал сотни искусственных радионуклидов и научился использовать энергию атома в

самых разных целях: в медицине, 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 равными 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. Как правило, для техногенных источников радиации упомянутые различия выражены гораздо сильнее, чем для естественных. Кроме того, порождаемое им излучение обычно легче контролировать, хотя облучение, связанное с радиоактивными осадками от ядерных взрывов, почти так же невозможно контролировать, как и облучение, обусловленное космическими лучами или земными источниками [6.5].

6.2 ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ В ОБЛАСТИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

6.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Ионизирующее излучение - излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Заметим, что общепринято видимый свет и УФ-И не включать в понятие «ионизирующее излучение».

Частицы корпускулярного ионизирующего излучения или фотоны принято называть *ионизирующими частицами*.

Ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, например электронов, протонов, α - частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении, называется *непосредственно ионизирующим излучением*. Ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, например нейтронов или фотонов, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения, называется *косвенно ионизирующим излучением*.

К *фотонному ионизирующему излучению* относится γ - излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц, *тормозное излучение*, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, *характеристическое излучение*, возникающее при изменении

энергетического состояния электронов атома. На практике часто используется *рентгеновское излучение*, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.

К корпускулярному излучению, *состоящему из частиц с массой, отличной от нуля, относятся, например, α - излучение, электронное, протонное, нейтронное.*

Ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или из частиц и фотонов, называется *смешанным ионизирующим излучением*.

Принято различать *первичное и вторичное ионизирующее излучение*. Под первичным понимается ионизирующее излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодействия со средой является или принимается за исходное. Вторичное ионизирующее излучение возникает в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с данной средой. Вторичное излучение также может инициировать вторичное по отношению к нему излучение или третичное по отношению к первичному. Подобным образом можно рассматривать излучение четвертого и т. д. поколений по отношению к первичному.

Распределение ионизирующего излучения в рассматриваемой среде называется *полем ионизирующего излучения*. В зависимости от величины, характеризующей ионизирующее излучение, различают характеристики поля по плотности потока ионизирующих частиц, мощности поглощенной дозы, мощности кермы и т. д.

В заключение параграфа приведем определения ряда основных понятий:

Нуклид - вид атомов с данными числами протонов и нейтронов в ядре.

Радиоактивность - самопроизвольное превращение неустойчивого нуклида в другой нуклид, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.

Радионуклид - нуклид, обладающий радиоактивностью.

Изотоп - нуклид с числом протонов в ядре, свойственным данному элементу.

Радиоизотоп — изотоп, обладающий радиоактивностью.

6.2.2. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам в международной унификации единиц физических величин приняла единую *Международную систему единиц (СИ)*. В нашей стране ГОСТ 9867 61

«Международная система единиц» с 1963 г. установил применение единиц СИ как предпочтительных.

В 1981 г. на основе стандарта СТ СЭВ 1052-78 «Метрология. Единицы физических величин» утвержден ГОСТ-81 «Единицы физических величин» со сроком введения с 1 января 1982 г., который подтверждает введение Международной системы единиц физических величин в действие как обязательной.

Введением этого ГОСТ изымаются из обращения все основные широко использовавшиеся ранее внесистемные единицы активности и дозовых характеристик поля излучения. Среди них рассмотренные ниже единицы *кюри* для активности радионуклида в источнике, *рад* для поглощенной дозы и кермы, *бэр* для эквивалентной дозы, *рентген* для экспозиционной дозы фотонного излучения, *миллиграмм-эквивалент радия* для нестандартной величины гамма-эквивалента и производные от них единицы (табл. 6.1).

В соответствии с Методическими указаниями РД 50-454-84 по внедрению и применению ГОСТ 8.417-81 изъятие этих единиц было осуществлено до 1 января 1990 г. Однако учитывая, что специалисты в опубликованных ранее монографиях, статьях, отчетах будут еще многие годы встречаться с названными выше внесистемными единицами, последние рассмотрены здесь вместе с единицами СИ.

В настоящем тексте при использовании новых, ранее не применявшихся единиц СИ и производных от них единиц для удобства в квадратных скобках часто рядом с единицами СИ приводятся значения величин в изымаемых из обращения единицах или их сочетаний с другими единицами. Имея в виду постепенный отказ от практического использования экспозиционной дозы, ее единицы - рентген и производные от нее единицы, в том числе гамма-постоянная Γ , $\text{P см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$, их значения указывают только во внесистемных единицах [6.6].

Существует ограниченная группа единиц, которые не во всех случаях можно заменить единицами СИ. Поэтому наравне с единицами СИ допущен к применению без ограничения срока ряд внесистемных единиц, например *тонна*, *атомная единица массы*, *минута*, *час*, *сутки* и некоторые другие получившие широкое распространение единицы. Для атомной науки и техники особо положительную роль играет разрешение применять без ограничений срока внесистемную единицу энергии *электрон-вольт* (эВ) и ее десятичные кратные единицы.

Эти единицы рекомендуется применять для *энергии отдельных ионизирующих частиц E*. Для *энергии ионизирующего излучения W* - суммарной энергии ионизирующих частиц (без учета энергии покоя), испущенной, переданной или поглощенной, рекомендуется единица СИ джоуль и ее десятичные - кратные и дольные единицы. Взаимо-

связь единиц системы СИ с внесистемными единицами приведено в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Соотношение между единицами СИ и внесистемными единицами в области ионизирующих излучений

Величина и ее обозначение	Названия и обозначения единиц		Связь с единицей СИ
	Единица СИ	Внесистемная единица	
Активность A	Беккерель (Бк)	Кюри (Ки)	1 Ки = 3,700 · 10 ¹⁰ Бк
Плотность потока I или тока J_w энергии частиц	Ватт на квадратный метр (Вт/м ²), равный одному джоулю на квадратный метр в секунду [Дж/(м ² ·с)]	Эрг на квадратный сантиметр в секунду [эрг/(см ² ·с)] или мегаэлектрон-вольт на квадратный сантиметр в секунду [МэВ/(см ² ·с)]	1 эрг/(см ² ·с) = 1 · 10 ⁻³ Дж/(м ² ·с) = 1 · 10 ⁻³ Вт/м ² ; 1 МэВ/(см ² ·с) = 1,602 · 10 ⁻⁹ Дж/(см ² ·с) = 1,602 · 10 ⁻⁹ Вт/м ²
Поглощенная доза D , керма K	Грей (Гр)	Рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Мощность поглощенной дозы \dot{D} , мощность кермы \dot{K}	Грей в секунду (Гр/с)	Рад в секунду (рад/с)	1 рад/с = 0,01 Гр/с
Эквивалентная доза H	Зиверт (Зв)	Бэр (бэр)	1 бэр = 0,01 Зв
Мощность эквивалентной дозы \dot{H}	Зиверт в секунду (Зв/с)	Бэр в секунду (бэр/с)	1 бэр/с = 0,01 Зв/с
Экспозиционная доза X	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Р = 2,58 · 10 ⁻⁴ Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы \dot{X}	Ампер на килограмм (А/кг)	Рентген в секунду (Р/с)	1 Р/с = 2,58 · 10 ⁻⁴ А/кг
Поглощенная доза для единичного флюенса δ_D , керма для единичного флюенса δ_K	Грей-квадратный метр (Гр·м ²)	Рад-квадратный сантиметр (рад·см ²)	1 рад·см ² = 1 · 10 ⁻⁶ Гр·м ²
	Микрогрей-квадратный метр (мкГр·м ²)	Рад-квадратный сантиметр (рад·см ²)	1 рад·см ² = 1 мкГр·м ²
Эквивалентная доза для единичного флюенса δ_H	Зиверт-квадратный метр (Зв·м ²)	Бэр-квадратный сантиметр (бэр·см ²)	1 бэр·см ² = 1 · 10 ⁻⁶ Зв·м ²

Значения физических величин, сформированных в период перехода к Международной системе единиц, таких, как керма-эквивалент или керма-постоянная, приводятся, естественно, только в единицах СИ.

Таблица 6.2

Величина и ее обозначение	Названия и обозначения единиц		Связь с единицей СИ
	Единица СИ	Внесистемная единица	
Эквивалентная доза для единичного флюенса δ_n	Микрозиверт-квадратный метр (мкЗв·м ²)	Бэр-квадратный сантиметр (бэр·см ²)	1 бэр·см ² = 1 мкЗв·м ²
Концентрация (объемная активность) радионуклида в атмосферном воздухе или воде \mathcal{A}_y	Беккерель на кубический метр (Бк/м ³)	Кюри на литр (Ки/л)	1 Ки/л = 3,700 · 10 ¹³ Бк/м ³
	Беккерель на литр (Бк/л)	Кюри на литр (Ки/л)	1 Ки/л = 3,700 · 10 ¹⁰ Бк/л
Энергия ионизирующей частицы E_0	Джоуль (Дж)	Электрон-вольт (эВ)	1 эВ = 1,602 · 10 ⁻¹⁹ Дж
		Килоэлектрон-вольт (кэВ)	1 кэВ = 1,602 · 10 ⁻¹⁶ Дж
		Мегаэлектрон-вольт (МэВ)	1 МэВ = 1,602 · 10 ⁻¹³ Дж
Линейная передача энергии (ЛПЭ)	Джоуль на метр (Дж/м)	Килоэлектрон-вольт на микрометр (кэВ/мкм)	1 кэВ/мкм = 1,602 · 10 ⁻¹⁰ Дж/м

Выбор десятичной кратной или дольной единицы (табл. 6.3) диктуется, прежде всего, удобством ее применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы при помощи приставок, выбирают единицу, приводящую к числовым значениям величины, приемлемым на практике.

В принципе кратные и дольные единицы обычно выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000. Более подробные рекомендации по этому вопросу изложены в нормативных документах [6.9-6.12].

Табл. 6.3 позволит читателю при необходимости легко осуществлять переход от изымаемых из обращения внесистемных единиц к единицам СИ.

Таблица 6.3

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	Множитель	Приставка	Обозначение приставки
10^{16}	экса	Э	10^{-1}	деци	д
10^{15}	пета	П	10^{-2}	санتي	с
10^{12}	тера	Т	10^{-3}	милли	м
10^9	гига	Г	10^{-6}	микро	мк
10^6	мега	М	10^{-9}	нано	н
10^3	кило	к	10^{-12}	пико	п
10^2	гекто	г	10^{-15}	фемто	ф
10^1	дека	да	10^{-18}	атто	а

6.2.3. ДОЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В практических задачах часто используют дозовые характеристики поля излучения.

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

Поглощенная доза ионизирующего излучения D - отношение средней энергии \overline{dW} , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе $\frac{dm}{dm}$ вещества в этом объеме:

$$D = \frac{\overline{dW}}{dm} \quad (6.1)$$

ГОСТ допускает вместо термина «поглощенная доза излучения» использовать краткую форму «доза излучения» [6.13].

Единица поглощенной дозы в СИ - *грей* (Гр). Грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж.

Внесистемной единицей поглощенной дозы ионизирующего излучения, изымаемой из обращения в переходный период, является *рад*

(рад). Рад равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 г передается энергия ионизирующего излучения, равная 100 эрг. Таким образом, 1 рад = 0,01 Гр.

Обратим внимание, что в определении поглощенной дозы указана *средняя* переданная излучением веществу энергия \overline{dW} . Переданная энергия подвержена случайным статистическим флуктуациям, которые могут стать значительными, если масса dm мала и невелик флюенс заряженных частиц. Такие величины, подверженные статистическим флуктуациям, называют стохастическими. Таким образом, \overline{dW} - стохастическая величина. Ее ожидаемое значение называют средней переданной энергией \overline{dW} , которая является, в свою очередь, нестохастической величиной. Следовательно, и поглощенная доза - величина нестохастическая, определенная как среднее значение связанной с ней стохастической величины.

Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимается

$$W = W_{вх} - W_{вых} + \sum \mathcal{E}, \quad (6.2)$$

где $W_{вх}$ - энергия всех заряженных и незаряженных частиц (без учета энергии покоя), которые входят в рассматриваемый объем; $W_{вых}$ - энергия всех заряженных и незаряженных частиц (без учета энергии покоя), которые выходят из рассматриваемого объема; $\sum \mathcal{E}$ - сумма всех изменений энергии (при уменьшении со знаком плюс, при увеличении со знаком минус), связанных с массой покоя ядер и частиц при любых ядерных превращениях, происходящих в рассматриваемом объеме. Естественно, что изменение массы покоя учитывается в члене $\sum \mathcal{E}$ соответствующим энергетическим эквивалентом.

Пример. Если фотон с энергией $E_{\gamma, вх}$ претерпел в некотором элементе объема ΔV некогерентное рассеяние, при котором выходящий из объема ΔV фотон имел энергию $E_{\gamma, вых}$, а электрон отдачи, частично растратив свою энергию на ионизацию внутри объема ΔV , покинул пределы этого объема с энергией $E_{э, вых}$, то вклад ΔW в W от единичного процесса взаимодействия

$$\Delta W = E_{\gamma, \text{вх}} - E_{\gamma, \text{вых}} - E_{\alpha, \text{вых}} - \varepsilon \quad (6.3)$$

где ε - энергия связи электрона отдачи, которой обычно можно пренебречь.

В условиях равновесия заряженных частиц (когда поглощенная энергия в выбранном объеме ΔV равна энергии ионизирующего излучения, переданной заряженным частицам в этом объеме, или, иными словами, когда энергия заряженных частиц, уносимая за пределы элемента объема ΔV , равна энергии, оставленной в элементарном объеме ΔV другими заряженными частицами, образованными вне элемента объема ΔV) выносимая заряженной частицей из элементарного объема ΔV энергия $E_{\alpha, \text{вых}}$ компенсируется такой же энергией, вносимой другой заряженной частицей, и тогда формула (6.3) приобретает вид

$$\Delta W = E_{\gamma, \text{вх}} - E_{\gamma, \text{вых}} - \varepsilon \quad (6.4)$$

В рассмотренном примере незначительная доля энергии также уносится из объема ΔV частью тормозного излучения, образованного заряженной частицей в элементе объема ΔV и выходящего за его пределы. Однако этой энергией мы здесь пренебрегаем ввиду ее малости.

Отметим, что, если подходить строго, следует различать переданную энергию и поглощенную энергию излучения, которая представляет собой полную энергию излучения, потерянную полем при взаимодействиях. Эти две величины равны между собой при $\sum \varepsilon = 0$. Это соотношение справедливо во многих задачах. Так как в этих случаях понятия поглощенной и переданной энергии идентичны, различием между ними при этом вообще пренебрегают.

В объекте поглощенная доза излучения распределяется неравномерно.

Рассмотрим, как изменяется поглощенная доза, например, по глубине биологической ткани (рис. 6.1). Пусть косвенно ионизирующее излучение плоского моно-направленного источника падает нормально на плоскую границу полубесконечной среды (биологической ткани). Если среда контактирует с вакуумом, то на ее поверхности ($d = 0$) поглощенная доза формируется только вторичными заряжен-

ными частицами, образовавшимися в биологической ткани при распространении косвенно ионизирующего излучения и приходящими в точку детектирования из заднего полупространства (точка A на рис. 6.1). С увеличением толщины d к ним добавляются частицы, приходящие из переднего слоя среды между ее границей и точкой детектирования. Это приводит к возрастанию поглощенной дозы. Одновременно в этом же слое идут процессы ослабления косвенно ионизирующего излучения, что ведет к уменьшению поглощенной дозы. Следовательно, формирование поглощенной дозы обусловлено двумя противоположно действующими процессами: накоплением вторичного излучения и ослаблением первичного излучения. До некоторой глубины d_0 преобладает первый процесс, после глубины d_0 - второй. На глубине d_0 поглощенная доза имеет максимальное значение (точка B на рис. 6.1).

Например, для тепловых нейтронов максимальное значение поглощенной дозы наблюдается на глубине примерно 3 мм. При энергии нейтронов 5-20 кэВ наблюдается наибольшее смещение максимума поглощенной дозы вглубь ткани (на несколько сантиметров). С дальнейшим увеличением энергии нейтронов максимум поглощенной дозы приближается к поверхности и примерно с $E_0 > 100$ кэВ локализуется на ней. Далее при энергии $E_0 \geq 2,5 \div 5$ МэВ максимум поглощенной дозы снова несколько смещается вглубь ткани.

Для фотонного излучения плоского моно-направленного источника, излучение которого падает на однородный тканезквивалентный фантом в виде бесконечного слоя толщиной 30 см, максимум в распределении поглощенной дозы наблюдается почти на поверхности или в пределах первых 2 см от нее.

При облучении ткани непосредственно ионизирующим излучением - заряженными β - частицами поглощенная доза монотонно убывает с глубиной (кривая FBC на рис. 6.1) и максимальное значение имеет поверхностная поглощенная доза. Кривая EBC рис. 6.1 характеризует промежуточные случаи, когда падающее излучение состоит из непосредственно ионизирующего и косвенно ионизирующего излучений или когда падает косвенно ионизирующее излучение, но биологическая ткань контактирует не с вакуумом, а со средой, в которой также образуются вторичные заряженные частицы.

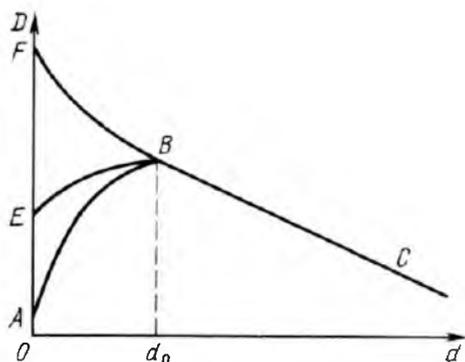


Рис. 6.1. Распределение поглощенной дозы на глубине биологической ткани

Степень воздействия излучения при облучении принято характеризовать *максимальным значением дозы облучения* в теле человека. Использование этих значений доз исключает превышение допустимой дозы в любой точке тела человека. Слово «максимальное» обычно для краткости опускают. Следуя этому, ниже в тексте под тканевыми дозами будем понимать их максимальные значения.

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений используют также понятие керма (kerma - аббревиатура от английских слов kinetic energy released in material).

Керма K - отношение суммы первоначальных кинетических энергий dW_k всех заряженных ионизирующих частиц, образованных под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе dm вещества в этом объеме:

$$K = \frac{dW_k}{dm} \quad (6.5)$$

В качестве вещества, в котором определяется керма, часто используют воздух для фотонного излучения, ткань для косвенно ионизирующих излучений в задачах медицины и биологии и любой материал при изучении радиационных эффектов.

Единица кермы - *грей* (Гр) - совпадает с единицей измерения поглощенной дозы. Грей равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образо-

вавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Внесистемная изымаемая из обращения единица кермы — *рад* (рад).

Керма удобна тем, что она применима как для фотонов, так и для нейтронов в любом диапазоне доз и энергий излучения, не вводит неоднозначных параметров в расчеты, таких, как, например, коэффициенты качества при расчете эквивалентной дозы (см. ниже).

Керма определяется кинетической энергией вторичных заряженных частиц, в том числе и той ее частью, которая расходуется затем на тормозное излучение.

Таким образом, керма для моноэнергетического пучка фотонного излучения может быть представлена в виде суммы двух членов [6.7]:

$$K = K_1 + K_2 = \mu_{en,m} \Phi_W + (\mu_{tr,m} - \mu_{en,m}) \Phi_W = \mu_{tr,m} \Phi_W, \quad (6.6)$$

где K_1 - компонент кермы, обусловленный кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на ионизацию и возбуждение при взаимодействии (столкновении) частиц первичного излучения с атомами среды; K_2 - компонент кермы, обусловленный кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на тормозное излучение; $\mu_{en,m}$, $\mu_{tr,m}$ - массовые коэффициенты поглощения энергии и передачи энергии фотонного излучения; Φ_W - флюенс энергии излучения.

Определим долю энергии вторичных заряженных частиц $g = K_2 / K$, переходящую в тормозное излучение. Учитывая, что $\mu_{en} = \mu_{tr} (1 - g)$, нетрудно определить

$$g = K_2 / K = (\mu_{tr} - \mu_{en}) / \mu_{tr}. \quad (6.7)$$

Из зависимости g от энергии фотонного излучения и атомного номера Z материала (рис. 6.2) видно, что для фотонов средних энергий и легко-атомных сред (воздух) K_2 / K незначительно. Заметим, что для тяжёлых сред значение g может стать большим.

Следовательно, значение кермы для фотонов в условиях электронного равновесия совпадает с поглощённой дозой с погрешностью, определяемой значением g .

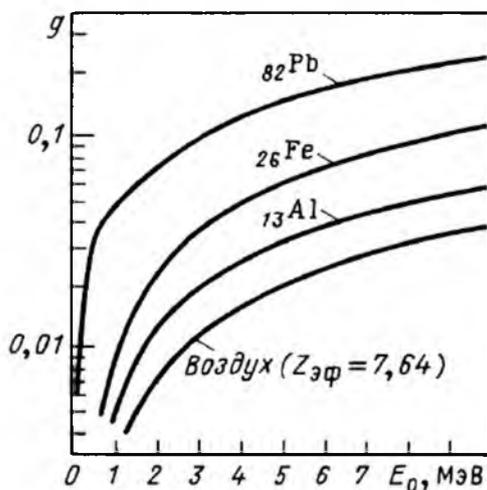


Рис. 6.2. Зависимость g от энергии фотонов для разных сред

Для энергий фотонов радионуклидных источников ($E_0 \leq 3$ МэВ) значение кермы в воздухе может превышать значение поглощённой дозы в воздухе примерно не более чем на 1% (рис. 6.2) для ^{60}Co это расхождение, например 0,5 %. Следовательно, в этих задачах с погрешностью до 1%, меньшей погрешности определения коэффициентов взаимодействия фотонов с веществом ($\pm 2\%$), поглощённая доза в воздухе и керма в воздухе равны.

Если вернуться к рассмотренному примеру некогерентного рассеяния в элементе объема, то применительно к определению кермы вся энергия электрона отдачи по определению кермы входит в величину ΔW_k , и переданная заряженным частицам энергия равна

$$\Delta W_k = E_{\gamma, \text{вх}} - E_{\gamma, \text{вых}} - \varepsilon \quad (6.8)$$

Следовательно, действительно, при пренебрежении потерей энергии на образование тормозного излучения в условиях электронного равновесия ΔW_k равна ΔW , определяемой по формуле (6.4).

Если условие равновесия заряженных частиц не выполняется, то $\Delta W_k > \Delta W$.

Керма в биологической ткани с глубиной из-за ослабления первичного излучения в ткани уменьшается. Таким образом, максимум кермы наблюдается на поверхности ткани.

Сравним теперь характеристики поля излучения по поглощенной дозе и керме для источников нейтронов, для которых первоначально и была введена керма.

Керма нейтронов совпадает с поглощенной дозой от вторичных заряженных частиц в условиях их равновесия. Для ткани достаточно большой массы и в биологической защите, где соблюдается условие равновесия заряженных частиц, керма обычно практически совпадает с поглощенной дозой от вторичных заряженных частиц; для тонких слоев, таких, как кожный покров и материал одежды, эти дозовые характеристики различаются.

Для нейтронов в условиях равновесия заряженных частиц поглощенная доза практически может быть представлена как сумма кермы и поглощенной дозы от вторичного γ -излучения. Поэтому керма на единичный флюенс меньше поглощенной дозы на единичный флюенс, особенно в области промежуточных энергий, где значителен вклад в поглощенную дозу от вторичного γ -излучения.

Часто бывает необходимо при решении практических задач определять керму для конкретного вещества (например, воздуха), находящегося в некоторой точке внутри других веществ (например, в водном фантоме). В таких случаях оговаривают материал, для которого определяют керму, и среду, в которую он помещен, например «керма в воздухе (или воздушная керма) в заданной точке внутри водного фантома».

Для оценки поля фотонного излучения при использовании внесистемных единиц часто применяют понятие «экспозиционная доза».

Экспозиционная доза X - это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда

dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме dm ;

$$X = dW / dm . \quad (6.9)$$

Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ. Вследствие близости эффективных

атомных номеров воздуха и ткани воздух для фотонного излучения принято считать тканезквивалентной средой.

Единица экспозиционной дозы в 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.

Как отмечалось выше, имея в виду отказ от экспозиционной дозы в переходный период, эта величина приводится только во внесистемных единицах.

Внесистемная единица экспозиционной дозы - *рентген* (Р). Рентген - это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Заметим, что 0,001293 г - это масса 1 см³ атмосферного сухого воздуха при нормальных условиях (температура 0° С и давление 1013 гПа (760 мм рт. ст.)). Соотношение внесистемной единицы СИ: 1Р = 2,58·10⁻⁴ Кл/кг (точно).

Экспозиционная доза не учитывает ионизацию, обусловленную тормозным излучением электронов и позитронов: этой величиной для воздуха обычно можно пренебречь ввиду ее малости (рис. 6.2).

В условиях равновесия заряженных частиц и пренебрежения энергией электронов и позитронов, затрачиваемой на образование тормозного излучения, энергетические эквиваленты кермы в воздухе и экспозиционной дозы одинаковы.

Покажем это на рассмотренном выше (для случая некогерентного рассеяния в элементе объема ΔV) примере определения кермы по формуле (6.8). Применительно к экспозиционной дозе для того же примера соответствующая формула для энергии $\Delta W_{\text{экс}}$, переданной заряженными частицами, имеет вид

$$\Delta W_{\text{экс}} = E_{\gamma, \text{вх}} - E_{\gamma, \text{вых}} - E_{\text{т.и}} - \varepsilon, \quad (6.10)$$

где $E_{\text{т.и}}$ - энергия электронов и позитронов, затраченная на образование тормозного излучения. Если пренебречь $E_{\text{т.и}}$ и предположить выполнение условий равновесия заряженных частиц, то $\Delta W_{\text{экс}}$ в (1.10)

действительно будет равна энергии ΔW_k , получаемой по формуле (6.8).

Из определения единиц экспозиционной дозы нетрудно найти их энергетические эквиваленты.

Принимая заряд одного иона равным $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, получаем, что при наличии равновесия заряженных частиц при экспозиционной дозе 1 Кл/кг в 1 кг воздуха создается $1/(1,602 \cdot 10^{-19}) = 6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов.

Введем понятие *средней энергии ионообразования* как отношения начальной кинетической энергии E заряженной ионизирующей частицы к числу пар ионов N , образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе: $w_0 = E / N$.

Принимая среднюю энергию образования одной пары ионов равной 33,85 эВ, получаем *энергетические эквиваленты кулона на килограмм*: 1 Кл/кг = $6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 кг воздуха $\rightarrow 2,11 \cdot 10^{14}$ МэВ на 1 кг воздуха $\rightarrow 33,85$ Дж на 1 кг воздуха $\rightarrow 8,07 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 м³ воздуха $\rightarrow 2,73 \cdot 10^{14}$ МэВ на 1 м³ воздуха $\rightarrow 43,77$ Дж на 1 м³ воздуха при нормальных условиях.

Принимая заряд одного иона равным $4,803 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ и зная W_0 , нетрудно определить и *энергетические эквиваленты рентгена*: 1 Р = $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов на 1 г воздуха $\rightarrow 5,45 \cdot 10^7$ МэВ на 1 г воздуха $\rightarrow 8,73 \cdot 10^{-6}$ Дж на 1 г воздуха $\rightarrow 87,3$ эрг на 1 г воздуха $\rightarrow 2,08 \cdot 10^9$ пар ионов на 1 см³ воздуха $\rightarrow 7,05 \cdot 10^4$ МэВ на 1 см³ воздуха $\rightarrow 1,13 \cdot 10^{-8}$ Дж на 1 см³ воздуха $\rightarrow 0,113$ эрг на 1 см³ воздуха при нормальных условиях.

В условиях лучевого равновесия заряженных частиц экспозиционной дозе в 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,85 Гр в воздухе или 36,9 Гр в биологической ткани, внесистемной единице 1 Р соответствует поглощенная доза 0,873 рад в воздухе или 0,95 рад в биологической ткани. Поэтому с погрешностью до 5% экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в ткани в радах можно считать совпадающими.

Как отмечалось выше, в процессе перехода на единицы СИ экспозиционная доза подлежит изъятию из употребления. Укажем на некоторые причины такого решения. Экспозиционная доза была введена только для фотонного излучения, поэтому она не может использовать-

ся в полях часто встречающегося на практике смешанного излучения. Даже и для фотонного излучения область практического использования этой величины ограничена энергией 3 МэВ. Значения экспозиционной дозы в рентгенах и поглощенной дозы в воздухе в радах отличаются во внесистемных единицах всего лишь в 1,14раза. Существенное изменение размеров единиц при переходе на единицы СИ и нецелочисленный неудобный коэффициент связи между внесистемными единицами и единицами СИ могут быть причинами многих ошибок.

Для оценки биологического эффекта воздействия излучения произвольного состава потребовалось введение новой характеристики дозы.

Для сравнения биологических эффектов, производимых одинаковой поглощенной дозой различных видов излучения, используют понятие *относительная биологическая эффективность излучения (ОБЭ)*.

Под ОБЭ излучения понимают отношение поглощенной дозы образцового рентгеновского излучения (непрерывный энергетический спектр с граничной энергией 180 кэВ), вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе данного рассматриваемого вида излучения, вызывающего тот же биологический эффект.

Коэффициент качества представляет собой регламентированное значение ОБЭ, установленное для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении. Безразмерная единица коэффициента качества - зиверт на грей. Этот коэффициент определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от полной линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Зависимость коэффициента качества k от ЛПЭ, Зв/Гр

ЛПЭ в воде	пДж/м	$\leq 0,56$	1,1	3,7	8,5	≥ 28
	кэВ/мкм	$\leq 3,5$	7,0	23	53	≥ 175
	k	1	2	5	10	20

Для фотонов, электронов, позитронов и β - частиц $k=1$ Зв/Гр, для нейтронов и протонов его значения приведены в табл. 6.4.

Если энергетический состав излучения неизвестен, рекомендуются использовать значения k , приводимые в табл. 6.5.

В задачах радиационной безопасности при хроническом облучении человека в малых дозах (в дозах, не превышающих пяти 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 - произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества излучения \bar{k} в данном объеме биологической ткани стандартного состава [6.8]:

$$H = \bar{k}D, \quad (6.11)$$

где средний коэффициент качества \bar{k} определяется из соотношения

$$\bar{k} = \frac{\int_0^{\infty} D(L)k(L)dL}{\int_0^{\infty} D(L)dL}, \quad (6.12)$$

где $D(L)$ - распределение поглощенной дозы по линейной передаче энергии; $k(L)$ - регламентированная зависимость коэффициента качества от линейной передачи энергии.

Единица эквивалентной дозы СИ - *зиверт* (Зв). Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг. Иными словами, зиверт - единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского или γ - излучения.

Внесистемная изымаемая из обращения единица эквивалентной дозы - *бэр* (*биологический эквивалент рада*). Бэр равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 100 эрг/г. Иными словами, бэр - единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощённая доза в 1 рад образцового рентгеновского или γ - излучения [6.10, 6.11].

При аналитических исследованиях задаются условием нормального падения излучения на биологическую ткань. В реальных задачах

излучение может падать не перпендикулярно поверхности тела человека, а быть разнонаправленным. Тогда реальная тканевая доза, отнесенная к единичному флюенсу, может отличаться от дозы при нормальном падении излучения на поверхность тела из-за само-экранирования. Для оценки этого эффекта введено понятие *коэффициента изотропности*, определяемого как отношение максимальной эквивалентной дозы при нормальном падении внешнего излучения на тело человека к максимальной эквивалентной дозе при угловом распределении этого излучения в реальных условиях для одного и того же флюенса. Например, для моноэнергетических нейтронов с энергией 1 МэВ при равномерном облучении человека со всех сторон коэффициент изотропности равен 2,2.

Таблица 6.5

Значения коэффициента качества k для нейтронов и протонов различной энергии, Зв/Гр

Энергия нейтронов, МэВ	k	Энергия нейтронов МэВ	k	Энергия протонов, МэВ	k	Энергия протонов, МэВ	k
Тепловые	2,8	2,5	10,0	1	12,0	$1 \cdot 10^6$	2,5
$1 \cdot 10^{-7}$	2,8	5,0	8,4	2	13,5	$1 \cdot 10^3$	2,1
$1 \cdot 10^{-6}$	2,8	$1 \cdot 10^1$	6,7	5	11,7	$3 \cdot 10^3$	2,2
$1 \cdot 10^{-5}$	2,8	$2 \cdot 10^1$	8,0	$1 \cdot 10^1$	9,4	$1 \cdot 10^4$	2,3
$1 \cdot 10^{-4}$	2,8	$1 \cdot 10^2$	4,0	$2 \cdot 10^1$	7,0	$3 \cdot 10^4$	2,3
$5 \cdot 10^{-3}$	2,5	$5 \cdot 10^2$	3,0	$5 \cdot 10^1$	4,7	$1 \cdot 10^5$	2,4
$2 \cdot 10^{-2}$	2,7	$1 \cdot 10^3$	2,5	$1 \cdot 10^2$	3,4	$3 \cdot 10^5$	2,4
$1 \cdot 10^{-1}$	9,0	$1 \cdot 10^4$	2,5	$2 \cdot 10^2$	2,4	$1 \cdot 10^6$	2,3
$5 \cdot 10^{-1}$	12,0	$1 \cdot 10^5$	2,5	$5 \cdot 10^2$	2,1		

Таким образом, 1 бэр = 0,01 Зв.

В последние годы для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей тела человека введено понятие *эффективной эквивалентной дозы* H_E .

Для определения этой величины необходимо ввести понятие риска. *Риск* - вероятность возникновения неблагоприятных последствий для человека (смерть, травматизм, заболевание и т. п.) вследствие облучения, аварии или другой причины, проявление которой носит стохастический характер. Например, риск смерти от курения $r = 5 \cdot 10^{-4}$ случаев/(чел.·год). Это означает, что на 1 млн. курящих людей каждый год умирает от болезней, вызываемых курением, дополнительно 500 чел.

Эффективная эквивалентная доза

$$H_E = \sum_T w_T H_T, \quad (6.13)$$

где H_T - эквивалентная доза в T -м органе или ткани; w_T - взвешивающий фактор, представляющий собой отношение стохастического риска смерти в результате облучения T -го органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения всего тела при одинаковых эквивалентных дозах. Таким образом, w_T определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий для организма при равномерном облучении:

$$\sum_T w_T = 1. \quad (6.14)$$

При равномерном облучении всего организма эквивалентная доза, определяемая по формуле (6.11), в каждом органе или ткани одна и та же: $H_T = H$ и, следовательно, $H_E = H$.

Таким образом, эффективная эквивалентная доза при неравномерном по органам и тканям облучении равна такой эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при данном неравномерном облучении.

Единицы эффективной эквивалентной дозы совпадают с единицами эквивалентной дозы.

Мощность поглощенной дозы \dot{D} (мощность кермы \dot{K} , мощность экспозиционной дозы \dot{X} , мощность эквивалентной дозы \dot{H}) - отношение приращения поглощенной дозы dD (кермы dK , экспози-

ционной дозы dX , эквивалентной дозы dH) за интервал времени dt к этому интервалу:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \left(\dot{K} = \frac{dK}{dt}, \dot{X} = \frac{dX}{dt}, \dot{H} = \frac{dH}{dt} \right). \quad (6.15)$$

Величины \dot{D} , \dot{K} , \dot{X} , \dot{H} могут быть как постоянными, так и изменяться во времени по некоторому закону. Их единицы - частные от деления единиц поглощенной дозы (кермы, экспозиционной дозы, эквивалентной дозы) или их кратных или дольных единиц на соответствующую единицу времени.

Таблица 6.6

Рекомендуемые значения k для излучений различных видов с неизвестным энергетическим составом, Зв/Гр

Вид излучения	k
Рентгеновское и γ -излучение, электроны, позитроны, β -излучение	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1-10 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
α - излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

6.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение, называется *источником ионизирующего излучения*.

Современные ядерно-технические установки обычно представляют собой сложные источники излучений. Например, источниками излучений действующего ядерного реактора кроме активной зоны являются система охлаждения, конструкционные материалы, оборудование и т. п. Поле излучения таких реальных сложных источников обычно представляется как суперпозиция полей излучения отдельных более элементарных источников.

Любой источник излучения характеризуется: 1) видом излучения; 2) геометрией источника (формой и размерами); 3) мощностью и ее распределением для протяженных источников; 4) энергетическим спектром; 5) временным распределением излучения; 6) угловым распределением излучения. Для источников смешанного излучения должны быть указаны также характеристики сопутствующего излучения.

Наиболее подробные характеристики излучения стационарного по времени точечного (линейного, поверхностного или объемного) источника описываются функцией $q(\vec{r}_0, E_0, \Omega_0)$, которая представляет собой отношение числа частиц с энергией от E_0 до $E_0 + dE_0$, испущенных за время dt в направлении Ω_0 в пределах элементарного телесного угла $d\Omega_0$ из точки пространства \vec{r}_0 (с элементарной длины dl , поверхности dS или объема dV источника, расположенного в этой точке), к интервалу времени dt , энергетическому интервалу dE_0 , элементарному телесному углу $d\Omega_0$ (для протяженных источников также к его элементарной длине dl , поверхности dS или объему dV соответственно).

Функция $q(\vec{r}_0, E_0, \Omega_0)$ считается заданной по всему пространству, занятому источником излучения.

Основное внимание уделено наиболее часто встречающимся на практике источникам фотонного излучения, нейтронов, α , β^- и β^+ -частиц.

Геометрически источники могут быть точечными и протяженными. Протяженные источники могут быть линейными, поверхностными или объемными с ограниченными, полубесконечными или бесконечными размерами.

Формы источников обычно следующие: линейные, круговые, поверхностные бесконечные плоские, дисковые, прямоугольные, сферические, полусферические, цилиндрические, объемные бесконечные, полубесконечные, пластины конечных размеров, шаровые и полушаровые, цилиндрические и источники в виде усеченного конуса.

Физически точечным можно считать такой источник, максимальные размеры которого много меньше расстояния до точки детектирования и длины свободного пробега в материале источника (ослаблением излучения в источнике можно пренебречь).

Поперечные размеры линейных источников должны быть намного меньше расстояния до детектора и длины свободного пробега частиц в материале источника.

Поверхностные источники имеют толщину много меньшую, чем расстояние до точки детектирования и длина свободного пробега в материале источника.

В объемном источнике излучатели распределены в трехмерной области пространства.

Мощность источника излучения наиболее часто распределяется по протяженному излучателю равномерно, экспоненциально, линейно или по косинусоидальному закону.

Энергетический спектр ионизирующего излучения источников может быть моноэнергетическим (состоящим из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией) или немонаэнергетическим (состоящим из фотонов различной энергии или частиц одного вида с разной кинетической энергией). Немонаэнергетическое ионизирующее излучение может иметь дискретный или непрерывный энергетический спектр.

Моноэнергетическим является γ - излучение ряда нуклидов, излучающих фотоны только одной энергии (например, ^{54}Mn ^{137}Cs , ^{203}Hg), аннигиляционное излучение, электроны внутренней конверсии для данного ядерного перехода и т. п.

Дискретный спектр имеют α - частицы и фотоны большей части нуклидов, излучающих α - частицы и фотоны разных энергий.

Непрерывный энергетический спектр характерен, например, для β - излучения нуклидов, тормозного излучения, нейтронов деления, нейтронов, получаемых по реакции (α, n), мгновенного γ -излучения деления.

В практических задачах наличие большого числа нуклидов, каждый из которых имеет дискретный спектр γ - излучения, приводит к тому, что реальный энергетический спектр становится практически непрерывным. Это относится, например, к γ - излучению смеси продуктов деления тяжелых ядер нейтронами.

По временному распределению можно выделить импульсные, стабильные и нестабильные источники ионизирующего излучения. *Импульсный источник* испускает излучение в течение одного или нескольких интервалов времени, каждый из которых меньше времени наблюдения. *Стабильный источник излучения* испускает ионизирующие частицы, число которых, отнесенное к единице времени, сохраняется постоянным в требуемых пределах в течение заданного времени наблюдения. У *нестабильного источника* число испускаемых ионизирующих частиц, отнесенное к единице времени, не остается постоянным в требуемых пределах в течение заданного времени наблюдения.

Для осесимметричных источников, наиболее часто встречающихся на практике, угловое распределение излучения для фиксированного E_0 обычно задается зависимостью от угла θ_0 между направлением движения частиц и осью симметрии в виде

$$q(\theta_0) = q_0 f(\theta_0), \quad (6.16)$$

где $q(\theta_0)$ - число частиц, испускаемых в единицу времени в единичный телесный угол в направлении θ_0 точечным источником или линейным, поверхностным, объемным источником с единицы длины, поверхности, объема соответственно; q_0 - число частиц, испускаемых в единицу времени в полупространство в телесный угол 2π ср в направлении защиты точечным источником или линейным, поверхностным, объемным единичной длины, поверхности, объема соответственно. При записи формулы (6.16) предполагалось для протяженных источников равномерное распределение мощности по источнику.

Среди многообразия угловых распределений излучений источников для решения большинства практических задач достаточно рассматривать следующие [6.9]:

изотропное

$$f(\theta_0) = 1 / (2\pi); \quad (6.17)$$

косинусоидальное, пропорциональное $\cos \theta_0$

$$f(\theta_0) = \cos \theta_0 / \pi; \quad (6.18)$$

косинусоидальное, пропорциональное $\cos^n \theta_0$,

$$f(\theta_0) = (n+1) \cos^n \theta_0 / (2\pi); \quad (6.19)$$

мононаправленное

$$f(\theta_0) = \delta(\cos \theta_0 - 1), \quad (6.20)$$

где δ - дельта-функция.

Иногда встречаются угловые распределения, которые можно записать в виде комбинаций изотропных и косинусоидальных угловых распределений излучения:

$$f(\theta_0) = \frac{1}{2\pi} (B + 2C \cos \theta_0), \quad (6.21)$$

где $B + C = 1$.

Функция $f(\theta_0)$ в распределениях (6.16)-(6.20) нормирована так, что в единицу времени в полу пространство в телесный угол 2π ср в направлении защиты точечным источником или линейным, поверхностным, объемным с единицы длины, поверхности, объема соответственно испускается одна частица. Таким образом,

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{0.5\pi} f(\theta_0) \sin \theta_0 d\theta_0 d\psi_0 = 1. \quad (6.22)$$

На рис. 6.3 в качестве примера показано угловое распределение излучения изотропного и косинусоидальных источников.

Если функцию $f(\theta_0)$ нормировать так, чтобы излучение испускалось в телесный угол 4π ср, то значения $f(\theta_0)$ будут в 2 раза меньше, чем приведенные в формулах (6.17), (6.19), (6.21).

Распределение вида (6.19) - наиболее общее. При $n = 0$ оно переходит в распределение (6.17), при $n = 1$ - в формулу (6.18), при $n \rightarrow \infty$ - в распределение (6.20).

В заключение приведем выражения для описания наиболее часто встречающихся точечных и плоских источников.

Излучение точечного моноэнергетического источника единичной мощности с энергией частиц E_0 , помещенного в точке \vec{r}_0 , описывается выражением

$$q(\vec{r}, E, \Omega) = f(\Omega) \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \delta(E - E_0), \quad (6.23)$$

где $f(\Omega)$ определяет угловое распределение излучения источника.

Точечный моно-направленный источник обычно называют *тонким лучом*.

Поле точечного изотропного источника в вакууме изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до детектора.

Излучение плоского моноэнергетического источника с энергией частиц E_0 , плоскость которого перпендикулярна некоторому единичному вектору \vec{k} и проходит через точку \vec{r}_0 , а излучатели распределены равномерно по всей поверхности источника с угловым распределением излучения, задаваемым функцией $f(\Omega)$, описывается выражением^{*}

[6.12]

$$q(\vec{r}, E, \Omega) = f(\Omega) \delta(\vec{r}\vec{k} - \vec{r}_0\vec{k}) \delta(E - E_0), \quad (6.24)$$

Излучение плоских источников нормировано на одну частицу, испускаемую в единицу времени с единичной поверхности источника в телесный угол $2\pi \text{ ср}$ в направлении защиты.

Косинусоидальный плоский источник формируется на границе полубесконечного объемного гомогенного равномерного изотропного источника с самопоглощением (без рассеяния излучения). Рассеянное излучение на границе такого источника формирует угловое распределение, подчиняющееся закону $\cos^n \theta_0$, где $n > 1$.

Моно-направленные плоские источники часто реализуются удалением точечных изотропных источников на достаточно большое расстояние от облучаемого объекта.

Протяженные объемные источники обычно имеют изотропное угловое распределение излучения каждого элемента объема.

Таким образом, для правильного задания источника необходимо указывать все его характеристики. Например, некоторый линейный источник может быть задан так: линейный длины l , м, равномерный изотропный стабильный моноэнергетический источник фотонного из-

лучения с энергией фотонов E_0 , МэВ, линейной мощностью q_{0L} частиц/(см с).

Наиболее проникающими и часто используемыми видами излучений являются фотонное и нейтронное.

Источниками фотонов могут быть радионуклиды, γ -излучение мгновенного деления ядерного топлива, γ -излучение продуктов деления, захватное γ -излучение, образованное в реакции (n, γ) , γ -излучение, возникающее при неупругом рассеянии быстрых нейтронов, γ -излучение активации, аннигиляционное, тормозное, характеристическое и рентгеновское излучения. Наиболее часто используемыми среди них являются фотоны радионуклидов. Некоторые указанные выше источники представляют собой смесь радионуклидов. Характеристики многих источников рассмотрены в соответствующих главах пособия. Отмеченное обуславливает выбор для рассмотрения радионуклидных источников как фотонных излучателей и основных источников нейтронов.

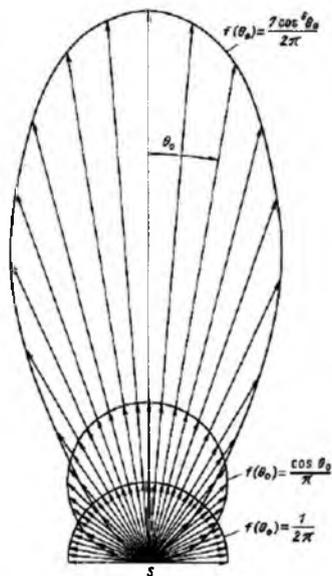


Рис. 6.3. Угловое распределение излучения изотропного и косинусоидальных источников

ГЛАВА 7. РАДИАЦИОННАЯ СРЕДА И ЧЕЛОВЕК

Исследования с целью определения глобального влияния на биосферу антропогенной радиации, ядерного оружия, отходов от производства, действующих АЭС, аварий на них, а также прогнозирование развития атомной энергетики на далекую перспективу были начаты в 1986 г.

Быстрое развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников ионизирующих излучений в различных областях науки, техники и народного хозяйства создали потенциальную угрозу радиационной опасности для человека и загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами. Поэтому вопросы защиты от ионизирующих излучений (или радиационная безопасность) превращаются в одну из важнейших проблем.

7.1. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЧЕЛОВЕКА

Связи между жизнью, здоровьем людей, положением флоры и фауны и современным уровнем радиационного загрязнения всей планеты и отдельных ее регионов очень сложные. До середины XX в. основными источниками ионизирующего излучения были природные источники - горные породы, Космос. Однако и тогда уровни земной радиации в разных регионах были различны, достигая максимальных значений в районах залежей урановых руд, радиоактивных сланцев, фосфоритов или кристаллических пород, ториевых песков, радоновых минеральных источников (Индия - штаты Керала и Тамилнад, Бразилия - штат Рио-де-Жанейро, Иран, Канада, Чехия и Словакия, ЮАР, Нигерия и др.).

Известны такие аномальные районы на Украине - Хмельник, Мироновка, Желтые воды. В этих местах уровни природного активного фона в десятки и сотни раз выше, чем в других.

Из-за того, что до недавнего времени не было известно о присутствии тех или иных отклонений в здоровье и развитии людей, которые проживают в районах с повышенным радиоактивным фоном, показатели продолжительности жизни, количество мертворожденных, болезни на лейкоз, рак у жителей этих районов были среднестатистично нормальными. На основе новых исследований и глубокого анализа проблемы можно сделать вывод, что и раньше, десятки и сотни лет тому назад, повышенный радиационный фон негативно влиял на население.

Это выявлялось в значительном увеличении количества больных с синдромом Дауна (почти в 5 раз), другими патологическими проявлениями, особенно раковыми опухолями.

Сейчас главными источниками радиоактивных загрязнений биосферы являются радиоактивные аэрозоли, которые поступают в атмосферу во время испытаний ядерного оружия, аварий на АЭС и радиоактивных производствах, а также радионуклиды, которые выделяются из радиоактивных отходов, захороненных на суше и в море, с отработанных атомных реакторов и сооружений. Во время аварий атомных реакторов, разгерметизацией залежей радиоактивных отходов радиационная грязь расползается на десятки и сотни километров, вследствие взрывов ядерных бомб - по всей планете.

По силе и глубине влияния на организм ионизирующее излучение считается самым сильным. Разные организмы имеют неодинаковую стойкость к действию радиоактивного облучения, даже клетки одного организма имеют разную чувствительность.

На человека воздействуют несколько видов ионизирующего излучения. Излучение, отклоняющееся в сторону Севера, называется α - излучением, Юга - β - излучением; излучение, не отклоняющееся магнитным полем, называется γ - излучением (оно не имеет электрического заряда).

В настоящее время известно около 40 естественных и более 200 искусственных α - активных ядер. α - Распад характерен для тяжелых элементов (урана, тория, полония, плутония и др.). α - Частицы - это положительно заряженные ядра гелия. Они обладают большой ионизирующей и малой проникающей способностью и двигаются со скоростью 20000 км/с.

β - Излучение - это поток отрицательно заряженных частиц (электронов), которые выпускаются при β - распаде радиоактивных изотопов. Их скорость приближается к скорости света. β - Частицы при взаимодействии с атомами среды отклоняются от своего первоначального направления. Поэтому путь, проходимый β - частицей в веществе, представляет собой не прямую линию, как у α - частиц, а ломаную. Наиболее высокоэнергетические β - частицы могут пройти слой алюминия до 5 мм, однако ионизирующая способность их меньше, чем у α - частицы.

γ - Излучение, испускаемое атомными ядрами при радиоактивных превращениях, обладает энергией от нескольких тысяч до нескольких МэВ. Распространяется оно, как и рентгеновское излучение, в воздухе со скоростью света. Ионизирующая способность γ - излучения значительно меньше, чем у α - и β - частиц. γ - Излучение - это электромагнитные излучения высокой энергии. Оно обладает большой проникающей способностью, изменяющейся в широких пределах [7.1,7.5].

7.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ионизирующие излучения имеют ряд общих свойств, два из которых - способность проникать через материалы различной толщины и ионизировать воздух и живые клетки организма - заслуживают особенно пристального внимания.

При изучении действия излучения на организм были определены следующие особенности:

1. Высокая эффективность поглощенной энергии. Малые количества поглощенной энергии излучения могут вызывать глубокие биологические изменения в организме.

2. Наличие скрытого, или инкубационного, периода проявления действия ионизирующего излучения. Этот период часто называют периодом мнимого благополучия. Продолжительность его сокращается при облучении в больших дозах.

3. Действие от малых доз может суммироваться или накапливаться. Этот эффект называется кумуляцией.

4. Излучение воздействует не только на данный живой организм, но и на его потомство. Это так называемый генетический эффект.

5. Различные органы живого организма имеют свою чувствительность к облучению. При ежедневном воздействии дозы 0,002 - 0,005 Гр уже наступают изменения в крови.

6. Не каждый организм в целом одинаково реагирует на облучение.

7. Облучение зависит от частоты. Одноразовое облучение в большой дозе вызывает более глубокие последствия, чем фракционированное.

Энергия, излучаемая радиоактивными веществами, поглощается окружающей средой. В результате воздействия ионизирующего излу-

чения на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биохимические процессы.

Известно, что $2/3$ общего состава ткани человека составляют вода и углерод; вода под воздействием излучения расщепляется на водород H и гидроксильную группу OH , которые либо непосредственно, либо через цепь вторичных превращений образуют продукты с высокой химической активностью: гидратный оксид и перекись водорода. Эти соединения взаимодействуют с молекулами органического вещества ткани, окисляя и разрушая ее.

В результате воздействия ионизирующего излучения нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ в организме. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и индивидуальных особенностей организма вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. При небольших дозах пораженная ткань восстанавливает свою функциональную деятельность. Большие дозы при длительном воздействии могут вызвать необратимое поражение отдельных органов или всего организма.

Любой вид ионизирующих излучений вызывает биологические изменения в организме как при внешнем (источник находится вне организма), так и при внутреннем облучении (радиоактивные вещества попадают внутрь организма, например пероральным или ингаляционным путем).

Рассмотрим действие ионизирующего излучения, когда источник облучения находится вне организма.

Биологический эффект ионизирующего излучения зависит от суммарной дозы и времени воздействия излучения, размеров облучаемой поверхности и индивидуальных особенностей организма. При однократном облучении всего тела человека возможны биологические нарушения в зависимости от суммарной поглощенной дозы излучения.

Поглощенная доза излучения, вызывающая поражение отдельных частей тела, а затем смерть, превышает смертельную поглощенную дозу облучения всего тела. Смертельные поглощенные дозы для отдельных частей тела следующие: голова - 20, нижняя часть живота - 30, верхняя часть живота - 50, грудная клетка - 100, конечности - 200 Гр.

Степень чувствительности различных тканей к облучению неодинакова. Если рассматривать ткани органов в порядке уменьшения их чувствительности к действию излучения, то получим следующую последовательность: лимфатическая ткань, лимфатические узлы, селезенка, зубная железа, костный мозг, зародышевые клетки. Большая

чувствительность кроветворных органов к радиации лежит в основе определения характера лучевой болезни. При однократном облучении всего тела человека поглощенной дозой 0,5 Гр через сутки после облучения может резко сократиться число лимфоцитов (продолжительность жизни которых и без того незначительна - менее 1 сут.

Уменьшится также и количество эритроцитов (красных кровяных телец) по истечении двух недель после облучения (продолжительность жизни эритроцитов примерно 100 сут.). У здорового человека насчитывается порядка 10 красных кровяных телец и при ежедневном воспроизводстве 10, у больного лучевой болезнью такое соотношение нарушается, и в результате погибает организм.

Важным фактором при воздействии ионизирующего излучения на организм является время облучения. С увеличением мощности дозы поражающее действие излучения возрастает. Чем более дробно излучение по времени, тем меньше его поражающее действие.

Неодинаковую радиочувствительность имеют организмы разного возраста. Чем моложе организм, тем он чувствительнее к радиации, чем сложнее организм, тем он больше поражается радиацией. В сложно построенных организмах с их тонко с координированными и взаимозависимыми функциями бесчисленных органов и систем намного больше и слабых звеньев, где возникают цепные реакции дезадаптации и патологии.

Считается, что биологическая эффективность α - частиц и тяжелых ядер в 20 раз выше, а нейтронов и протонов с энергией меньше 10 МэВ в десять раз выше, чем γ - частиц и рентгеновского излучения.

Конечный результат облучения (кроме отдаленных последствий) зависит не столько от полной дозы, сколько от действия ее мощности, или времени, за которое она была накоплена, а также характера ее распределения. Это связано с тем, что в живых организмах в ответ на облучение включаются защитные механизмы системы адаптации и компенсации, которые должны обеспечить стабильность внутренней среды организма (гомеостаз) и обновить нарушенные функции. Результат зависит от соотношения количества поврежденных тканей и защитно-обновляющей способности организма.

Внешнее облучение α -, а также β - частицами менее опасно. Они имеют небольшой пробег в ткани и не достигают кроветворных и других внутренних органов. При внешнем облучении необходимо учитывать γ - и нейтронное облучение, которое проникает в ткань на большую глубину и разрушает ее. Степень поражения организма зави-

сит от размера облучаемой поверхности. С уменьшением облучаемой поверхности уменьшается и биологический эффект. Так, при облучении фотонами поглощенной дозой 450 рад участки тела площадью 6 кв. см заметного поражения не наблюдалось, а при облучении такой же дозой всего тела было 50 % смертельных случаев.

Радиоактивные вещества могут попасть внутрь организма при вдыхании воздуха, зараженного радиоактивными элементами, с зараженной пищей или водой и, наконец, через кожу, а также при заражении открытых ран. Попадание твердых частиц в дыхательные органы зависит от степени дисперсности частиц. Из проводившихся над животными опытов установлено, что частицы пыли размером менее 0,1 мкм ведут себя так же, как и молекулы газа, т. е. при вдохе они попадают вместе с воздухом в легкие, а при выдохе вместе с воздухом удаляются. В легких может оставаться только самая незначительная часть твердых частиц. Крупные частицы размером более 5 мкм почти все задерживаются носовой полостью.

Гораздо чаще вследствие несоблюдения правил техники безопасности радиоактивные вещества попадают в организм через пищеварительный тракт.

Проникновение радиоактивных загрязнений через раны или через кожу можно предотвратить, если соблюдать соответствующие меры предосторожности. Опасность радиоактивных элементов, попадающих тем или иным путем в организм человека, тем больше, чем выше их активность. Степень опасности зависит также от скорости выведения вещества из организма. Если радионуклиды, попавшие внутрь организма, однотипны с элементами, которые потребляются человеком с пищей (натрий, хлор, калий и др.), то они не задерживаются в организме, а выделяются вместе с ними.

Инертные радиоактивные газы (аргон, ксенон, криптон и др.), попавшие через легкие в кровь, не являются соединениями, входящими в состав ткани. Поэтому они со временем полностью удаляются из организма.

Некоторые радиоактивные вещества, попадая в организм, распределяются в нем более или менее равномерно, другие концентрируются в отдельных внутренних органах. Так, в костных тканях отлагаются источники α -излучения - радий, уран, плутоний; β -излучения - стронций и иттрий; γ -излучения - цирконий. Эти элементы, химически связанные с костной тканью, очень трудно выводятся из организма. Продолжительное время удерживаются в организме также элементы с большим атомным номером (полоний, уран и др.). Элементы, об-

разующие в организме легкорастворимые соли и накапливаемые в мягких тканях, легко удаляются из организма.

Следует помнить, что рассчитывая величины доз радиационного облучения для того или иного человека, групп людей или объектов, всегда нужно отличать и учитывать космическое (внеземное), природное радиоактивное земное излучение и излучение, связанное с использованием человеком радиоактивных веществ.

Космическое излучение состоит из галактического и солнечного, которое изменяется в зависимости от активности процессов на Солнце и в его недрах. Энергия космического излучения по сравнению с другими достаточно малая возле поверхности Земли, однако в области стратосферы, ионосферы и экзосферы ее значение в облучении очень растет. Это излучение состоит из протонов и тяжелых ядерных частиц с очень большой энергией. Часть этой энергии используется на столкновение с ядрами атмосферного азота, кислорода, аргона, в результате чего на высотах около 20 км возникает вторичное высокое энергетическое свечение. Оно состоит из мезонов, нейтронов, протонов и электронов. Тут появляются космогенные радионуклиды, которые с атмосферными осадками попадают на поверхность Земли - тритий, уголь-14, бериллий-7, натрий-22 и др. (всего более десяти).

Каждый житель планеты в среднем от космического облучения на протяжении года получает радиационную дозу около 300 мкЗв (0,03 Бер).

Земных природных источников излучения сейчас насчитывается около 60, а именно: 32 - ураново-радиевые и ториевые группы, 11 - из групп других долгоживущих радионуклидов, таких как ^{40}K , ^{87}Rb и др.

Исследования, которые проводились на протяжении последних лет, свидетельствуют, что дома, в которых живут и работают люди, с одной стороны, защищают их от внешних радиационных облучений, а с другой - увеличивают общую дозу облучения за счет радионуклидов, которые содержатся в строительных материалах, и радона, который внутри помещений.

Уже досконально известно, что в деревянных домах мощность радиационной дозы в два-три раза меньше, чем в каменных или бетонных. А в домах, построенных из шлакоблоков, мощность радиационной дозы, как правило, в десятки раз больше, чем в деревянных.

Население городов, особенно больших, в целом всегда получает дозы выше по сравнению с жителями сельских местностей. Самый сильный радиационный фон в городах повышают граниты, в которых

урана больше в два-три раза, тория в три-десять раз, чем в песчаниках и известняках.

Остановимся на таком факте, как негативное влияние на здоровье человека радона, который в последнее время обратил на себя внимание ученых в Америке и в Европе. В 1992 г. ему было посвящено много публикаций в научной литературе и прессе.

Радон - радиоактивный газ, продукт радиоактивного превращения урана, тория, радия. Попадая в организм, он сразу наносит вред железам внутренней секреции, гипофизу, коре надпочечных органов. Это вызывает у трети населения удушье, сердцебиение, мигрень, тревожное состояние, бессонницу. Иногда развиваются злокачественные опухоли в легких, печени, селезенке.

Сегодня установлено, что на всех континентах во многих домах (сотни тысяч) присутствует радон. Он накапливается в помещениях, где плохая вентиляция, из-за присутствия так называемого "эффекта печной трубы", когда тяжелый, полный радона воздух втягивается через щели, окна, двери в жилище. Кроме того, он выделяется из строительных материалов и конструкций. Повышенную радиоактивность имеют сланцы, фосфориты. Поэтому фосфорные минеральные удобрения часто являются носителями радиоактивного загрязнения грунтов и грунтовых вод.

Сейчас установлено также, что одной из причин резкого увеличения концентрации радона в помещениях являются магнитные бури.

Персонал и больные курортов, где лечат радоновыми ваннами, получают дозы облучения, что в шесть раз больше установленных международных норм (более 300 мЗв в год). Радионуклиды ведут себя по-разному в воздухе, грунтах, воде и в живых организмах, потому что в разных средах неодинаково действуют физико-химические факторы: адсорбция, ионный обмен, седиментация, флокуляция. Из трех путей проникновения радионуклидов в организм (с воздухом, через кожу и с едой) наибольшее значение имеет потребление с едой.

В зависимости от распределения в тканях организма различают такие радионуклиды: остеотропные - накапливаются в костях (стронций, кальций, барий, радий, иттрий, цирконий, плутоний); те, что задерживаются в печенке (до 60 %) и скелете (до 25 %) - церий, лантан, прометий; те, что распределяются равномерно (третий, уголь, железо, полоний, инертные благородные газы); те, что остаются в мышцах (калий, рубидий, цезий), селезенке и лимфатических узлах (ниобий, рутений), щитовидной железе (йод). Радиоизотопы йода в щитовидной железе концентрируются в 100-200 раз больше, чем в других тканях и

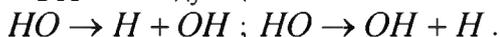
органах. Разрушение железа начинается при дозе облучения, которое равняется 100 Гр [7.2, 7.5].

7.3. ПЕРВИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующее излучение, воздействуя на живой организм, вызывает в нем цепочку обратимых изменений, которые приводят к тем или иным биологическим последствиям, зависящим от воздействия и условий облучения.

Первичным этапом - спусковым механизмом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в биологическом объекте, являются ионизация и возбуждение. Именно в этих физических актах взаимодействия происходит передача энергии ионизирующего излучения облучаемому объекту. Какие же процессы происходят в результате ионизации и возбуждения?

Известно, что в биологической ткани 60 - 70 % по массе составляет вода. В результате ионизации молекулы воды образуются свободные радикалы H и OH по следующей схеме:



В присутствии кислорода образуются также свободный радикал гидроперекиси и перекись водорода, являющиеся сильными окислителями. Получающиеся в процессе радиолиза воды свободные радикалы, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка, ферментов и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму, - токсины. Это приводит к нарушению жизнедеятельности отдельных функций или систем организма в целом.

Специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты заключается в том, что производимый им эффект обусловлен не столько количеством поглощенной энергии в облучаемом объекте, сколько той формой, в которой эта энергия передается. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ионизирующее излучение.

Сегодня защита организма человека и живой составной биосферы от радиоактивного излучения в связи с увеличивающимся радиоак-

тивным загрязнением планеты стала одной из самых актуальных проблем экологической науки. Сформировалась и преподается во многих ВУЗах новая дисциплина - радиоэкология. Издаются многочисленные труды по радиоэкологии. Основное их задание - ликвидировать дефицит знаний о природе и влиянии радиации на биосферу, ослабить вред от радиофобии там, где она возникает необоснованно, без объективных причин, а также предостеречь от существенной опасности. Потому что радиация - это неотъемлемый элемент нашей жизни, один из многих факторов окружающей среды. Наша жизнь зародилась в "радиационной колыбели". Все виды флоры и фауны Земли во время многих лет возникали и развивались под постоянным влиянием природного фона и приспособились к нему. Однако искусственно созданные радиоактивные вещества, ядерные реакторы, сооружения сконцентрировали неведомые ранее в природе объемы ионизирующего излучения, к чему природа была не подготовлена.

Основные особенности биологического действия ионизирующих излучений следующие:

1. Действие ионизирующих излучений на организм неощутимы человеком. У людей отсутствует орган чувств, который воспринимал бы ионизирующие излучения. Поэтому человек может проглотить, вдохнуть радиоактивное вещество без всяких первичных ощущений. Дозиметрические приборы являются как бы дополнительным органом чувств, предназначенным для восприятия ионизирующего излучения.

2. Видимые поражения кожного покрова, недомогание, характерные для лучевого заболевания, появляются не сразу, а спустя некоторое время.

3. Суммирование доз происходит скрытно. Если в организм человека систематически будут попадать радиоактивные вещества, то со временем дозы суммируются, что неизбежно приводит к лучевым заболеваниям.

Какие же последствия дальнейшего загрязнения биосферы радиоактивными веществами?

Во-первых, не обращая внимания на резкий спад гонки ядерных вооружений и ослабления угрозы глобальной войны, опасность гибели живого компонента биосферы от военных ядерных запасов еще существует. Продолжаются испытания ядерного оружия рядом стран, еще существуют силы в разных странах, которые могут спровоцировать ядерную войну. Нет гарантии, что не произойдет несчастный случай или авария на военных базах, полигонах, объектах, где есть ядерные запасы. Не исключена также возможность получения и применения

ядерного оружия террористами или маньяками, фанатично настроенными националистическими элементами. Во-вторых, не решена проблема атомной энергетики, хоть отношение к ней после чернобыльской аварии резко изменилось во всем мире. Усовершенствуются конструкции реакторов, увеличивается надежность АЭС, но остается проблема захоронения отходов (остатки обогащения урановой руды, отработанные топливо, реакторы и другие сооружения), существует много сотен опасных могильников твердых и жидких радиоактивных отходов во всем мире, особенно в Мировом океане.

Для решения этих проблем необходимы дальнейшее расширение гласности и правдивая информация обо всем, что связано с атомным оружием и атомной энергетикой, широкое экологическое образование, особенно в отрасли радиоэкологии, специальное санитарное воспитание населения, станций или пунктов постоянного радиационного контроля за состоянием воздуха, воды, грунтов, флоры и фауны во всех населенных регионах. Наконец, нужно разработать усовершенствованные способы защиты от радиации и методы дезактивации природной среды [7.6-7.10].

ГЛАВА 8. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ДОЗОВЫЕ ПРЕДЕЛЫ

Действие ионизирующих излучений в определенных дозах может вызвать неблагоприятные для здоровья эффекты, которые могут стать явными у самого облученного лица или проявиться у его потомства. В первом случае их принято называть *соматическими*, во втором - *генетическими* или *наследственными*.

Если вредные эффекты облучения выявляются, начиная с какого-то определенного порогового значения дозы, то их называют *нестохастическими* или *пороговыми*. К таковым относятся помутнение хрусталика глаза (лучевая катаракта), нарушение воспроизводительной функции, лучевые поражения зародыша и плода, косметическое повреждение кожи, дистрофическое повреждение разных тканей и др.

Последствия облучения человека, вероятность проявления которых существует при сколь угодно малых дозах ионизирующего излучения и возрастает с дозой, называют *стохастическими* или *беспороговыми*. В настоящее время предпочтительной считается гипотеза линейной зависимости доза - эффект в диапазоне нормируемых уровней хронического (непрерывного) облучения. Исходя из гипотезы беспороговости вредных стохастических эффектов, воздействие ионизирующего излучения в любой сколь угодно малой дозе рассматривается как дополнительное к существующему фоновому воздействию канцерогенных и мутагенных факторов различной природы, сопряженное с риском возникновения стохастических эффектов. Наиболее характерными стохастическими эффектами действия радиации являются лейкемия и другие формы злокачественных новообразований, а также передаваемые потомству наследственные изменения. Цель радиационной защиты - предотвращение вредных нестохастических эффектов и ограничение вероятности стохастических эффектов до уровней, считающихся приемлемыми. Основным государственным документом, регламентирующим уровни облучения персонала и населения в нашей стране, являются «Нормы радиационной безопасности» (НРБ) и «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП)¹. Применительно к

¹ Указанные документы периодически пересматриваются и на практике следует пользоваться действующими нормативными, документами.

отдельным видам деятельности, связанной с использованием источников ионизирующих излучений, разработаны специализированные нормативы, например для атомной энергетики «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций» (СП-АС) и «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации» (ОПБ)¹.

Главные цели и принципы радиационной безопасности, изложенные в этих документах: не превышение установленного основного дозового предела; исключение всякого необоснованного облучения; снижение доз облучения до возможного низкого уровня.

Нормами радиационной безопасности устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

Категория А - персонал (профессиональные работники) - лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

Категория Б - ограниченная часть населения - лица, которые не работают непосредственно с источниками излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений, применяемых в учреждениях и (или) удаляемых во внешнюю среду с отходами.

Категория В - население области, края, республики, страны.

Различные органы и ткани человека имеют разную радиочувствительность. Поэтому вводится понятие критического органа.

Критический орган - орган, ткань, часть тела или все тело, облучение которого в данных условиях причиняет наибольший ущерб здоровью данного лица или его потомства. В порядке убывания радиочувствительности устанавливают три группы критических органов:

- группа - все тело, гонады и красный костный мозг;

- группа - мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталики глаз и другие органы, за исключением тех, которые относятся к I и III группам;

- группа - кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Для достижения целей защиты устанавливаются *основные дозовые пределы и производные характеристики*. К основным дозовым пределам относятся предельно допустимые дозы (ПДД) для персонала и пределы доз (ПД) для ограниченной части населения, к производным

характеристикам - допустимые уровни, которые определяются из условия не превышения основных дозовых пределов.

Предельно допустимая доза (ПДД) - наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала (категория А) неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами. ПДД является основным дозовым пределом для лиц категории А.

Предел дозы (ПД) - предельная эквивалентная доза за год для ограниченной части населения (категория Б). ПД устанавливается меньше ПДД для предотвращения необоснованного облучения этого контингента людей. ПД контролируется по усредненной для критической группы дозе от внешнего излучения и уровню радиоактивных выбросов и радиоактивного загрязнения объектов внешней среды. ПД является основным дозовым пределом для лиц категории Б.

Допустимые уровни - нормативные значения поступления радиоактивных веществ в организм, содержания радиоактивных веществ в организме, их концентрация в воде и воздухе, мощность дозы, плотность потока и т. п., рассчитанные из значений основных дозовых пределов ПДД и ПД.

Таблица 8.1

Основные годовые дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения для различных групп критических органов

Группа критических органов	ПДД для категории А		ПД для категории Б	
	мЗв	бэр	мЗв	бэр
I	50	5	5	0,5
II	150	15	15	1,5
III	300	30	30	3,0

Основные дозовые пределы для различных групп критических органов приведены в табл. 8.1 [8.3, 8.4].

Сделаем два замечания к данным табл. 8.1:

1. Дозы облучения от естественного фона и медицинского обследования и лечения пациента в основные дозовые пределы не включаются.

2. Для категории А (за исключением женщин до 40 лет) распределение дозы внешнего излучения в течение года не регламентируется. Для женщин репродуктивного возраста (до 40 лет) доза на область таза не должна превышать 10 мЗв (1 бэр) за любые 2 мес.

Эквивалентная доза H , накопленная в критическом органе за время T лет с начала профессиональной деятельности, не должна превышать значения, определяемого по формуле

$$H = ПДД \cdot T, \quad (8.1)$$

где $ПДД$ - предельно допустимая доза за год в тех же единицах, что и H .

Регламентация и контроль за *облучением населения* (категория В) относится к компетенции Министерства здравоохранения. Ограниченное облучение населения осуществляется путем принятия мер по предупреждению и ограничению образования радиоактивных отходов, максимальному снижению их количества и активности, удаляемой во внешнюю среду, а также строгого нормирования и контроля радиоактивности в атмосферном воздухе, воде, продуктах питания.

Аварийное облучение персонала. При возникновении аварий должны быть приняты все практически возможные меры для сведения к минимуму внешнего облучения, поступления радиоактивных нуклидов в организм человека, а также во внешнюю среду. Облучение персонала выше установленных дозовых пределов (табл. 8.1) может быть разрешено только тогда, когда нет возможности принять меры, исключаяющие их превышение, и может быть оправдано лишь спасением людей, предотвращением развития аварии и облучения большого числа людей.

Планируемое повышенное облучение персонала ограничивается следующими условиями: допускается внешнее облучение и (или) поступление радионуклидов в организм выше годовой предельно допустимой дозы и предельно допустимого поступления радионуклидов в 2 раза в каждом отдельном случае или в 5 раз за календарный год ежегодно на протяжении всей трудовой деятельности. В каждом подобном случае персонал должен быть предупрежден о дополнительном облучении, и такое облучение допускается только с письменного разрешения руководителя учреждения и личного согласия исполнителя. Планируемое повышенное облучение персонала не разрешается в следующих случаях:

- а) если добавление планируемой дозы к полученной ранее работником превысит значение, установленное формулой (8.1);
- б) если работник при аварии или аварийном облучении ранее получил дозу, превышающую годовую $ПДД$ в 5 раз;
- в) если работник - женщина в возрасте до 40 лет.

В НРБ и специализированных нормативных документах содержатся и другие ограничения, целью которых является максимальное снижение доз облучения людей и охрана внешней среды, как при нормальных условиях, так и в аварийных ситуациях.

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) - территория вокруг учреждения или источника радиоактивных отходов, поступающих во внешнюю среду, на которой уровень облучения может превысить ПД, установленный для лиц категории Б. В СЗЗ устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

Таблица 8.2

Допустимая мощность эквивалентной дозы Н, используемая при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения ДМД

Категория облучаемых лиц	Назначение помещений и территорий	ДМД	
		мкЗв/ч	мбэр/ч
<i>Категория А</i> (стандартная продолжительность облучения $t=1800$ ч/год)	Помещения постоянного пребывания персонала Помещения, в которых персонал пребывает не более половины рабочего времени	14 28	1,4 2,8
<i>Категория Б</i> (стандартная продолжительность облучения $t=8800$ ч/год)	Любые помещения учреждения и территория санитарно-защитной зоны, где могут находиться лица, относящиеся к категории Б	1,2	0,12
<i>Категория Б</i> (стандартная продолжительность облучения $t=8800$ ч/год)	Любые помещения (в том числе жилые) и территория в пределах зоны наблюдения	0,3	0,03

Зона наблюдения (ЗН) - территория, где возможно влияние радиоактивных газо-аэрозольных выбросов и жидких сбросов учреждений и где облучение проживающего населения может достигать установленного ПД. На территории зоны наблюдения проводится радиационный контроль.

Медицинское облучение - облучение с целью профилактического обследования состояния здоровья для диагностики и лечения, в том числе с применением радиоактивных источников.

Допустимые уровни внешних потоков ионизирующих излучений. С целью контроля за радиационной обстановкой в период работы при нормальной эксплуатации, а также при проектировании защиты в нормативные документы вводятся допустимые уровни - мощности эквивалентной дозы. Они рассчитываются путем деления годовых дозовых пределов, приведенных в табл. 8.1, на время облучения в течение года. Так, для стандартных условий профессиональных работников предельно допустимая мощность эквивалентной дозы принята равной 28 мкЗв/ч (2,8 мбэр/ч).

При проектировании защиты от внешних потоков ионизирующих излучений в допустимую мощность дозы (ДМД) вводится коэффициент запаса $k = 2$ (табл. 8.2).

8.2. УРОВНИ ФОНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Компонентами фоновых источников ионизирующих излучений являются космическое излучение и естественные радиоактивные вещества, содержащиеся в воздухе и почве, а также в организме самого человека. В условиях естественного фонового облучения человек и все живые организмы находятся постоянно. Особенность естественной радиации - практическая неизменность мощности дозы во времени для данной местности. Вместе с тем от района к району фоновые характеристики могут изменяться. В связи с появлением искусственных источников ионизирующих излучений и решением проблемы их нормирования возникла необходимость изучения естественного фона. Дело в том, что уровни фонового облучения человека могут служить основой для его сравнения с облучением от искусственных источников радиации. Так, установленные в настоящее время пределы доз и контрольные уровни для населения сравнимы с уровнями естественного фона.

Законы миграции во внешней среде и метаболизма в организме человека природных радиоактивных веществ могут дать полезную информацию об этих закономерностях для искусственных радионуклидов. Необходимо знать фоновое излучение и для того, чтобы в районе размещения крупной ядерно-технической установки (например, ядерного реактора) можно было выделить долю искусственной радиации, обусловленную радиоактивными отходами. Не следует также забывать, что излучение от естественных источников радиации вносит большой вклад в коллективную дозу населения земного шара.

Рассмотрим отдельные компоненты природной радиации, обуславливающие внешнее и внутреннее облучение человека, а также до-

зы от технологически измененного радиационного фона. Эти данные относятся к среднемировым данным, опубликованным в докладах Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН).

Дозы от внешнего космического излучения. Первичные космические частицы (протоны, α - частицы, ядра легких и средних элементов) имеют очень высокие энергии (от 10^2 до 10^{14} МэВ) и в основном поглощаются или трансформируются в другие виды радиации в верхних слоях атмосферы. Земной поверхности достигают вторичные излучения, которые состоят из ионизирующей и нейтронной компоненты. Основная часть ионизирующей компоненты создается электронами, образующимися при взаимодействии с воздухом и распаде мюонов. При этом на уровне моря (без учета эффекта экранирования) в воздухе образуется 2,1 пар ионов/(см \cdot с), что соответствует мощности эквивалентной дозы около 0,032 мкЗв/ч или дозе за год $H = 280$ мкЗв (28 мбэр).

Нейтроны теряют энергию в результате упругих столкновений с атомами атмосферы, и поверхности Земли достигает лишь незначительное их количество. В зависимости от геомагнитной широты плотность потока нейтронов на уровне моря лежит в пределах от 65 на геомагнитном экваторе до $180 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на геомагнитном полюсе. Принимая значение $\Phi = 80 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, используя коэффициент перехода от плотности потока к мощности поглощенной дозы $5 \cdot 10^{-6} \text{ мкГр} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с/ч}$ и коэффициент качества нейтронов $k = 6$, получаем годовую эквивалентную дозу $H = 21 \text{ мкЗв}$ (2,1 мбэр)^{*)}. Следует заметить, что внешнее космическое излучение изменяется не только с геомагнитной широтой, но также и с солнечной активностью. Оно значительно возрастает и с высотой над уровнем моря [8.1, 8.2].

Дозы от внешнего фотонного излучения почвы и воздуха. В земной коре содержатся долгоживущие γ -излучающие радионуклиды, такие, как ^{40}K ($T_{0,5} = 1,28 \cdot 10^9$ лет), ^{87}Rb ($4,7 \cdot 10^{10}$ лет), ^{238}U ($4,47 \cdot 10^9$ лет), ^{232}Th ($1,41 \cdot 10^{10}$ лет) и др. Последние из названных радионуклидов являются родоначальниками радиоактивных нуклидов с меньшими периодами полураспада, но именно они в основном и обуславливают внешнее фотонное излучение. Речь идет, прежде всего, о продуктах распада ^{220}Rn в урановом семействе и ^{220}Rn в ториевом семействе. При этом предполагается, что ^{238}U и ^{232}Th находятся в равновесии с их дочерними продуктами. Для расчета мощности кермы

в воздухе на поверхности почвы используем принцип лучевого равновесия. Нижеследующие уровни доз (табл. 8.3) получены по результатам расчета.

Принцип лучевого равновесия могут быть также использованы для расчета дозы от фотонного излучения продуктов распада Rn , находящихся в атмосферном воздухе. Если, например, принять для ^{222}Rn $A_m = 4,6$ Бк/кг воздуха и $E = 1,6$ МэВ/расп., то получим годовую дозу 18 мкЗв. В действительности диапазон удельных активностей естественных радионуклидов в почве и атмосферном воздухе достаточно велик и различие между средним и фактическим значением дозы в данной местности от каждого радионуклида может достигать $\pm 50\%$ и больше. Кроме того, более точный расчет доз требует, во-первых, знания степени равновесности в радиоактивных цепочках (а она обычно меньше единицы и лежит в диапазоне 0,3-0,8); во-вторых, необходимо вводить поправку на коэффициент, учитывающий экранирование стенами помещений и различие во времени пребывания человека на открытом воздухе и внутри зданий.

Таблица 8.3

Средняя удельная активность естественных радиоактивных веществ в почве и мощность эквивалентной дозы на поверхности почвы

Элемент или родоначальник семейства	E , МэВ/расп.	A_m , Бк/кг	q_m , МэВ/(с кг)	\dot{H} , мкЗв/год
	0,16	370	59	150
^{238}U	1,60	25	40	100
^{232}Th	2,60	25	65	160

Доза внутреннего облучения от космогенных радионуклидов.

Под действием как первичных, так и вторичных космических излучений в атмосфере образуются космогенные радионуклиды. Важнейшие среди них 3H ($T_{0,5} = 12,3$ года), 7B (53,3 сут), ^{14}C (5730 лет), ^{22}Na (2,6 года). 3H и ^{14}C - низкоэнергетические β -излучатели. Внутреннее облучение от них формируется в основном по сложным пищевым и биологическим цепочкам вследствие накопления их в поверхностных водах континентальных водоемов, в растительности и биосфере в целом - они являются важнейшими биогенными элементами. Оцененные

значения эффективных эквивалентных доз внутреннего облучения от ^3H и ^{14}C равны 0,01 и 12 мкЗв соответственно. Внутреннее облучение от ^7B и ^{22}Na формируется за счет вдыхания с воздухом, где их средняя концентрация оценена в 3000 и 0,3 Бк/м³, а годовая эффективная эквивалентная доза 3 и 0,2 мкЗв соответственно. Таким образом, суммарный вклад космогенных радионуклидов в эффективную эквивалентную дозу составляет около 15 мкЗв.

Дозы внутреннего облучения от радионуклидов земного происхождения. При вдыхании воздуха но пищевым и биологическим цепочкам в организм человека поступают наряду со стабильными и естественные радионуклиды. Важный биологический элемент - естественный калий, средняя концентрация которого в организме взрослого мужчины достигает 2 г/кг, что соответствует концентрации радиоактивного ^{40}K в теле человека 60 Бк/кг (изотопное отношение ^{40}K принято равным $1,18 \cdot 10^{-4}$). Наибольшая годовая эффективная эквивалентная доза от ^{40}K равна 180 мкЗв.

Наибольший вклад в дозу внутреннего облучения вносят ^{222}Rn (в цепочке $^{222}\text{Rn} - ^{210}\text{Po}$) и в меньшей степени ^{220}Rn (в цепочке $^{220}\text{Rn} - ^{208}\text{Tl}$).

^{222}Rn и ^{220}Rn как инертные газы диффундируют из почвы, воды, строительных материалов и поступают в атмосферный воздух. При этом основными дозообразующими нуклидами являются дочерние продукты их распада.

Сводные результаты о годовых среднемировых уровнях облучения от естественных источников ионизирующих излучений приведены в табл. 8.4.

Техногенно измененный радиационный фон. Под этим термином понимается доза облучения, обусловленная естественными радионуклидами (ЕРН), содержащимися в строительных материалах, каменном угле, фосфатных рудах и в удобрениях. В отличие от собственно природной радиации доза от этих источников сильно зависит от местных условий, масштаба применения и особенностей технологий. В этом пункте используются среднемировые уровни, приведенные в материалах НКДАР ООН.

Использование строительных материалов в домостроении. Основными источниками излучения здесь являются продукты распада урановой (^{238}U) и ториевой (^{232}Th) цепочек, а также естественный ка-

лий (^{40}K). Их содержание в местных строительных материалах очень различается. В свою очередь, концентрация основных дозообразующих радионуклидов внутреннего облучения ^{222}Rn и ^{220}Rn , эмигрирующих из стен, а также продуктов их распада в значительной степени зависит от проветриваемости помещений и их этажности. Наибольшему внутреннему облучению в кирпичных и бетонных домах (примерно до 7,5 мЗв) подвергается легочная ткань, а дозам внешнего фотонного облучения (примерно 0,4 мЗв) - все тело. Учитывая взвешивающие факторы (для легких 0,12) эффективная эквивалентная доза может достигать 1300 мкЗв (130 мбэр), почти вдвое увеличивая природный фон. В деревянных строениях уровни облучения от строительных материалов незначительны.

Таблица 8.4

Эквивалентные и эффективные эквивалентные годовые дозы облучения населения за счет природных источников радиации в регионах с нормальным фоном

Вид облучения	Эквивалентная доза облучения органов и тканей, H , мкЗв					
	Красный костный мозг	Эндо-стальные клетки	Лёгие	Щитовидная железа	Желудочно-кишечный тракт	Гонады
Внешнее	620	620	620	620	620	620
Внутреннее	290	1240	420	310	310	310
Всего	910	1860	1040	930	930	930

Использование каменного угля. Каменный уголь содержит незначительное количество естественных радиоактивных нуклидов ($\text{ЕРН } ^{40}\text{K}$, а также ^{238}U и ^{232}Th вместе с продуктами их распада. Их концентрации в углях очень различны и могут изменяться на несколько числовых порядков. Например, средние удельные активности в углях России ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th составляют 120, 28 и 25 Бк/кг соответственно.

При сжигании угля на ТЭЦ ЕРН вместе с летучей золой, горячим потоком газов и других летучих минеральных компонентов поступают в атмосферу. Их абсолютный выброс зависит от эффективности очист-

ки и мощности ТЭЦ. При этом концентрация ЕРН в золе и шлаке в 3 раза и более превосходит их концентрацию в каменном угле [8.7].

По данным НКДАР ООН, оценочные уровни ожидаемых коллективных эффективных эквивалентных доз на единицу выработанной электроэнергии современной ТЭЦ, работающей на угле, равны: внутреннее облучение за счет вдыхания 0,23, осаждения на почву и водоемы - 0,26; внешнее облучение за счет осаждения - 0,015; всего примерно $0,5 \text{ чел} \cdot \text{Зв} [\text{ГВт} (\text{эл}) \cdot \text{год}]^{-1}$. От ТЭЦ, работающих по «старой» технологии, оценочные дозы почти на порядок выше. Некоторое количество ЕРН попадает во внешнюю среду при добыче каменного угля, сжигании его в бытовых источниках, коксовальных печах, на транспорте и т. д. Основным дозообразующим источником является *Rn*. Расчет доз от *Rn* производится в предположении, что коэффициент равновесия между ^{222}Rn и короткоживущими продуктами его распада равен 0,6. Тогда эффективная эквивалентная доза на единичную активность принимается равной $1,3 \cdot 10^{-8} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ [8.6].

Фосфатные руды и удобрения. Фосфатные руды, используемые в основном для производства фосфатных удобрений, содержат в десятки раз больше *U*, чем каменный уголь. Ожидаемые коллективные эффективные эквивалентные дозы на единицу массы товарной фосфатной руды оцениваются примерно $1,5 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-5} \text{ чел} \cdot \text{Зв} \cdot \text{т}^{-1}$ от внешнего и внутреннего облучения соответственно. Учитывая современное производство фосфатной руды $(1,1-1,3) \cdot 10^8 \text{ т/год}$, получаем ожидаемую дозу около 7000 чел · Зв.

Использование угольной золы в строительной промышленности увеличивает уровень коллективной дозы еще в 10 раз, а фосфогипса в жилищном строительстве - в 100 раз по сравнению с дозами от фосфатной руды.

Использование угольной золы или фосфогипса в жилищном строительстве может привести к увеличению коллективной дозы соответственно в 10 и 100 раз.

Кроме доз от естественной радиации в настоящее время человек подвергается дополнительному облучению за счет искусственных антропогенных источников. Они являются следствием широкого применения в медицинских целях рентгенорадиодиагностических и терапевтических процедур и испытательных взрывов ядерного оружия. Эти источники искусственной радиации описаны в специальной литературе и не являются предметом рассмотрения здесь.

8.3. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ДОЗОВЫХ ПРЕДЕЛОВ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИМИ ДОКУМЕНТАМИ

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) в серии своих публикаций предложила новую систему нормирования дозовых пределов от воздействия радиации на организм человека, краткое изложение которой приведено ниже²⁾. Собственно принципы регламентации дозовых нагрузок, рекомендуемых МКРЗ, частично аналогичны принятым в нашей стране (см. п. 8.1), а именно [8.2, 8.4]:

- эквивалентная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендуемого Комиссией для соответствующих условий;

- никакой вид деятельности не должен вводиться в практику, если его применение не дает реальную «чистую» пользу;

- все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов.

Реализация этих принципов на практике, в особенности третьего принципа, который здесь рассмотрен, выражена не в форме пожелания, а, по замыслу МКРЗ, должна быть поставлена на количественную основу. Третий принцип получил название ALARA (сокращенное от английских слов As Low As Reasonably Achievable). Он следует из признания беспороговой зависимости доза - эффект в области малых доз, характерных для регламентируемых уровней облучения персонала и населения. Фактически речь идет о стохастической, вероятностной природе опасности радиационных повреждений, а точнее о приемлемости определенного уровня риска от облучения при малых дозах.

Несмотря на дискуссионность вопроса, МКРЗ постулировала линейную зависимость биологического эффекта от дозы для низкого уровня облучения. Из признания беспороговости и линейной зависимости доза - эффект формально следует важное для системы нормирования положение о том, что любые сколь угодно малые уровни облучения связаны с риском радиационного повреждения. Но как мы видели (см. п. 8.2), человек уже живет в условиях определенного естественного и техногенного радиационного фона. Кроме того, человек живет в условиях риска здоровью практически от всех видов деятельности: пользования всеми видами транспорта, традиционной энергетики на каменном угле или гидроресурсах, от курения и даже потребления ко-

фе. Так, по данным Публикации МКРЗ № 27 смертность от несчастных случаев на предприятиях сталелитейной промышленности Европы, усредненная за 13 лет, составила 316 случаев в год на миллион работающих. По тем же данным в США (1972 г.) смертность от несчастных случаев на 1 млн. чел. в год составила: на транспорте 362, в сельском хозяйстве 657, в строительстве 710, в горной промышленности 1000 случаев и т. д. Приведенные числовые значения обычно выражают в терминах коэффициентов риска R . Например, на транспорте $R = 3,62 \cdot 10^{-4}$ смертных случаев в год и т. д. Естественно, что деятельность человека, связанная с применением источников ионизирующих излучений в энергетике, медицине, других отраслях народного хозяйства, также связана с риском. Но здесь коэффициенты риска оценивают по коллективной эффективной эквивалентной дозе S_E чел·Зв, которая определяется в форме

$$S_E = \int_0^{\infty} H_E N(H_E) dH_E, \quad (8.2)$$

где H_E - индивидуальная эффективная эквивалентная доза, Зв; $N(H_E)$ - популяционное распределение эффективной эквивалентной дозы от источника; $N(H_E) dH_E$ - количество лиц, получивших эффективную эквивалентную дозу в диапазоне от H_E до $H_E + dH_E$.

Численные значения коэффициентов риска, рекомендуемые МКРЗ, приведены в табл. 8.5. Там же приведены взвешивающие факторы W_T , с помощью которых определяется индивидуальная эффективная эквивалентная доза H_E , Зв.

Из табл. 8.5 видно, например, что при облучении популяции эффективной коллективной дозой $S_E = 10^4$ чел·Зв (10^6 чел·бэр) ожидаемое количество смертных случаев будет равно 165, в том числе 125 за счет соматических и 40 - из-за наследственных эффектов. Сюда не включается риск нелетальных (излечиваемых) опухолей и возможных генетических последствий после второй генерации поколений. Коллективная доза полезна для оценки ущерба здоровью G_H облучаемой популяции

$$G_H = R \int_0^{\infty} H_E N(H_E) dH_E = RS_E, \quad (8.3)$$

где $R = \sum_i r_i$ - суммарный риск на единицу эквивалентной дозы.

Если облучение происходит с изменяющейся в течение периода времени скоростью, то вместо коллективной дозы S_E используют мощность коллективной дозы \dot{S}_E , и тогда

$$\dot{S}_E = \int_0^{\infty} \dot{H}_E N(\dot{H}_E) d\dot{H}_E. \quad (8.4)$$

Естественно, что значения \dot{S}_E могут быть рассчитаны и для заданного промежутка времени путем интегрирования, например, от 0 до T , от T до ∞ , от T_1 до T_2 или по дробным временным интервалам.

Применение изложенного принципа определения ущерба здоровью общества по формуле (8.3) справедливо лишь на уровне сравнительно малых индивидуальных доз, которые не превосходят установленных пределов при нормальных условиях, поскольку взвешивающий фактор w_T определен для стохастических эффектов. При больших индивидуальных дозах облучения (например, при радиационных авариях или лучевой терапии) вступают в силу законы нестохастических эффектов: исчезают линейные зависимости доза - эффект, проявляются специфические особенности в тяжести повреждений и т. д. В этом случае ущерб здоровью определяется на основе индивидуальных (а не коллективных) поглощенных доз.

Применение анализа соотношения затрата - выгода. Третий принцип МКРЗ - принцип ALARA - требует сопоставления (взвешивания) затрат для достижения оптимальных уровней радиационной защиты с той социально-экономической выгодой, которая связана с применением данного вида деятельности. Формально условия оптимизации можно записать в виде уравнения

$$B = V - [P + X(S_E) + Y(S_E)], \quad (8.5)$$

где B - чистая польза от рассматриваемого производства; V - общая польза; P - основная стоимость производства (исключая защиту); $X(S_E)$ - стоимость достижения выбранного уровня безопасности

(включая защиту); $Y(S_E)$ - стоимость ущерба или вреда, связанная с данным видом деятельности при выбранном уровне безопасности (т. е. социально-экономические потери для общества, связанные с недостаточной защищенностью); S_E - коллективная эффективная эквивалентная доза, которая является независимой переменной величиной.

Данный вид деятельности считается оправданным, если чистая польза B имеет положительное значение.

Графически принцип оптимизации представлен на рис. 8.4.

Стоимость достижения выбранного уровня безопасности $X(S_E)$ (включая защиту) увеличивается, если требуется уменьшить эффективную коллективную эквивалентную дозу S_E : чем ниже должен быть уровень облучения, тем выше стоимость дополнительных мер по снижению облучения, а также его измерения и контроля. В особенности это относится к защите населения и окружающей среды. Процедура оптимизации сводится к тому, чтобы чистая польза $B \rightarrow \max$, что приводит к требованию $dB/dS_E = 0$.

На рис. 8.4 виден минимум коллективной эффективной эквивалентной дозы, соответствующий минимальной стоимости. Математическое условие минимума представляется в форме

$$dV/dS_E - [dP/dS_E + dX/dS_E + dY/dS_E] = 0 \quad (8.6)$$

где дифференцирование производится по независимой переменной S_E .

Допуская, что общая польза V и стоимость производства P не зависят от S_E (и, следовательно, dV/dS_E и dP/dS_E равны нулю), условие оптимизации достигается при таком значении S_{E0} , при котором увеличение стоимости на достижение выбранного уровня безопасности X на единицу S_E уравнивается снижением вреда Y на ту же величину, т. е.

$$(dX/dS_E)_{S_{E0}} = -(dY/dS_E)_{S_{E0}} \quad (8.7)$$

Основная трудность в реализации принципа ALARA состоит в сложности выражения пользы и ущерба в адекватных единицах, в особенности когда речь идет об оценке вреда для здоровья. МКРЗ считает

возможным выражать затраты Y , связанные с ущербом, наносимым здоровью излучением, в форме

$$Y = -\alpha S_E, \quad (8.8)$$

где α - коэффициент, характеризующий стоимость затрат на единицу коллективной дозы, выраженный в денежных единицах.

Значение этого коэффициента, полученное различными авторами, лежит в широких пределах - от одной тысячи до нескольких десятков тысяч долларов на 1 чел-Зв. Методический подход к определению коэффициента α является едва ли не ключевым вопросом в дискуссии о применении принципа ALARA на практике. С точки зрения экономиста этот коэффициент определяет не стоимость (или ценность) человеческой жизни, а стоимость затрат на обеспечение мер по снижению облучения до уровня, приемлемого данным обществом. При этом очевидно, что этот, казалось бы, чисто технический вопрос в действительности связан с социальными системами и национальными возможностями. Так, например, применительно к выбору площадок для атомных станций анализ соотношения польза - вред должен учитывать также отчуждение сельскохозяйственных угодий, демографические особенности района и т. д. При анализе польза - вред не избежать и межнациональных (или трансграничных), а также этических проблем.

Нормирование дозовых пределов. Признание беспороговой и линейной зависимости доза - эффект породило проблему приемлемого риска как основы нормирования радиационных факторов в диапазоне низких уровней доз. По мнению МКРЗ, риск, связанный с облучением профессиональных работников, не должен превосходить риска для персонала производств с низкой степенью опасности работ. Таковыми признаны производства, где смертность от профессиональной деятельности, включая несчастные случаи, не превышает 10^{-4} , т. е. 100 смертных случаев на 1 млн-чел. в год. МКРЗ считает, что указанный выше приемлемый уровень риска в наиболее безопасных условиях профессиональной деятельности может быть следующим образом применен для нормирования доз облучения персонала: если принять за годовую предельно допустимую эффективную эквивалентную дозу для лиц из категории А - $H_E = 0,05$ Зв (5 бэр) и полный коэффициент риска смерти от радиации $R = 1,65 \cdot 10^{-2}$ случаев на 1 чел-Зв (см. табл. 8.5), то соответствующий уровень индивидуального радиационного

риска будет равен $R' = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 8,25 \cdot 10^{-4}$ случаев/(чел.- год).

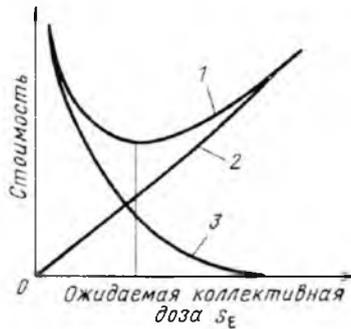


Рис. 8.4. Оптимизация радиационной защиты:

1 - стоимость достижения выбранного уровня безопасности (включая защиту) X + стоимость ущерба, наносимого здоровью Y ; 2 - стоимость ущерба для здоровья в денежном выражении V ; 3 - стоимость достижения выбранного уровня безопасности (включая защиту) X

Эта величина почти на порядок превышает установленный приемлемый уровень риска (10^{-4}). Однако МКРЗ считает, что фактическая средняя доза облучения персонала примерно в 10 раз меньше предельно допустимой дозы, и тогда выполняется требование к приемлемому уровню риска $R' \approx 10^{-4}$ случаев/(чел.-год). Чтобы предотвратить возникновение нестохастических эффектов, МКРЗ рекомендует ограничить годовую эквивалентную дозу для персонала на любой орган не более 0,5 Зв (50 бэр), за исключением хрусталика глаза, для которого установлена $H = 0,15$ Зв (15 бэр). В случае неравномерного облучения оценивается эквивалентная доза для каждого органа или ткани и затем по формуле (6.39) рассчитывается эффективная эквивалентная доза. Так, для персонала при наличии внешних и внутренних источников излучения будем иметь

$$H_E^{макс} = \sum_T w_T H_T \leq 0,05 \text{ Зв (5 бэр)}. \quad (8.9)$$

Для ограниченной части населения, по мнению МКРЗ, приемлемый риск от облучения должен быть меньшим или равным риску, характерному для повседневной жизни, но не больше 0,1 приемлемого риска для персонала, т. е. 10^{-5} и менее (10 и менее смертных случаев

на 1 млн. чел. в год). Это соответствует пределу эффективной эквивалентной дозы для категории Б - $H_E = 5$ мЗв (0,5 бэр). При этом имеется в виду, что средняя фактическая доза будет в 10 раз меньше предела дозы, т.е. $H_E = 0,5$ мЗв (50 мбэр).

Ожидаемая эквивалентная доза для населения интегрируется за 70-летний период.

В рассматриваемых рекомендациях МКРЗ приводятся также уточненные модели метаболизма радионуклидов в организме человека, основанные на современных физических и радиологических данных.

Дозы внутреннего облучения. Основными особенностями метода расчета доз внутреннего облучения, разработанного МКРЗ, являются: использование в качестве основы нормирования эффективной эквивалентной дозы, а также более современных моделей метаболизма радионуклидов в организме человека при пероральном и ингаляционном поступлении; применение новейших физических характеристик и данных условного («стандартного») человека; учет поглощенной энергии в органе-мишени T_M от излучений, испускаемых органом-источником T_H .

Ожидаемая эквивалентная доза в органе-мишени за 50 лет H_{50T_M} Зв/Бк, рассчитывается по формуле [8.7]

$$H_{50T_M} = \frac{1,602 \cdot 10^{-13}}{w} \left[\sum_j N_{Mj} \sum_i E_{эф,j} (T_M \leftarrow T_M) + \sum_{T_H} \sum_j N_{Hj} \sum_i E_{эф,i} (T_M \leftarrow T_H) \right], \quad (8.10)$$

где $w = 1$ Дж/(кг Гр) - энергетический эквивалент грея; индексы j и i относятся к радионуклиду и схеме его распада соответственно; N_M и N_H - число распадов нуклида в мишени и источнике за 50 лет после поступления; $E_{эф,i} (T_M \leftarrow T_M)$ - удельная эффективная энергия за счет самопоглощения излучения в органе-мишени, МэВ/(кг·расп.), определяемая из соотношения

$$E_{эф} (T_M \leftarrow T_M) = \sum_i \frac{n_i F_i E_i (T_M \leftarrow T_M) k_i}{m_{T_M}}; \quad (8.11)$$

$E_{эф}(T_M \leftarrow T_{II})$ - то же за счет поглощения частиц и фотонов в мишени (T_M) от органа-источника, МэВ/(кг·расп.).

Для j -го радионуклида (без учета дочерних элементов)

$E_{эф}(T_M \leftarrow T_{II})$ рассчитывается по формуле

$$E_{эф}(T_M \leftarrow T_{II}) = \sum_i \frac{n_i F_i E_i (T_M \leftarrow T_{II}) k_i}{m_{T_M}} \quad (8.12)$$

В этих формулах суммирование производится по всем видам излучений на один распад j -го радионуклида в T_{II} ; n_i - выход данного излучения на 1 расп., E_i - физическая энергия фотонов, электронов, β^- -частиц (средняя энергия) и α - частиц, МэВ/расп.; F_i - доля поглощенной энергии в ткани-мишени T_M ; k_i - коэффициент качества; m_{T_M} - масса ткани-мишени, кг.

Более подробная методология расчета доз и производных характеристик приведена в соответствующих публикациях МКЗР.

8.4. ОСНОВНЫЕ САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Организация работ с радиоактивными веществами, обеспечивающая максимально возможную безопасность, регламентируется «Санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями». Эти правила обязательны для лабораторий, предприятий и организаций, использующих (или хранящих) радиоактивные изотопы и источники ионизирующих излучений, а также для проектных и строительных организаций, занимающихся постройкой объектов, предназначенных для работы с радиоактивными веществами.

ОСП (например, ОСПОРБ-99) - основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности России, устанавливающие требования по защите людей от вредного радиационного воздействия при всех условиях облучения от источников ионизирующего излучения, на которые распространяется действие НРБ-99.

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99) Санитарные правила СП 2.6.1.799-99 (Дата введения - 1 июля 2000 г.) содержат следующие главы. 1. Область применения; 2. Нормативные ссылки; 3. Термины и определения 4. Общие положения; 5. Радиационная безопасность персонала и населения при эксплуатации техногенных источников излучения; 6. Радиационная безопасность пациентов и населения при медицинском облучении; 7. Радиационная безопасность при воздействии природных источников излучения; 8. Радиационная безопасность при радиационных авариях; 9. Медицинское обеспечение радиационной безопасности; 10. Санкции за нарушение требований норм и правил по радиационной безопасности; Приложения.

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (далее - правила) устанавливают требования по защите людей от вредного радиационного воздействия при всех условиях облучения от источников ионизирующего излучения, на которые распространяется действие НРБ-99. Правила являются обязательными для исполнения на территории РФ всеми юридическими лицами, независимо от их подчиненности и формы собственности, в результате деятельности которых возможно облучение людей, а также для администрации субъектов РФ, местных органов власти, граждан РФ, иностранных граждан и лиц без гражданства, проживающих на территории РФ. Правила распространяются на все организации, проектирующие, добывающие, производящие, хранящие, использующие, транспортирующие, перерабатывающие и захоранивающие радиоактивные вещества и другие источники излучения, организации, осуществляющие монтаж, ремонт и наладку приборов, установок и аппаратов, действие которых основано на использовании ионизирующего излучения, и устройств, генерирующих ионизирующее излучение, а также организации, от деятельности которых зависит уровень облучения людей природными источниками излучения, и организации, выполняющие работы на территории, загрязненной радиоактивными веществами. Правила являются обязательными при проектировании, строительстве, эксплуатации, реконструкции, перепрофилировании и выводе из эксплуатации радиационных объектов. Настоящими правилами должны руководствоваться в своей работе органы исполнительной власти, уполномоченные осуществлять государственный надзор и контроль в области обеспечения радиационной безопасности (далее - органы надзора за радиационной безопасностью), специальные службы, осуществляющие контроль за безопасностью. Нормативные правовые акты в

области обеспечения радиационной безопасности, принимаемые федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления, решения юридических лиц по указанным вопросам, государственные стандарты, строительные нормы и правила, правила охраны труда, ветеринарные правила не должны противоречить положениям настоящих правил.

Источники излучения подлежат обязательному учету и контролю. От радиационного контроля и учета полностью освобождаются: электрофизические устройства, генерирующие ионизирующее излучение с максимальной энергией не более 5 кэВ; другие электрофизические устройства, генерирующие ионизирующее излучение, в условиях нормальной эксплуатации которых мощность эквивалентной дозы в любой доступной точке на расстоянии 0,1 м от поверхности аппаратуры не превышает 1,0 мкЗв/ч; продукция, товары, содержащие радионуклиды, на которые имеется санитарно-эпидемиологическое заключение органов государственного санитарно-эпидемиологического надзора о том, что создаваемые ими дозы облучения не могут превышать значения, приведенные в п. 1.4 НРБ-99.

Организациям, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим деятельность в области обращения с источниками излучения, необходимо иметь специальное разрешение (лицензию) на право проведения этих работ, выданное органами, уполномоченными на ведение лицензирования.

Разрешение на работу с источниками излучения не требуется в случаях, если: на рабочем месте удельная активность радионуклидов меньше минимально значимой удельной активности (МЗУА), или активность радионуклида в открытом источнике излучения меньше минимально значимой активности (МЗА), приведенных в приложении П-4 НРБ-99, или сумма отношений активности радионуклида к их табличным значениям меньше 1, а в организации: общая активность радионуклидов в открытых источниках излучения не превышает более чем в 10 раз МЗА или сумму отношений активности разных радионуклидов к их табличным значениям, приведенным в приложении П-4 НРБ-99; мощность эквивалентной дозы в любой точке, находящейся на расстоянии 0,1 м от поверхности закрытого радионуклидного источника излучения, не превышает 1,0 мкЗв/ч над фоном. При этом должна быть обеспечена надежная герметизация находящихся внутри устройства радиоактивных веществ, а его нормативно - техническая докумен-

тация иметь санитарно-эпидемиологическое заключение органов государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

В заключение отметим, что обсуждаемые здесь Нормы и правила – далеко не единственные в России. Существует и множество других, например, «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97», «Правила безопасности при обращении с радиоактивными отходами атомных станций. НР-002-97», «Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных станций. НП-004-97».

ГЛАВА 9. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

9.1. ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

9.1.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение - электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-2} до 10^2 \AA (от 10^{-12} до 10^{-8} м) [9.1].

Энергетические диапазоны рентгеновского излучения и γ -излучения перекрываются в широкой области энергий. Оба типа излучения являются электромагнитным излучением и при одинаковой энергии фотонов - эквивалентны. Терминологическое различие лежит в способе возникновения - рентгеновские лучи испускаются при участии электронов (либо связанных в атомах, либо свободных) в то время как γ -излучение испускается в процессах довозбуждения атомных ядер. Фотоны рентгеновского излучения имеют энергию от 100 эВ до 250 кэВ, что соответствует излучению с частотой от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{19}$ Гц и длиной волны 0,005 – 10 нм (общепризнанного определения нижней границы диапазона рентгеновских лучей в шкале длин волн не существует). Мягкое рентгеновское излучение характеризуется наименьшей энергией фотона и частотой излучения (и наибольшей длиной волны), а жёсткое рентгеновское излучение обладает наибольшей энергией фотона и частотой излучения (и наименьшей длиной волны). Жёсткое рентгеновское излучение используется преимущественно в промышленных целях.

Естественные источники рентгеновского излучения. В процессе рентгеновских исследований естественных источников излучения установлено [9.2], что многие известные классы астрофизических объектов излучают в рентгеновском диапазоне. Кроме того, обнаружены новые классы астрофизических объектов, ранее неизвестных. Ниже рассмотрены различные типы естественных источников рентгеновского излучения.

Солнце. Излучение солнца имеет электромагнитную колебательную природу, носит непрерывный характер и имеет в спектре рентгеновское излучение с длиной волны ниже 2 нм. Излучают в рент-

гене корона и хромосферные вспышки. Светимость короны в рентгеновском диапазоне - $(10^{-6} \div 10^{-7}) L_{\odot}$, $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{33}$ эрг/с.

Нормальные звезды. Рентгеновское излучение связано с коронами. Отношение рентгеновской светимости к оптической возрастает от $(10^{-6} \div 10^{-8})$ у О-В звезд до 10^{-3} у звезд класса М-О. Связь простая. Мощность короны зависит от величины магнитного поля, магнитное поле генерируется конвективной оболочкой, а наиболее развитыми конвективными оболочками обладают самые холодные звезды.

Переменные звезды типа RS Гончих Псов. Эти затменно-переменные звезды характеризуются фотометрической активностью, связанной с пятнами на поверхности звезды. Рентгеновское излучение возникает в высокотемпературной короне, связанной с активными областями на главной компоненте, и во время вспышек, аналогичных солнечным. Постоянная рентгеновская светимость $L_X = 10^{30}$ эрг/с (Капелла) - 10^{32} эрг/с (σ Gem). Во время вспышек L_X увеличивает-ся в несколько раз.

Затменно-двойные звезды. В некоторых двойных звездах одна из компонент имеет звездный ветер. Вещество ветра формирует ударный фронт при столкновении со второй звездой. Температура за фронтом ударной волны $\sim 10^6$ К, и вещество при таких температурах излучает в рентгеновском диапазоне спектра. Пример: Алголь (β Per) $L_X = 10^{30} \div 10^{31}$ эрг/с.

Вспыхивающие звезды и звезды типа T Тау. Вспыхивающие звезды типа UV Cet и неправильные переменные звезды, находящиеся на стадии эволюции до главной последовательности (типа T Tau), также являются источниками рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение этих классов звезд может быть связано с магнитными явлениями типа вспышек в их атмосферах, либо с формированием ударного фронта в атмосфере в процессе аккреции вещества (у звезд типа T Tau). Постоянное рентгеновское излучение $\approx 10^{30} \div 10^{31}$ эрг/с, отношение рентгеновской светимости к оптической $\sim 10^{-8}$ и повышается во время вспышек.

Остатки сверхновых. Все остатки сверхновых являются источниками рентгеновского излучения. Различают несколько типов рентгеновского излучения в остатках сверхновых. Перионы - остатки,

имеющие в центре активные пульсары, поставляющие быстрые электроны, излучают за счет рентгеновского "хвоста" синхротронного излучения. Это, например, Крабовидная туманность, т.е. сравнительно молодые остатки сверхновых. Более старые остатки излучают в рентгене, когда разлетающаяся оболочка начинает взаимодействовать с межзвездной средой, формируя ударный фронт, нагретый до 10^7 К. Рентгеновская светимость Краба $\sim 10^{37}$ эрг/с, оболочечных остатков $\approx 10^{34} \div 10^{35}$ эрг/с.

Фоновое излучение. Все небо является слабым источником рентгеновского излучения. В мягкой области оно обусловлено тепловым излучением ($\sim 10^6$ К) корональной компоненты межзвездного газа, а в более жесткой области - слабыми неразрешенными источниками. Полная рентгеновская светимость фонового излучения Галактики $\sim 10^{38}$ эрг/с.

Рентгеновские туманности. Рентгеновское излучение обусловлено взаимодействием звездного ветра от звезд высокой светимости с межзвездной средой в ОВ ассоциациях. Рентгеновская светимость туманности в созвездии Киля $\sim 10^{36}$ эрг/с и обусловлена ветром от 15 звезд классов O и WR.

Галактики со вспышками звездообразования. Являются источниками повышенной рентгеновской светимости из-за обилия в них остатков сверхновых и горячих молодых звезд. Светимости этих галактик в рентгене $\sim 10^{41}$ эрг/с.

Ядра активных галактик и квазары. Вероятнее всего, рентгеновское излучение квазаров и сейфертовских галактик связано с аккреционными дисками вокруг сверхмассивных черных дыр в их центре. Рентгеновская светимость увеличивается от 10^{42} эрг/с у сейфертовских галактик до 10^{47} эрг/с у квазаров. Рентгеновское излучение радиогалактик связано с облаками горячих электронов, выбрасываемых из ядра. Их светимость $\sim 10^{43}$ эрг/с. Рентгеновские спектры большинства активных ядер и квазаров - степенные и формируются, по видимому, в процессе обратного комптоновского рассеяния.

Скопления галактик. Рентгеновское излучение скоплений галактик связано с горячим межгалактическим газом ($T = 10^7 \div 10^8$ К). Светимость этого газа в скоплениях $L_x = 10^{43}$ эрг/с (скопления в

Деве и в Персее). Горячий газ образовался на стадии формирования галактик и остывает крайне медленно ввиду малой плотности.

Описанные источники естественного рентгеновского излучения почерпнуты в [], Там же упомянуты и другие, менее значимые источники рентгеновского излучения: *рентгеновские пульсары* (со светимостью от 10^{35} до 10^{39} эрг/с); *барстеры* (со светимостью во время вспышки $\sim 10^{38}$ эрг/с, в спокойном состоянии $\approx 10^{36} \div 10^{37}$ эрг/с); *Суг X-1 и подобные ему источники* (со светимостью $\sim 10^{37}$ эрг/с); *маломассивные рентгеновские двойные источники - Low-Mass X-ray Binaries (LMXB)* (со светимостью $\sim 10^{38}$ эрг/с) и др.

Из приведённых примеров следует, что естественное рентгеновское излучение представляет значительную величину, существенно варьируется в зависимости разное время в связи с изменением космических и земных условий.

Искусственные источники рентгеновского излучения. Источниками рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, некоторые радиоактивные изотопы, ускорители (бетатрон) и накопители электронов (синхротронное излучение), лазеры и др.

Рентгеновская трубка - электровакуумный прибор для получения рентгеновских лучей.

Простейшая рентгеновская трубка состоит из стеклянного баллона с впаянными электродами - катодом и анодом (антикатодом). Электроны, испускаемые катодом, ускоряются сильным электрическим полем в пространстве между электродами и бомбардируют анод. При ударе электронов об анод их кинетическая энергия частично преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Важным компонентом рентгеновской трубки является электронная пушка (электронный прожектор), устройство для создания направленного потока электронов; применяется в телевизионных трубках, рентгеновской аппаратуре, электронных микроскопах.

Таким образом, чтобы получать рентгеновское излучение за счет взаимодействия электронов с веществом, нужно иметь источник электронов, средства их ускорения до больших скоростей и мишень, способную выдерживать электронную бомбардировку и давать рентгеновское излучение нужной интенсивности. Устройство, в котором все это есть, называется рентгеновской трубкой. В газоразрядных трубках содержится небольшое количество газа, и когда на электроды трубки подается большая разность потенциалов, атомы газа превращаются в по-

ложительные и отрицательные ионы. Положительные движутся к отрицательному электроду (катоде) и, падая на него, выбивают из него электроны, а они, в свою очередь, движутся к положительному электроду (аноду) и, бомбардируя его, создают поток рентгеновских фотонов.

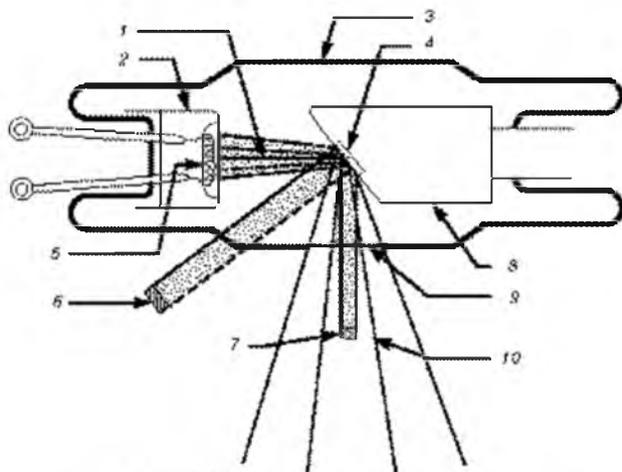


Рис. 9.1. Рентгеновская трубка:

1 – электронный пучок; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянная оболочка (трубка); 4 – вольфрамовая мишень (антикатод); 5 – нить накала; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение.

В рентгеновской трубке (рис. 9.1), источником электронов является вольфрамовый катод, нагреваемый до высокой температуры. Электроны ускоряются до больших скоростей высокой разностью потенциалов между анодом (или антикатодом) и катодом. Поскольку электроны должны достичь анода без столкновений с атомами, необходим очень высокий вакуум, для чего нужно хорошо откачать трубку. Электроны фокусируются на аноде с помощью электрода особой формы, окружающего катод. Этот электрод называется фокусирующим и вместе с катодом образует «электронный прожектор» трубки. Подвергаемый электронной бомбардировке анод должен быть изготовлен из тугоплавкого материала, поскольку большая часть кинетической энергии бомбардирующих электронов превращается в тепло. Кроме того, желательно, чтобы анод был из материала с большим атомным номером, т.к. выход рентгеновского излучения растет с увеличением атом-

ного номера. В качестве материала анода чаще всего выбирается вольфрам, атомный номер которого равен 74.

Конструкция рентгеновских трубок может быть разной в зависимости от условий применения и предъявляемых требований. Рентгеновские трубки различаются по типу конструкции, способу получения пучка электронов, его фокусировки, вакуумированию, охлаждению анода, размерам и форме фокуса (области излучения на поверхности анода) и др. Наиболее широко применяются отпаянные рентгеновские трубки с термоэмиссионным катодом, водяным охлаждением анода, электростатической фокусировкой электронов. Термоэмиссионный катод рентгеновской трубки обычно представляет собой спираль или прямую вольфрамовую нить, накаливаемую электрическим током. Рабочий участок анода – металлическая зеркальная поверхность – расположен перпендикулярно или под некоторым углом к электронному пучку. Для получения сплошного тормозного спектра рентгеновского излучения высоких энергий и интенсивностей служат аноды из Au, W; в структурном анализе используются рентгеновские трубки из Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Ag. Наиболее распространены рентгеновские трубки с неподвижным либо вращающимся водоохлаждаемым анодом мощностью в несколько кВт. Материалы анодов (и их длина волны, λ) – Cu (1,33 нм), Al (0,834 нм), Mo (0,54 нм), Pd (0,434 нм).

Радиоактивные изотопы. Одни могут непосредственно испускать рентгеновское излучение, другие испускают электроны и альфа-частицы, генерирующие рентгеновское излучение при бомбардировке металлических мишеней. Интенсивность рентгеновского излучения радиоактивных источников обычно значительно меньше, чем рентгеновской трубки (за исключением радиоактивного кобальта, используемого в дефектоскопии и дающего излучение очень малой длины волны – гамма-излучение), они малогабаритны и не требуют электроэнергии. Синхротронное рентгеновское излучение получают в ускорителях электронов, длина волны этого излучения значительно превышает получаемую в рентгеновских трубках (мягкое рентгеновское излучение), интенсивность его на несколько порядков выше интенсивности излучения рентгеновских трубок. Есть и природные источники рентгеновского излучения. Радиоактивные примеси обнаружены во многих минералах, зарегистрировано рентгеновское излучение космических объектов, в том числе и звезд.

Бетатрон – циклический ускоритель электронов, в котором электроны ускоряются вихревым электрическим полем, порожденным

переменным магнитным полем. Обычно энергия электронов в бетатроне не выше 50 МэВ.

Линейный ускоритель - ускоритель заряженных частиц, в котором траектории частиц близки к прямой линии. Максимальная энергия электронов, полученная в линейном ускорителе, 20 ГэВ, протонов до 800 МэВ. В линейном ускорителе электронов электроны впрыскиваются в трубку ускорителя и разгоняются там с помощью электромагнитного поля высокой частоты. Может быть использован как источник рентгеновского излучения. С этой целью пучок электронов направляется на мишень, изготовленную из тяжелого тугоплавкого металла. В результате взаимодействия электрона с ядром атома мишени образуется фотон, а электрон отражается с меньшей энергией. Пучок фотонов, с энергией соответствующей рентгеновскому излучению, проходит через выравнивающий фильтр, лучу придается нужная форма с помощью коллиматора.

9.1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение возникает при взаимодействии электронов, движущихся с большими скоростями, с веществом. Когда электроны соударяются с атомами какого-либо вещества, они быстро теряют свою кинетическую энергию. При этом большая ее часть переходит в тепло, а небольшая доля, обычно менее 1 %, преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Эта энергия высвобождается в форме квантов – частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией, но масса покоя которых равна нулю. Рентгеновские фотоны различаются своей энергией, обратно пропорциональной их длине волны. При обычном способе получения рентгеновского излучения получают широкий диапазон длин волн, который называют рентгеновским спектром. В спектре присутствуют ярко выраженные компоненты, как это показано на рис. 9.2. Широкий «континуум» называют непрерывным спектром или белым излучением. Наложенные на него острые пики называются характеристическими рентгеновскими линиями испускания. Хотя весь спектр есть результат столкновений электронов с веществом, механизмы возникновения его широкой части и линий разные. Вещество состоит из большого числа атомов, каждый из которых имеет ядро, окруженное электронными оболочками, причем каждый электрон в оболочке атома данного элемента занимает некоторый дискретный уровень энергии.

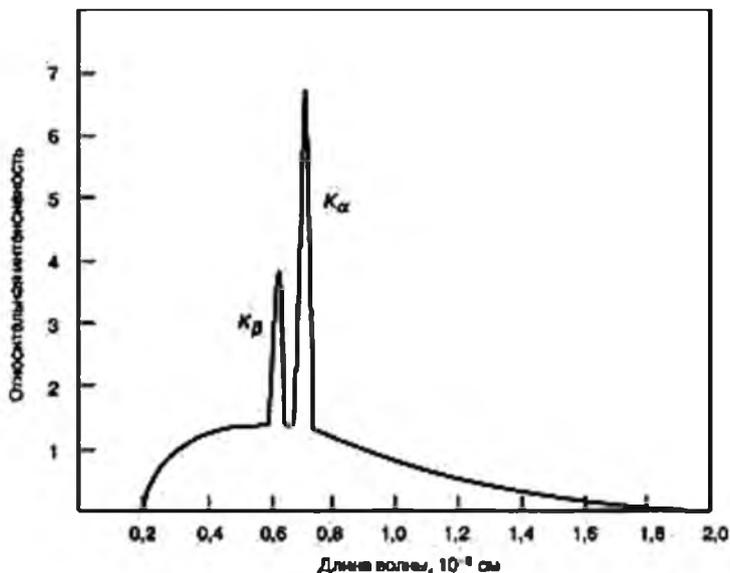


Рис. 9.2. Типичный спектр излучения, испускаемого рентгеновской трубкой

Обычно эти оболочки, или энергетические уровни, обозначают символами К, L, М и т.д., начиная от ближайшей к ядру оболочки. Когда налетающий электрон, обладающий достаточно большой энергией, соударяется с одним из связанных с атомом электронов, он выбивает этот электрон с его оболочки. Обычный рентгеновский спектр состоит из непрерывного спектра (континуума) и характеристических линий (острые пики). Линии K_{α} и K_{β} возникают вследствие взаимодействий ускоренных электронов с электронами внутренней К-оболочки. Опустевшее место занимает другой электрон с оболочки, которой соответствует большая энергия. Этот последний отдает избыток энергии, испуская рентгеновский фотон.

Поскольку электроны оболочек имеют дискретные значения энергии, возникающие рентгеновские фотоны тоже обладают дискретным спектром. Этому соответствуют острые пики для определенных длин волн, конкретные значения которых зависят от элемента-мишени. Характеристические линии образуют К-, L- и М-серии, в зависимости от того, с какой оболочки (К, L или М) был удален электрон. Соотно-

шение между длиной волны рентгеновского излучения и атомным номером называется законом Мозли (рис. 9.3).

Длина волны характеристического рентгеновского излучения, испускаемого химическими элементами, зависит от атомного номера элемента. Кривая соответствует закону Мозли: чем больше атомный номер элемента, тем меньше длина волны характеристической линии.

Если электрон наталкивается на относительно тяжелое ядро, то он тормозится, а его кинетическая энергия выделяется в виде рентгеновского фотона примерно той же энергии. Если же он пролетит мимо ядра, то потеряет лишь часть своей энергии, а остальную будет передавать попадающим на его пути другим атомам. Каждый акт потери энергии ведет к излучению фотона с какой-то энергией. Возникает непрерывный рентгеновский спектр, верхняя граница которого соответствует энергии самого быстрого электрона. Таков механизм образования непрерывного спектра, а максимальная энергия (или минимальная длина волны), фиксирующая границу непрерывного спектра, пропорциональна ускоряющему напряжению, которым определяется скорость налетающих электронов. Спектральные линии характеризуют материал бомбардируемой мишени, а непрерывный спектр определяется энергией электронного пучка и практически не зависит от материала мишени.

Характеристическое рентгеновское излучение поликристаллического анода рентгеновской трубки распространяется в пространстве изотропно, тогда как распространение тормозного рентгеновского излучения анизотропно. При малых напряжениях на рентгеновской трубке (до 20 – 30 кВ) тормозное рентгеновское излучение имеет максимальную интенсивность в направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению движения электронов, возбуждающих рентгеновское излучение. При очень высоких напряжениях на рентгеновской трубке (более нескольких сотен тысяч кВ) почти все излучение распространяется в направлении движения пучка электронов и выходит наружу через пластинку анода.

Рентгеновское излучение можно получать не только электронной бомбардировкой, но и облучением мишени рентгеновским же излучением от другого источника. В этом случае, однако, большая часть энергии падающего пучка переходит в характеристический рентгеновский спектр и очень малая ее доля приходится на непрерывный. Очевидно, что пучок падающего рентгеновского излучения должен содержать фотоны, энергия которых достаточна для возбуждения характеристических линий бомбардируемого элемента. Высокий процент энергии, приходящейся на характеристический спектр, делает такой способ

возбуждения рентгеновского излучения удобным для научных исследований.

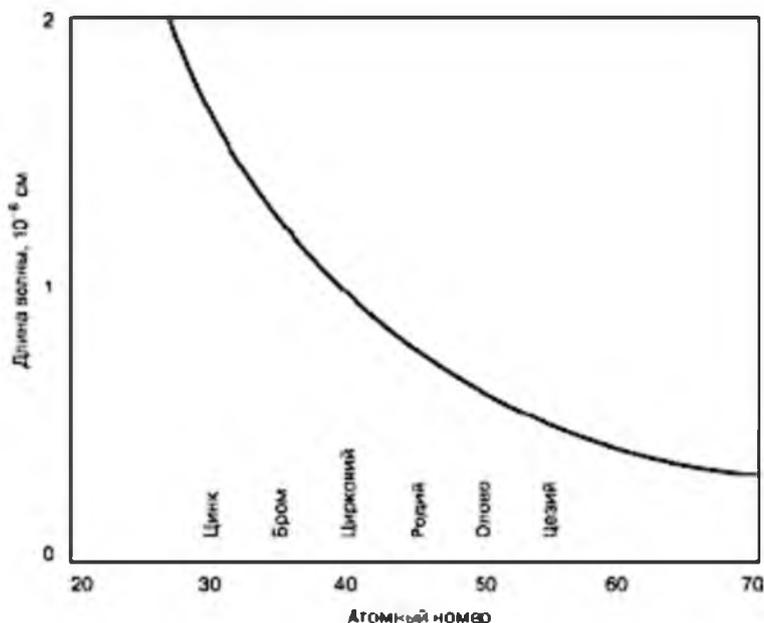


Рис. 9.3. Зависимость длины волны рентгеновского излучения от заряда ядра элемента мишени

9.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

9.2.1. ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение воздействует на биологические объекты и человека как негативно, так и позитивно, в зависимости от дозы облучения. Рентгеновское излучение отличаются следующие особенности: ионизует биологические ткани; обладает прямолинейностью распространения, проникающим эффектом и поглотительной способностью; способствует флюоресценции люминофоров; производит фотохимический эффект; невосприимчиво органами чувств.

Рентгеновские лучи проходят через непрозрачные тела и предметы, такие как, например, бумага, материя, дерево, ткани человеческого и животного организма и даже через металлы незначительной толщины. Причем, чем короче длина волны излучения, тем легче они проходят через перечисленные тела и предметы. В свою очередь, при прохождении этих лучей через тела и предметы с различной плотностью они частично поглощаются. Плотные тела поглощают рентгеновские лучи более интенсивно, чем тела малой плотности.

Рентгеновские лучи обладают биологическим действием на организм. Проходя через определенный участок тела, они производят в тканях и клетках соответствующие изменения в зависимости от вида ткани и количества поглощенных ими лучей, т. е. дозы.

Это свойство используется для лечения целого ряда заболеваний человека и животных. При воздействии больших доз рентгеновских лучей в организме получается целый ряд функциональных и морфологических изменений, и возникает специфическое заболевание — лучевая болезнь.

Рентгеновские лучи, кроме того, обладают способностью ионизировать воздух, т. е. расщеплять составные части воздуха на отдельные, электрически заряженные частицы.

В результате этого воздух становится электропроводным. Это свойство используется для определения количества рентгеновских лучей.

9.2.2. ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Вредное биологическое действие рентгеновского излучения обнаружилось вскоре после его открытия Рентгеном. Оказалось, что новое излучение может вызвать что-то вроде сильного солнечного ожога (эритему), сопровождающееся, однако, более глубоким и стойким повреждением кожи. Появлявшиеся язвы нередко переходили в рак. Во многих случаях приходилось ампутировать пальцы или руки. Случались и летальные исходы. Было установлено, что поражения кожи можно избежать, уменьшив время и дозу облучения, применяя экранировку (например, свинец) и средства дистанционного управления. Но постепенно выявились и другие, более долговременные последствия рентгеновского облучения, которые позднее были подтверждены и изучены на подопытных животных.

К эффектам, обусловленным действием рентгеновского излучения, относятся: 1) временные изменения в составе крови после относительно небольшого избыточного облучения; 2) необратимые изменения в составе крови (гемолитическая анемия) после длительного избыточного облучения; 3) рост заболеваемости раком (включая лейкемию); 4) более быстрое старение и ранняя смерть; 5) возникновение катаракт; 6) Генетические мутации.

Ко всему прочему, биологические эксперименты на мышах, кроликах и мушках (дрозофилах) показали, что даже малые дозы систематического облучения больших популяций вследствие увеличения темпа мутации приводят к вредным генетическим эффектам. Большинство генетиков признает применимость этих данных и к человеческому организму. Что же касается биологического воздействия рентгеновского излучения на человеческий организм, то оно определяется уровнем дозы облучения, а также тем, какой именно орган тела подвергался облучению.

Накопление знаний о воздействии рентгеновского излучения на организм человека привело к разработке национальных и международных стандартов на допустимые дозы облучения, опубликованных в различных справочных изданиях. Согласно проведенным исследованиям НКАДАР ООН, облучение, получаемое человеком при медицинском обследовании, занимает второе место в мире. Первая позиция отдана естественному радиационному фону на планете. За последние несколько лет прослеживаются тенденции роста количества получаемого излучения в медицинских целях. В статистических данных фигурирует 50 % получаемого рентгеновского воздействия на человека от всей части других очагов. Основной причиной подобного роста является использование компьютерных аппаратов для томографии. При этом страдает по большей части обслуживающий персонал, в то время как пациенты получают допустимую норму радиации. В РФ фиксируется 30 % радиационного заражения среди медицинского персонала. Большая часть облучения приходится на использование рентгеновских кабинетов и лишь небольшая доля - на флюорографические исследования.

Как и в случае других видов ионизирующего излучения, опасным считается только рентгеновское излучение определенной интенсивности, которое воздействует на организм человека в течение достаточно долгого промежутка времени.

9.2.3. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Статистика утверждает, что примерно 70% всех диагнозов можно поставить или подтвердить с помощью рентгена. Это исследование позволяет не только правильно определить недуг, но и вычислить площадь пораженных участков, серьезность патологии и стадию болезни. Без его использования достаточно трудно определить, нуждается ли больной в оперативном вмешательстве. В связи с этим рентгеновское излучение широко используется в медицине, что можно считать положительным явлением, если при этом осуществлять жёсткий контроль за уровнем воздействующего излучения.

Рентгеновского излучения в медицине. В медицине рентгеновское излучение применяется в диагностических и терапевтических целях.

Рентгенодиагностика - методы получения изображений внутренних органов с использованием рентгеновских лучей.

Физической основой этих методов является закон ослабления рентгеновского излучения в веществе. Однородный по сечению поток рентгеновского излучения после прохождения *неоднородной ткани* становится неоднородным. Эта неоднородность может быть зафиксирована на фотопленке, флуоресцирующем экране или с помощью матричного фотоприемника. Например, массовые коэффициенты ослабления костной ткани - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - и мягких тканей - в основном H_2O - различаются в 68 раз ($\mu_{\text{м кости}} / \mu_{\text{м воды}} = 68$). Плотность кости также выше плотности мягких тканей. Поэтому на рентгеновском снимке получается светлое изображение кости на более темном фоне мягких тканей.

Если исследуемый орган и окружающие его ткани имеют близкие коэффициенты ослабления, то применяют специальные *контрастные вещества*. Так, например, при рентгеноскопии желудка обследуемый принимает кашеобразную массу сульфата бария (BaSO_4), у которого массовый коэффициент ослабления в 354 раза больше, чем у мягких тканей.

Для диагностики используют рентгеновское излучение с энергией фотонов 60-120 кэВ. В медицинской практике используют следующие методы рентгенодиагностики:

1. **Рентгеноскопия.** Изображение формируется на флуоресцирующем экране. Яркость изображения невелика, и его можно рассматривать только в затемненном помещении. Врач должен быть защищен

от облучения. Достоинством рентгеноскопии является то, что она проводится в реальном режиме времени. Недостаток - большая лучевая нагрузка на больного и врача (по сравнению с другими методами). Современный вариант рентгеноскопии - *рентгенотелевидение* - использует усилители рентгеновского изображения. Усилитель воспринимает слабое свечение рентгеновского экрана, усиливает его и передает на экран телевизора. В результате резко уменьшилась лучевая нагрузка на врача, повысилась яркость изображения и появилась возможность видеозаписи результатов обследования.

2. **Рентгенография.** Изображение формируется на специальной пленке, чувствительной к рентгеновскому излучению. Снимки производятся в двух взаимно перпендикулярных проекциях (прямая и боковая). Изображение становится видимым после фотообработки. Готовый высушенный снимок рассматривают в проходящем свете.

При этом удовлетворительно видны детали, контрастности которых отличаются на 1-2 %.

В некоторых случаях перед обследованием пациенту вводится специальное *контрастное вещество*. Например, йодсодержащий раствор (внутривенно) при исследовании почек и мочевыводящих путей.

Достоинствами рентгенографии являются высокое разрешение, малое время облучения и практически полная безопасность для врача. К недостаткам относится статичность изображения (объект нельзя проследить в динамике).

3. **Флюорография.** При этом обследовании изображение, полученное на экране, фотографируется на чувствительную малоформатную пленку. Флюорография широко используется при массовом обследовании населения. Если на флюорограмме находят патологические изменения, то пациенту назначают более детальное обследование.

4. **Электрорентгенография.** Этот вид обследования отличается от обычной рентгенографии способом фиксации изображения. Вместо пленки используют *селеновую пластину*, которая электризуется под действием рентгеновских лучей. В результате возникает скрытое изображение из электрических зарядов, которое можно сделать видимым и перенести на бумагу.

5. **Ангиография.** Этот метод применяется при обследовании кровеносных сосудов. Через катетер в вену вводится контрастное вещество, после чего мощный рентгеновский аппарат выполняет серию снимков, следующих друг за другом через доли секунды.

6. **Рентгеновская компьютерная томография.** Этот вид рентгеновского обследования позволяет получить изображение плоского

сечения тела толщиной несколько мм. При этом заданное сечение многократно просвечивается под разными углами с фиксацией каждого отдельного изображения в памяти компьютера.

Подавляющее большинство медицинских обследований в которых применяется рентгенологическое излучение, используют рентгеновские лучи с низкой энергией и облучают тело человека очень малые промежутки времени в связи с чем, даже при их многократном повторении они считаются практически безвредными для человека.

Дозы рентгеновского излучения, которые используются в обычном рентгене грудной клетки или костей конечностей не могут вызвать никаких немедленных побочных эффектов и лишь очень незначительно (не более чем на 0,001%) повышают риск развития рака в будущем.

В случае рентгеновского излучения, носителем излучения являются электромагнитные волны, которые исчезают сразу после выключения рентгеновского аппарата и не способны накапливаться в организме человека, как это происходит в случае различных радиоактивных химических веществ (например, радиоактивный йод). В связи с тем, что действие рентгеновского излучения на организм человека заканчивается сразу после завершения обследования, а сами по себе лучи не накапливаются в организме человека и не приводят к образованию радиоактивных веществ, никаких процедур или лечебных мероприятий для «вывода радиации из организма» после рентгена проводить не нужно.

В случае, когда пациент был подвержен обследованию с использованием радионуклидов, следует уточнить у врача, какое именно вещество было использовано, каков период его полураспада и каким путем оно выводится из организма. На основе данной информации врач посоветует план мероприятий по выводу радиоактивного вещества из организма. [9.4]

Рентгеновское излучение естественно не применяется в дозах, способных вызвать пороговые эффекты, а вот *беспороговые эффекты* (канцерогенное, мутагенное действие и т.д.), не требующие высоких доз вполне вероятны [9.5].

9.3. НОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

9.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для обеспечения радиационной безопасности в организации, производственная деятельность которой заключается в обращении с техногенными источниками ионизирующего излучения, персонал организации делится на две группы - А и Б.

К группе А относятся сотрудники, непосредственно занятые в проведении рентгенодиагностических исследований (врачи - рентгенологи, рентгенолаборанты, санитарки, инженеры и техники по наладке и эксплуатации рентгеновской аппаратуры).

К группе Б относятся сотрудники, находящиеся по условиям работы в сфере действия ионизирующего излучения: сотрудники, работающие в смежных с рентгеновским кабинетом помещениях, специалисты, не входящие по должностным обязанностям в штат рентгеновского отделения, но участвующие в проведении рентгеновских исследований.

Таблица 9.1

Основные пределы доз

Нормируемые величины	Пределы доз		
	Персонал группы А	Персонал группы Б	Лица из населения
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	5 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, коже, кистях и стопах	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	38 мЗв 125 мЗв 125 мЗв	15 мЗв 50 мЗв 50 мЗв

Примечания:

*допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам;

основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории персонал приводятся только для группы А; *относится к дозе на глубине 300 мг/см²;

****относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см² иод покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя - 40 мг/см². Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см² площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает не превышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.

Принцип нормирования облучения персонала и населения реализуется установлением и соблюдением пределов дозы. Годовые дозы техногенного облучения у персонала групп А и Б и населения не должны превышать соответствующих основных пределов дозы, установленных НРБ-99/2009, значения которых приведены в табл. 9.1 [9.2].

Пределы годовой дозы у населения (табл. 9.1) применяются к лицам (не персоналу), находящимся в зоне воздействия излучения при работе рентгеновских аппаратов.

Годовая доза в 5 мЗв ограничивается у лиц, добровольно и сознательно оказывающих помощь в поддержке пациентов (тяжелобольных, детей и др.) при выполнении рентгенологических исследований.

Годовая доза в 1 мЗв ограничивается у лиц, проходящих медицинские рентгенологические исследования в связи с:

- а) профессиональной деятельностью, включая призыв на военную службу (без специальных медицинских показаний);
- б) проведением медико-юридических процедур;
- в) профилактическими обследованиями;
- г) добровольным участием в медико-биологических научных исследованиях.

Принцип нормирования в отношении медицинского облучения пациентов при проведении рентгенологических процедур не применяется.

Доза поглощенная (D) - величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$\bar{D} = \frac{\overline{de}}{dm},$$

где: \overline{de} - средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, к массе вещества \overline{dm} в этом объеме.

Единица поглощенной дозы - грей, Гр (1 Гр = 1 Дж/кг). Используемая ранее внесистемная единица поглощенной дозы – рад равна 0,01 Гр.

Доза эквивалентная H - поглощенная доза в органе или ткани D , умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W :

$$H = W \cdot D.$$

Для рентгеновского излучения $W = 1$. Единица эквивалентной дозы – зиверт (Зв). Использовавшаяся ранее внесистемная единица бэр равна 0,01 Зв или 1 Зв = 100 бэр.

Доза эффективная E - величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях H на соответствующие взвешивающие коэффициенты W :

$$E = \sum W \cdot H .$$

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

Система обеспечения радиационной безопасности при проведении медицинских рентгенологических исследований должна предусматривать практическую реализацию трех основополагающих принципов радиационной защиты - нормирования, обоснования и оптимизации.

Принцип нормирования реализуется установлением гигиенических нормативов (допустимых пределов доз) облучения.

Для работников (персонала) средняя годовая эффективная доза равна 20 мЗв (0,02 Зв) или эффективная доза за период трудовой деятельности (50 лет) - 1 Зв; допустимо облучение в годовой эффективной дозе до 50 мЗв (0,05 Зв) при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 20 мЗв. Для женщин в возрасте до 45 лет эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц.

Для практически здоровых лиц годовая эффективная доза при проведении профилактических медицинских рентгенологических процедур не должна превышать 1 мЗв (0,001 Зв).

Принцип обоснования при проведении рентгенологических исследований должен реализовываться с учетом следующих требований: приоритетное использование альтернативных (нерадиационных) методов; проведение исследований только по клиническим показаниям; выбор наиболее щадящих методов рентгенологических исследований; риск отказа от рентгенологического исследования должен заведомо превышать риск от облучения при его проведении.

Принцип обоснования при проведении рентгенотерапии должен реализовываться с учетом следующих требований: использование метода только в случаях, когда ожидаемая эффективность лечения с учетом сохранения функций жизненно важных органов превосходит эф-

фektivность альтернативных (нерадиационных) методов; риск отказа от рентгенотерапии должен заведомо превышать риск от облучения при ее проведении.

Принцип оптимизации или ограничения уровней облучения при проведении рентгенологических исследований осуществляется путем поддержания доз облучения на таких низких уровнях, какие возможно достичь при условии обеспечения необходимого объема и качества диагностической информации или терапевтического эффекта, с учетом экономических и социальных факторов.

Значения допустимой мощности эффективной дозы (ДМЭД), мкЗв/ч рассчитываются, исходя из основных пределов годовой дозы для соответствующих категорий облучаемых лиц (табл. 9.1, [9.2]) и возможной продолжительности их пребывания в помещениях и на территориях различного назначения по формуле:

$$ДМЭД = 10^3 \cdot \frac{ПД}{t_c \cdot n \cdot T}, \text{ мкЗв/ч,} \quad (9.1)$$

где $\overline{ПД}$ - основной предел годовой дозы для соответствующей категории лиц (табл. Т.1), мЗв; t_c - продолжительность работы на рентгеновском аппарате в течение года при односменной работе персонала группы А, $t_c = 1500$ ч (30-часовая рабочая неделя); n - коэффициент сменности, учитывающий возможность двухсменной работы на рентгеновском аппарате и связанную с этим увеличенную продолжительность облучения персонала группы Б и населения, отн. ед.; T - коэффициент занятости помещения или территории для соответствующих категорий облучаемых лиц, учитывающий максимально возможную продолжительность их облучения, отн. ед.; 10^3 - множитель для перевода мЗв в мкЗв.

Таблица 9.2

Допустимая мощность эффективной дозы (ДМЭД) в помещениях рентгеновского кабинета, в других помещениях и на прилегающей территории в зависимости от значений параметров Т, n, t_c·n

№ пп	Помещение, территория	ДМЭД, мкЗв/ч	Т, отн. ед.	n, отн. ед.	t _c ·n, ч.
1	2	3	4	5	6
1	Помещения постоянного пребывания персонала группы А (процедурная, комната управления, комната приготовления бария, фотолаборатория, кабинет врача-рентгенолога, предоперационная и др.)	13	1	1	1500
2	Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета, имеющие постоянные рабочие места персонала группы Б	2,5	1	1,3	2000
3	Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, комната отдыха, уборная, кладовая и др.)	10	0,25	1,3	2000
4	Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и др.)	40	0,06	1,3	2000
5	Палаты стационара, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета	1,3	0,25	2	3000
6	Территория, прилегающая к наружным стенам процедурной рентгеновского кабинета	2,8	0,12	2	3000
7	Жилые и служебные помещения зданий, расположенных на территории, прилегающей к наружным стенам процедурной рентгеновского кабинета, жилые помещения, смежные с процедурной рентгеновского стоматологического кабинета	0,3	1	2	3000

В табл. 9.2 [9.2, 9.3] приведены значения ДМЭД для различных помещений и территорий, в зависимости от значений коэффициентов занятости T , сменности n и продолжительности работы с учетом сменности $t_c \cdot n$. Приведенные в табл. 9.1 значения ДМЭД используются для целей радиационного контроля.

9.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Имеется набор нормативно-правовых документов по ограничению уровня рентгеновского излучения. Среди них:

1. СП 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
2. МУ 2.6.1.25 – 2000. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.
3. СП 2.6.1. 799-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): Санитарные правила. М.: Минздрав России, 2000.
4. СанПиН 2.6.1.2369-08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досьмотровыми установками.
5. МИ 2453-98 ГСИ. Методики радиационного контроля. Общие требования.
6. ГОСТ 15484-81. Излучения ионизирующие и их измерение. Термины и определения.
7. ГОСТ 27451-87. Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия.
8. МУ-ИДК1-98 Методические указания. 2.6.1. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Индивидуальный контроль внешнего облучения персонала. Общие требования.
9. Методические рекомендации. Проведение радиационного контроля инспекционно-досьмотровых ускорительных комплексов.
10. МУК 2.6.1.09-03 Регламент дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала атомных станций. Общие требования.
11. МУ 2.6.1.016-2000. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз, и организация контроля профессионального облучения в контролируемых условиях обращения с источниками излучения. Общие требования. АНРИ № 3(22), 2000, с. 43-75.
12. Общие требования к проектированию информационных систем ИДК предприятий Минатома России. Минатом, 1998.

На основании отмеченных нормативно-правовых документов должен осуществляться дозиметрический контроль профессионального облучения, с целью получения достоверной информации об уровнях облучения персонала для установления соответствия условий труда требованиям Норм и Правил и подтверждения того, что техногенный источник излучения находится под контролем, а радиационная безопасность персонала обеспечена должным образом.

В нормальных условиях эксплуатации источника результатом контроля облучения персонала является консервативная оценка в терминах индивидуальной дозы нормируемых величин облучения персонала техногенными источниками, регламентированных Нормами и Правилами [9.2].

РАЗДЕЛ III. ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

ВВЕДЕНИЕ

К виброакустическим воздействиям относят: шум, инфразвук, ультразвук, вибрацию [10.1-10.4].

Шум (акустический) - один из наиболее распространенных неблагоприятных физических факторов окружающей среды и по количеству источников (все виды транспорта, технологические процессы, производственное оборудование, внутридомовые источники - лифты, мусоропроводы и другие) и по степени неблагоприятного воздействия на человека.

Шумы содержат звуки различных частот, для гигиенической оценки шума используют диапазон частот от 25 до 11000 Гц.

Инфразвук - акустические колебания и волны с частотами ниже звуковых (менее 20 Гц). Характеризуется значительной длиной волны, способной огибать препятствия, и малым затуханием в воздухе, он слабо поглощается материалами, поэтому способен распространяться на значительные расстояния. Источниками являются все виды транспорта, вентиляционные системы, компрессорные установки, конструкционные шумы в зданиях, некоторое технологическое оборудование.

Ультразвук - акустические колебания и волны с частотами выше звуковых (более 12,5 кГц). Ультразвук не слышен, он всегда генерируется искусственно (ультразвуковые установки в промышленности, ЛПУ и другие). По способу передачи ультразвук делится на воздушный - нормируется по уровню звукового давления в октавных полосах частот 12,5-100 кГц и контактный - это высокочастотная вибрация.

Вибрация - это механические колебания, распространяющиеся в твердой среде (движение), воздействующие на человека при непосредственном контакте. По способу передачи вибрация делится на: общую (0,7-90 Гц) - передается через опорные поверхности на весь организм; создается технологическим оборудованием, технологическим транспортом, всеми видами транспорта общего назначения, и локальную - передается через руки, режее ноги или предплечья; создается в основном ручными машинами.

Ниже приведены основные нормативные документы для проведения исследований и оценки виброакустических колебаний:

- СанПиН 2.1.2.2645-10 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях".

- СанПиН 2.1.2.2801-10 Изменения и дополнения № 1 к СанПиН 2.1.2.2645-10 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях".
- СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".
- СН 2.2.4/2.1.8.566-96 "Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий".
- ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ "Шум. Общие требования безопасности".
- ГОСТ 12.1.012-2004 "Вибрационная безопасность. Общие требования".

ГЛАВА 10. ШУМ

10.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА

Звук – это механические колебания, распространяющиеся в упругой среде (твердой, жидкой или газообразной). Каждая из частиц среды при этом колеблется около положения устойчивого равновесия. Основным признаком механических колебаний – повторность процесса движения через определенный промежуток времени (рис. 10.1). Минимальный промежуток времени, через который происходит повторение движения тела, называют *периодом колебаний* T , а обратную ему величину – *частотой колебаний* f ¹⁾.

Эти величины связаны между собой простым соотношением:

$$f = 1/T, \quad (10.1)$$

где f – частота колебаний, Гц; T – период колебаний, с.

В общем случае периодическое колебание может быть выражено в виде:

$$x(t+T) = x(t), \quad -\infty < t < \infty, \quad (10.2)$$

где x – смещение тела (частицы среды) от положения равновесия; t – время.

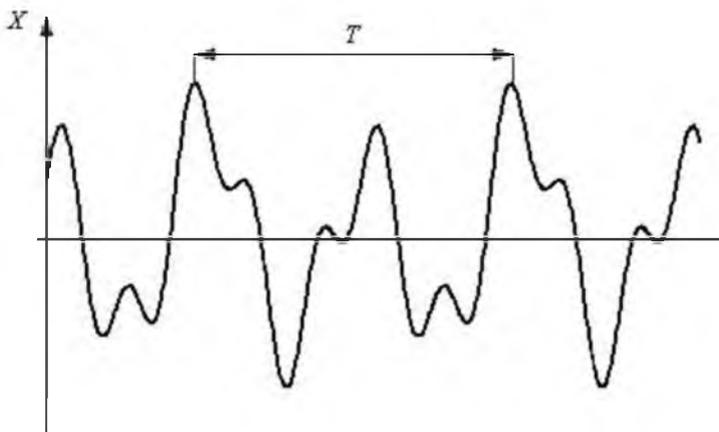


Рис. 10.1. Периодическое колебание произвольной формы

Одним из наиболее частых видов колебаний, существующих в природе, являются *гармонические колебания*²⁾ (рис. 10.2), описываемые уравнением

¹⁾ Частота колебаний определяется числом колебаний, произошедших за 1 сек. Единица измерения частоты герц (Гц), $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

²⁾ В природе и технике *строго* периодических (гармонических, монохроматических) колебаний не существует, однако с достаточным приближением большое число явлений можно описать *набором гармонических функций*.

$$x = x_{\max} \cdot \sin(\omega t + \phi_0), \quad (10.3)$$

где X - смещение тела (частицы среды) от положения равновесия; x_{\max} - максимальное значение смещения от положения равновесия, или амплитуда колебания; $\omega t + \phi_0$ - фаза колебания; ω - циклическая (круговая) частота колебаний³⁾ ($\omega = 2\pi / T = 2\pi f$); t - время; ϕ_0 - начальная фаза колебаний, характеризуется величиной и направлением отклонения колебания от положения равновесия в начальный момент времени ($t = 0$).

³⁾ *Циклическая частота* – число колебаний, происходящих за 2π с.

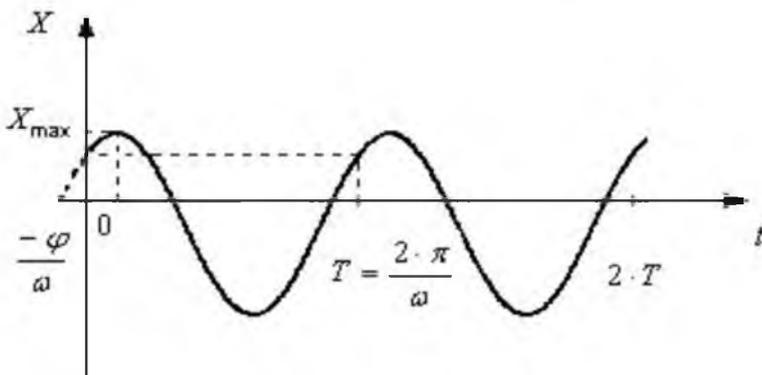


Рис. 10.2. Гармоническое (синусоидальное) колебание

Для описания колебательных процессов в упругой среде используют следующие характеристики и понятия:

Скорость колебаний v – скорость движения частиц среды относительно положения равновесия:

$$v = \partial x / \partial t. \quad (10.4)$$

Процесс распространения колебаний в упругой среде называется *волной*. Расстояние между двумя соседними частицами, находящимися в одинаковом режиме движения или в одной одинаковой фазе, называется *длиной волны* λ . Различают продольные и поперечные волны. Для *продольных волн* направление колебаний (смещения) частиц совпадает с направлением распространения волны; данный тип волн характерен для твердых, жидких и газообразных сред. Для *поперечных волн* направление колебаний частиц перпендикулярно направлению распространения волны; данный тип волн характерен только для твердых сред.

Скорость распространения колебаний в пространстве (скорость звука) c называется *скоростью волны*. Ее величина постоянна для данной среды и условий распространения волны. В случае периодических колебаний скорость распространения волны в упругой среде связана с периодом T и частотой колебаний f соотношением:

$$c = \lambda / T = \lambda \cdot f, \quad (10.5)$$

Скорость распространения звуковых волн C в газообразной среде (идеальном газе) определяется выражением:

$$c_{\text{газ}} = \sqrt{\frac{\chi \cdot P}{\rho}}, \quad (10.6)$$

где χ – показатель адиабаты (для воздуха $\chi = 1,41$); P – давление невозмущенного газа, Па; ρ – плотность газа, кг/м³.

$$\chi = C_p / C_v, \quad (10.7)$$

где C_p, C_v – теплоемкость среды соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме.

По современным измерениям скорость звука в воздухе при нормальных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$, $P = 10^5$ Па) равна 331 м/с. При других температурах скорость звука в воздухе может быть определена по формуле:

$$c_{\text{газ}} = 20,5\sqrt{t + 273}, \quad (10.8)$$

где t – температура воздуха, °С.

В жидких и твердых средах скорость звука определяется плотностью среды ρ и модулем упругости E (модулем Юнга) для соответствующего вида деформации:

$$c_{ж.тв} = \sqrt{E / \rho}, \quad (10.9)$$

В табл. 10.1 приведены скорости распространения звуковых волн в различных веществах при комнатной температуре. Скорость распространения продольных волн всегда больше скорости поперечных волн не менее чем в 2 раза.

Звуковые волны переносят энергию; средний поток энергии в какой-либо точке среды характеризуется *интенсивностью звука* (I) – количеством энергии, переносимой через единицу площади поверхности, нормальной (расположенной под углом 90°) к направлению распространения волны. Интенсивность звука выражается следующим образом

$$I = P^2 / (\rho \cdot c), \quad (10.10)$$

где P – звуковое давление (разность между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдалось в невозмущенной среде), Па.

$$P = \rho c v, \quad (10.11)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; ρC – удельное акустическое сопротивление среды, Па·с/м (для воздуха 410 Па·с/м, для воды – 1,5·10⁶ Па·с/м, для стали – 4,8·10⁷ Па·с/м).

Таблица 10.1

Скорость распространения волн для различных веществ при комнатной температуре

Вещество	Скорость распространения волн, м/с	
	продольных	поперечных
Алюминий	6320	3130
Железо	5900	3230
Никель	5894	3219
Кварцевое стекло	5570	3520
Медь	4730	2300
Цинк	4120	2350
Свинец	2160	700
Вода (0°С)	1481	–
Воздух	331	–

В природе величины звукового давления и интенсивности звука, генерируемые различными источниками шума, меняются в широких пределах: по давлению – до 10^8 раз, а по интенсивности – до 10^{16} раз.

Пользоваться абсолютными значениями этих характеристик шума неудобно. Кроме того, анализаторы человека (в том числе и слуховой) реагируют не на абсолютное изменение интенсивности раздражителя, а на его относительное изменение. Согласно *закону Вебера - Фехнера* ощущения человека пропорциональны логарифму отношения энергий двух сравниваемых раздражителей. Поэтому звуковое давление и интенсивность звука принято характеризовать их логарифмическими значениями – *уровнями звукового давления и интенсивности звука*, единицей измерения которых служит *децибел* (дБ). Для относительной логарифмической шкалы в качестве нулевых уровней выбраны показатели, характеризующие минимальный порог восприятия звука человеческого голоса на частоте 1000 Гц:

$$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}, I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2.$$

Уровень интенсивности звука определяют по формуле:

$$L_I = 10 \lg(I / I_0). \quad (10.12)$$

Уровень звукового давления равен

$$L_P = 10 \lg(P^2 / P_0^2), \text{ дБ}. \quad (10.13)$$

Уровень интенсивности и уровень звукового давления связаны соотношением:

$$L_I = L_P + 10 \cdot \lg \left(\frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho \cdot c} \right), \quad (10.14)$$

где ρ_0 и c_0 - плотность среды и скорость звука при нормальных атмосферных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$, $P = 10^5$ Па); ρ и c – плотность среды и скорость звука в условиях измерения.

При распространении звука в нормальных атмосферных условиях $L_I = L_P$.

Важной характеристикой, определяющей распространение шума и его воздействие на человека, является *частота*. Диапазон звуковых частот разбивают на частотные полосы (*октавные диапазоны*). В октавном диапазоне частот верхняя граничная частота f_B вдвое больше нижней граничной частоты f_H :

$$f_B = 2f_H. \quad (10.15)$$

Октавная полоса характеризуется *среднегеометрической частотой*:

$$f_{CG} = \sqrt{f_H \cdot f_B}. \quad (10.16)$$

В технике приняты октавные полосы со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц.

Различают биологическое и физическое понятие звука. *К биологическому понятию звука* относят колебания и волны, которые воспринимаются человеческим органом слуха. Ощущение звука проявляется только в том случае, когда частота колебаний и их интенсивность лежат в определенных пределах. *Для человеческого уха спектр слышимых звуковых колебаний лежит в диапазоне от 20 Гц до 20 000 Гц*, если не принимать во внимание индивидуальные способности и возрастные ограничения (рис. 10.3).

Физическое понятие звука объединяет как слышимые, так и неслышимые колебания упругих сред (условно от 0 до 10^{13} Гц). Колебания с частотами ниже 20 Гц называются *инфразвуком*. Нижний предел частот инфразвука не ограничен. В окружающей нас природной среде встречаются инфразвуковые колебания с частотами в тысячные доли Гц.

Колебания упругих сред с частотами более 20 кГц называют *ультразвуком*, который тоже не вызывает слуховых ощущений.

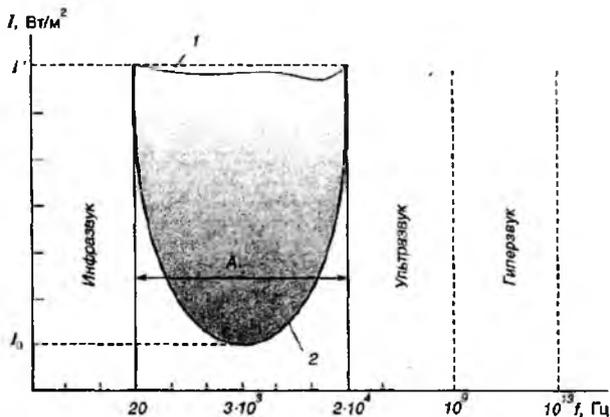


Рис. 10.3. Спектральная чувствительность человеческого уха:
 1 – порог болевого ощущения; 2 – порог слышимости ($I = 10^{-12}$ Вт/м²); А – слышимый диапазон частот; $I' = 1$ Вт/м² (болевого порог). Обозначения на осях координат проставлены без соблюдения масштаба

В диапазоне частот 10^9 – 10^{13} Гц находятся колебания упругих сред, называемых *гиперзвуком*. Верхняя граница гиперзвуковых волн имеет ограничение по принципиальным соображениям ввиду атомно-молекулярного строения сред. Длина волны упругих колебаний в газах больше длины волны свободного пробега молекул. Длина волны упругих колебаний в твердых телах и в жидкостях должна быть больше удвоенного межатомного или межмолекулярного расстояния. Поэтому верхний предел частот гиперзвука в газах ограничен частотой 10^9 Гц, а в твердых телах и жидкостях – $10^{12} \dots 10^{13}$ Гц [10.1-10.3].

10.2. ПОНЯТИЕ О ШУМАХ. ИСТОЧНИКИ ШУМА

С физиологической точки зрения *шумом называется любой нежелательный звук, оказывающий вредное воздействие на организм человека*. Интенсивность шумов может быть самой различной: от шелеста листьев деревьев до шума грозового разряда.

Шум имеет определенную частоту или спектр, выражаемый в герцах (Гц), и интенсивность уровень звукового давления, измеряемый в децибелах (дБА). По виду спектры шума могут быть разбиты на низ-

кочастотные от 16 до 400 Гц, среднечастотные от 400 до 800 Гц и высокочастотные свыше 800 Гц. Шумы подразделяют на постоянные, уровень звука которых изменяется во времени не более чем на 5 дБА, и непостоянные, или прерывистые, уровень звука которых изменяется во времени более, чем на 5 дБА. Могут быть еще импульсные шумы. Постоянный шум в жилых помещениях - это звук часов или доносящийся с улицы шум дождя. К непостоянному относится транспортный шум, шум включающегося агрегата холодильника, к импульсным шумам относится хлопанье дверьми.

Громкость звука. Уровень шума и его источники. Физическая характеристика громкости звука - уровень звукового давления, в дБ. «Шум» - это беспорядочное смешение звуков.

Звуки с низкой и высокой частотой кажутся тише, чем среднечастотные той же интенсивности. С учётом этого, неравномерную чувствительность человеческого уха к звукам разных частот модулируют с помощью специального электронного частотного фильтра, получая, в результате нормирования измерений, так называемый эквивалентный (по энергии, "взвешенный") уровень звука с размерностью дБА (дБ(A), то есть - с фильтром "A"). Человек, в дневное время суток, может слышать звуки громкостью от 10-15 дБ и выше. Максимальный диапазон частот для человеческого уха, в среднем - от 20 до 20000 Гц (возможный разброс значений: от 12-24 до 18000-24000 Гц). С возрастом, воспринимаемый на слух звуковой диапазон сужается: для высокочастотных звуков - уменьшаясь до 18 кГц и менее (у пожилых людей, каждые десять лет - примерно на 1000 Гц), а для низкочастотных - увеличиваясь от 20 Гц и более. У спящего человека, основным источником сенсорной информации об окружающей обстановке - становятся уши ("чуткий сон"). Чувствительность слуха, ночью и при закрытых глазах - увеличивается на 10-14 дБ (по шкале дБА), по сравнению с дневным временем суток, поэтому - громкий, резкий шум с большими скачками громкости, может разбудить спящих людей.

Источники шума естественного происхождения. В реальной атмосфере вне зависимости от человека всегда присутствуют шумы естественного происхождения с весьма широким спектральным диапазоном от инфразвука с частотами $3 \cdot 10^{-3}$ Гц до ультразвука и гиперзвука. Примерами шумов естественного происхождения являются шумы морского прибоя, горного обвала, грозового разряда, извержения вулкана, ветра в лесу, пения птиц, голоса животных, шум низвергающегося водопада.

Источниками инфразвуковых шумов могут быть различные метеорологические и географические явления, такие, как магнитные бури, полярные сияния, движения воздуха в кучевых и грозовых облаках, ураганы, землетрясения. В слышимой области частот под действием ветра всегда создается звуковой фон. В природе при обтекании потоком воздуха различных тел (углов зданий, гребней морских волн и т. п.) за счет отрыва вихрей образуются инфразвуковые колебания и слышимые низкие частоты.

Источники шума техногенного происхождения. Техногенный шумовой фон создается источниками, находящимися в постройках, сооружениях, зданиях и на территории между ними. Примерами источников шумов техногенного происхождения являются: рельсовый, водный, авиационный и колесный транспорт, техническое оборудование промышленных и бытовых объектов, вентиляционные установки, санитарно-техническое оборудование, теплоэнергетические системы, электромеханические устройства, газотурбокомпрессоры, электротехнические приборы и оборудование, аэрогазодинамические установки и т. п.

Классификация шумов по физической природе. Техногенные шумы по физической природе происхождения могут быть классифицированы на группы:

- **механические шумы**, возникающие при взаимодействии различных деталей в механизмах (одиночные или периодические удары), а также при вибрациях поверхностей машин и оборудования;

- **электромагнитные шумы**, возникающие вследствие колебаний элементов электромеханических устройств под влиянием переменных магнитных сил (колебания статора и ротора электрических машин, магнитопровода статора трансформатора и др.);

- **аэродинамические шумы**, возникающие в результате стационарных или нестационарных процессов в газах (истечение сжатого газа из отверстий, пульсация давления при движении потоков газа в трубах или при движении в воздухе тел с большими скоростями; горение жидкого или распыленного топлива в форсунках и др.);

- **гидродинамические шумы**, вызываемые различными стационарными и нестационарными процессами в жидкостях (турбулентность потока, возникновение гидравлического удара при быстром сокращении кавитационных пузырей, кавитация в ультразвуковом технологическом оборудовании и т. п.).

Классификация шумов по спектрально-временным характеристикам. Спектрально-временные характеристики шумов обла-

дают большим многообразием. Для технической оценки шумов введена их классификация по спектральным и временным характеристикам.

По характеру спектра шум подразделяется на *широкополосный* и *тональный* (рис. 10.4,а). Под *широкополосным шумом* понимается шум, имеющий непрерывный спектр шириной более одной октавы. *Тональный шум* характеризуется тем, что в его спектре присутствуют отдельные слышимые дискретные тона.

Тональный характер шума устанавливается измерением уровня звукового давления в *треть-октавных*⁴⁾ полосах частот по превышению уровня в одной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ.

По временным характеристикам шум подразделяется на *постоянный* и *непостоянный*. *Постоянным шумом* считается шум, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день при измерении на временной характеристике «медленно» шумомера⁵⁾ изменяется во времени не более чем на 5 дБА⁶⁾. В случае *непостоянного шума* это изменение должно быть более чем на 5 дБА.

⁴⁾ Для *треть-октавной полосы* выполняется соотношение $f_B = \sqrt[3]{2} \cdot f_H$.

⁵⁾ *Шумомер* – прибор для измерения уровня звука.

⁶⁾ Уровень звука, определенный по шкале А шумомера (на характеристике «медленно»), имеет специальное обозначение L_A и единицу измерения (дБА). При измерении по шкале А характеристика чувствительности шумомера имитирует кривую чувствительности уха человека.

В свою очередь, *непостоянный шум* разделяется на (рис. 10.4,б):

- *колеблющийся во времени*, уровень звука которого непрерывно изменяется во времени;
- *импульсный шум*, состоящий из одного или нескольких звуковых сигналов, каждый длительностью менее 1 с, при этом уровни звука в дБА1 и дБА, измеренные соответственно на временных характеристиках «импульс» и «медленно» шумомера, отличаются не менее чем на 7 дБ;
- *прерывистый шум*, уровень звука которого изменяется ступенчато (на 5 дБА и более); причем длительность интервалов, в течение которых уровень остается постоянным, составляет 1 с и более.

При одновременном воздействии нескольких источников может возникнуть шумовое поле со сложным спектрально-временным рас-

пределением. Методом последовательного выключения источников шума, если это возможно в процессе эксплуатации различных установок, можно определить вклад каждого из них.

Классификация шумов по среде распространения. В технике измерений шумов в зависимости от среды распространения различают *воздушный* и *структурный* шумы. **Воздушный шум** распространяется по воздуху от источника до точки измерения (регистрации, восприятия).

Структурный шум – шум, излучаемый поверхностями колеблющихся конструкций стен, перекрытий, перегородок зданий в звуковом диапазоне частот .

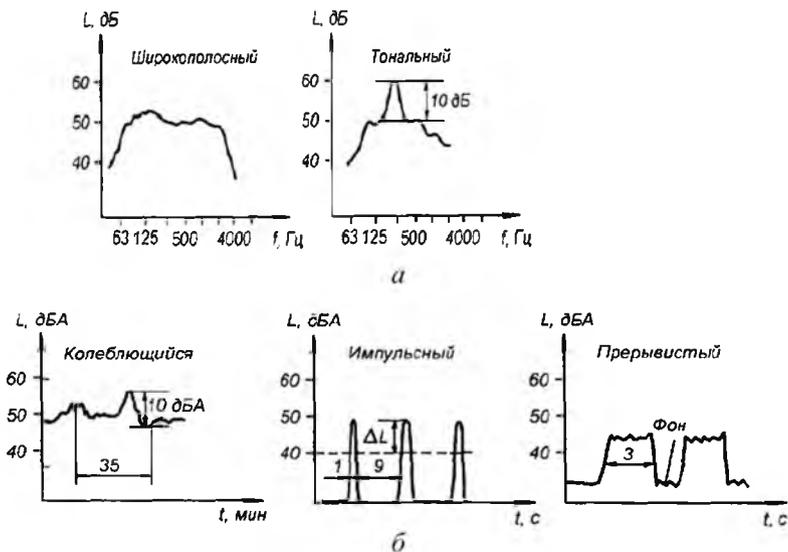


Рис. 10.4. Характеристики шума:
а – спектральные; б – временные

10.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ШУМА

Орган слуха человека (ухо) может воспринимать и анализировать звуки в широком диапазоне частот и интенсивностей. Сила воздействия звуковой волны на барабанную перепонку уха и вызываемое ею ощущение громкости зависят от звукового давления. В связи с этим для оценки воздействия шума на человека используют уровень звукового давления L_p .

Область слышимых звуков ограничена двумя пороговыми кривыми: нижняя – *порогом слышимости*, верхняя – *порогом болевого ощущения* (рис. 10.5).

Самые низкие значения порогов лежат в диапазоне 1000...5000 Гц; самые высокие – на частотах, близких к нижнему и нижнему и верхнему пределу слышимости (20 и 20000 Гц соответственно). Порог слуха молодого человека составляет 0 дБ на частоте 1000 Гц; на частоте 100 Гц порог слухового восприятия значительно выше, так как ухо менее чувствительно к звукам низкой частоты. Звуки, превышающие по своему уровню порог болевого ощущения (120...130 дБ), могут вызывать боли и повреждения в слуховом аппарате (перфорация или даже разрыв барабанной перепонки).

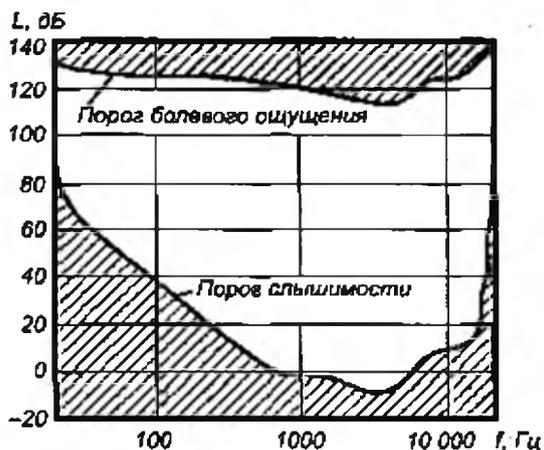


Рис. 10.5. Слуховое восприятие человека

Предел переносимости шума определяется величиной 154 дБ. При этом появляется удушье, сильная головная боль, нарушение зрительных восприятий, тошнота и т.д. Воздействие на организм человека шума, уровень которого около 196 дБ, приводит к повреждению легочной ткани (порог легочного повреждения).

В биологическом отношении шум является заметным стрессовым фактором, способным вызвать срыв приспособительных реакций. Акустический стресс может привести к разным проявлениям: от функциональных нарушений регуляции центральной нервной системы до морфологически обозначенных дегенеративных деструктивных процессов в разных органах и тканях.

Вредное действие шумов проявляется в специфическом поражении слухового аппарата и неспецифических изменениях других органов и систем человека.

При воздействии на человека шумов имеют значение их уровень, характер, спектральный состав, продолжительность действия, состояние центральной нервной системы и индивидуальная чувствительность организма к акустическому раздражителю. Считают, что повышенная чувствительность к шуму присуща 11% населения. Особенно чувствительны к шуму детский и женский организм. Высокая индивидуальная чувствительность может быть одной из причин повышенной утомляемости и развития неврозов. Если сравнивать шумы с одинаковым уровнем звукового давления, то высокочастотные шумы ($f > 1000$ Гц) более неприятны для человека, чем низкочастотные ($f < 1000$ Гц).

Специфическое шумовое воздействие, сопровождающееся повреждением слухового аппарата, проявляется медленно прогрессирующим *снижением слуха*. При профессиональной тугоухости, как правило, происходит нарушение восприятия частот в диапазоне от 4000 до 8000 Гц. Оценка состояния слуховой функции базируется на количественном определении потерь слуха и производится по показателям аудиометрического исследования. Основным методом исследования слуха является **тональная аудиометрия**. При оценке слуховой функции определяющими приняты средние показатели порогов слуха в области восприятия речевых частот (500, 1000, 2000 Гц), а также потеря слухового восприятия в области 4000 Гц. Критерием профессионального снижения слуха в речевом диапазоне принят показатель средней арифметической величины снижения слуха в речевом диапазоне, равный 10 дБ и более (табл. 10.1) [10.4, 10.5].

Снижение слуха на 10 дБ практически неощутимо, на 20 дБ – начинает серьезно мешать человеку, наступает ослабление разборчивости речи. Чаще всего снижение слуха развивается в течение 5...7 лет и более, однако у некоторых лиц серьезное шумовое повреждение слуха может наступить в первые месяцы воздействия.

Помимо патологии органа слуха при воздействии шума наблюдаются отклонения в состоянии вестибулярной функции, а также общие неспецифические изменения в организме: **п о я в л я ю т с я** головные боли; головокружения; боли в области сердца, желудка и желчного пузыря; повышается артериальное давление; изменяется кислотность желудочного сока. Шум вызывает снижение функций за-

щитных систем и общей устойчивости организма к внешним воздействиям.

На производстве интенсивный шум способствует снижению внимания и увеличению ошибок при выполнении работы. Из-за шума снижается производительность труда (до 60 %) и ухудшается качество работы (число ошибок в расчетах увеличивается более чем на 50%). Шум затрудняет своевременную реакцию работающих на предупредительные сигналы внутрицехового транспорта (автопогрузчики, мостовые краны и т. п.), что способствует возникновению несчастных случаев на производстве.

Таблица 10.1

Критерии оценки состояния слуховой функции для лиц, работающих в условиях шума (ГОСТ 12.4.062 – 78)

Степень потери слуха	Величины потери слуха, дБ	
	при речевых частотах (500, 1000, 2000 Гц)	при частоте 4000 Гц
0-я степень (признаки воздействия)	менее 10 (500 Гц – 5 дБ 1000 Гц – 10 дБ 2000 Гц – 10 дБ)	менее 40
1-я степень (легкое снижение слуха)	10 ... 20	60 ... 20
2-я степень (умеренное снижение слуха)	21 ... 30	65 ... 20
3-я степень (значительное снижение слуха)	31 и более	70 ... 20

10.4. НОРМИРОВАНИЕ ШУМА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ

Гигиенические нормативы шума слышимого диапазона на рабочих местах определены ГОСТ 12.1.003-83 (с изменениями 1989 г.) и санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [10.4-10.7].

Для нормирования постоянных шумов применяют предельно допустимые уровни (ПДУ) звукового давления в девяти октавных полосах частот в зависимости от тяжести и напряженности трудового процесса.

ПДУ шума – это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни

настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Для ориентировочной оценки в качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах допускается принимать уровень звука в дБА, измеренный на временной характеристике «медленно» шумомера.

Таблица 10.2

ПДУ звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности, дБА

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	Легкая физическая нагрузка	Средняя физическая нагрузка	Тяжелый труд 1 степени	Тяжелый труд 2 степени	Тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60	–	–	–
Напряженный труд 2 степени	50	50	–	–	–

Примечания к табл. 10.2:

1. Для *тонального и импульсного шума* ПДУ на 5 дБА меньше значений, указанных в табл. 10.2.
2. Для *шума, создаваемого в помещениях установками кондиционирования воздуха, вентиляции и воздушного отопления* – ПДУ на 5 дБА меньше фактических уровней шума в помещениях (измеренных или рассчитанных), если последние не превышают значения, указанные в табл. 10.2 (поправка для тонального и импульсного шума в этом случае не учитывается); в противном случае – на 5 дБА меньше значений, указанных в табл. 10.2.
3. Дополнительно для *колеблющегося во времени и прерывистого шума* максимальный уровень звука⁸⁾ не должен превышать 110 дБА, а для *импульсного шума* – 125 дБА1.

Нормируемым параметром непостоянного шума является эквивалентный (по энергии) уровень звука $L_{Aэкв}$ (дБА) – уровень звука постоянного широкополосного шума, который имеет такое же среднее

квадратичное звуковое давление, что и данный непостоянный шум в течение определенного интервала времени [10.8]:

$$L_{\text{Экв}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left(\frac{P_A(t)}{P_0} \right) dt, \quad (10.17)$$

где $P_A(t)$ - текущее значение звукового давления с учетом коррекции «А»; P_0 - пороговое значение звукового давления в воздухе $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па; τ - время действия шума, ч.

Эквивалентный по энергии уровень звука в дБА может быть измерен специальными интегрирующими шумомерами или рассчитан по формуле [10.9]:

$$L_{\text{Экв}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{100} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{\frac{\bar{L}_i}{10}} \right), \quad (10.18)$$

где t_i - относительное время воздействия шума i -го класса; \bar{L}_i - средний уровень звука в i -ом классе, дБА; n - число классов.

Для этого уровни непостоянного шума, записанные на ленте самописца или считанные с шумомера, разбивают на классы с диапазоном по 5 дБА и производят расчет по формуле (10.18).

ПДУ звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах с учетом напряженности и тяжести трудовой деятельности представлены в табл. 10.2. ПДУ звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука для некоторых видов трудовой деятельности и рабочих мест, разработанные с учетом категорий тяжести и напряженности труда приведены в СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [10.10-10.11].

ГЛАВА 11. ИНФРАЗВУК

11.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКА

В современной акустике под звуком понимают механические колебания в сплошной упругой инерционной среде, например твердой, жидкой или газообразной. В соответствии с определением звуковые колебания охватывают диапазон частот теоретически от нуля до бесконечности.

В зависимости от частоты колебаний совершенно условно (для удобства изучения явления) звуковые колебания подразделяются на инфразвуковые, акустические, ультразвуковые.

Согласно такой классификации, под инфразвуком (ИЗ) принято понимать звуковые колебания с частотами ниже 20 Гц. Звуковые колебания в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц - акустические (слышимые), а выше 20 кГц - ультразвуковые.

Физическая природа звука и инфразвука одна и та же. Разделение их обусловлено особенностями слухового анализатора человека, который воспринимает лишь определенный диапазон частот. Границы слышимости являются условными. Известно, что они зависят от индивидуальной чувствительности звуковоспринимающего аппарата и возрастных особенностей слуховой функции человека.

Таким образом, ИЗ называют любые акустические колебания или совокупность таких колебаний в частотном диапазоне до 20 Гц. Для гигиенической оценки производственного инфразвука практический интерес представляет частотный диапазон от 1,6 до 20 Гц, включающий четыре октавные полосы со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц или двенадцать треть-октавных полос со среднегеометрическими частотами 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16 и 20 Гц. В целях сравнительной оценки спектральных кривых шумов дополнительно используется октава 31,5 Гц [11.1, 11.2].

Для предварительной оценки ИЗ используют уровни звукового давления по частотной коррекции «Лин» и показатель разности уровней (дБ Лин - дБА), измеряемым по частотным коррекциям «Лин» и «А».

По спектру ИЗ шумы подразделяются на тональные, частотный спектр которых содержит одну из составляющих, превышающую уровни во всех других полосах частот на 10 дБ и более; широкополосные, частотный спектр которых содержит одну и более октавных инфразвуковых полос.

По временным характеристикам инфразвуковые шумы подразделяются на постоянные, уровень звукового давления которых по схеме частотной коррекции «Лии» на динамической характеристике «Медленно» изменяется за время наблюдения не менее 1 мин не более чем на 10 дБ; непостоянные, уровень звукового давления которых по частотной коррекции «Лин» на динамической характеристике «Медленно» изменяется за время наблюдения не менее 1 мин более чем на 10 дБ,

Постоянные ИЗ шумы характеризуются уровнями звукового давления по частотной коррекции «Лин» на динамической характеристике «Медленно» и в октавных (треть-октавных) полосах частот.

Непостоянные ИЗ шумы характеризуются эквивалентными (по энергии) уровнями, которые оказывают такое же действие на организм человека, как и постоянный инфразвуковой шум этого же уровня.

Критерии оценки ИЗ. Практически все существующие классификации акустических колебаний связаны со слуховым восприятием человека. Акустические колебания частотой ниже 20 Гц принято называть ИЗ, поскольку они не создают у человека слуховых ощущений. На условность разделения акустических колебаний по слуховым ощущениям указывали многие биоакустики. При этом они опирались на экспериментальные данные, подтверждающие возможность восприятия человеком звуков, выходящих за рамки слухового диапазона, при их значительной интенсивности. По мнению исследователей во взаимодействии акустических колебаний с биологическими объектами наиболее значимым является соотношение геометрических размеров биологических объектов и длин волн, воздействующих колебаний. Именно это соотношение определяет возможность проявления тех или иных волновых процессов преобразования механической энергии, которыми и обусловлены биологические эффекты акустических колебаний. Если длина волны превосходит линейные размеры тела животных или человека, то такие колебания относят к низкочастотным. Таким образом, традиционному физиологическому принципу разделения акустических колебаний по их слышимости противопоставляется другой - физический принцип» основанный на учете линейных размеров биологического объекта и длин акустических волн. Поэтому ряд авторов предпочитают говорить не об инфразвуке, а о низкочастотных акустических колебаниях (НАК) [11.4, 11.5].

Проблема физиологического воздействия ИЗ является очень сложной, и ее изучение затруднено по многим причинам, и главная из них - это то, что трудно установить границу между действием ИЗ и

действием слышимого звука. Такие переходные процессы, как шумы или взрывы, всегда имеют ИЗ составляющие, уровень которых обычно выше звукового давления. На близком или среднем расстоянии от источника всегда происходит смешение составляющих всех частот, вследствие чего возникает вопрос: какие из этих составляющих и в какой степени являются причинами возможных вредных воздействий. То же самое происходит в случае периодических шумов, производимых двигателями, компрессорами или другими техническими устройствами или при воздействии сильных звуков» которые содержат в своем составе ИЗ, что является очень вредным, поскольку защита от их действия весьма затруднена. Действительно, наивысшая спектральная плотность звукового давления, обнаруженная в самолетах, автомашинах и т.п., почти всегда концентрируется в области ИЗ. Другая трудность заключается в относительно малой надежности экспериментов. Если в области шумов и звуковых ударов произведено огромное количество исследований, то, наоборот, действие периодических ИЗ изучено недостаточно.

Что касается основного физического параметра, являющегося причиной наблюдаемых явлений у живых существ, подвергающихся опытному воздействию колебаний, то, согласно мнению большинства специалистов таким параметром является изменение давления, а не обязательно энергия [11.1].

В 1994 г. появилась заслуживающая внимания монография В.О. Самойлова, Г.Н. Пономаренко, Л.Д. Енина [11.3], в которой авторы на основе публикаций специалистов и результатов собственных экспериментов сформулировали и обосновали закономерности низкочастотной биоакустики, изложили биофизические основы реагирования биологических систем на НАК и обобщили существующие взгляды на физиологические механизмы формирования этих реакций.

Согласно концепции авторов монографии, создаваемое низкочастотными излучателями звуковое возмущение среды изменяет ее давление, колебательную скорость частиц, плотность и температуру. Совокупность пространственно-временных распределений характеристик звукового возмущения определяется как акустическое поле. При этом основными характеристиками акустического поля являются звуковое давление (F) и колебательная скорость частиц (V). Низкочастотные акустические колебания распространяются в окружающем пространстве в виде волн, перенос и передача энергии которых осуществляется частицами среды. Параметрами акустической волны являются длина волны - расстояние между двумя областями сжатия и разреже-

ния, и частота - число сжатий (разряжений) в единицу времени. Важнейшими энергетическими характеристиками низкочастотных акустических волн являются мощность звука (энергия акустической волны за единицу времени) и его интенсивность (мощность, отнесенная к единице площади) или плотность потока энергии. Несмотря на существование методов и способов генерирования НАК, технические сложности адекватного моделирования и надежного метрологического контроля создают большие ограничения в их практическом осуществлении.

Очень важными являются вопросы, касающиеся распространения НАК в физических средах, которые определяются такими параметрами среды, как плотность и скорость распространения акустических волн, а также взаимодействие НАК с веществом. Авторы акцентируют положение о необходимости при оценке реакций биологических объектов на НАК выявления закономерностей преобразования энергии акустических стимулов в различных тканях организма, которые в свою очередь определяются их механическими свойствами. За этим положением стоит очень сложный аспект адекватной оценки НАК - по поглощенной энергии. Однако следует отметить, что этот вопрос продолжает оставаться малоизученным.

Большую значимость в формировании биологических эффектов при воздействии этого фактора имеют, в частности, механические свойства биологических тканей, определяющие механизмы взаимодействия НАК с биологическими объектами, а также с собственным низкочастотным акустическим полем организма. Последний аспект связан с тем, что синхронное функционирование различных органов и систем порождает множество механических колебаний, значительная часть энергии которых приходится на низкие частоты, что обуславливает формирование динамической системы низкочастотных акустических полей. По мнению авторов, при действии НАК теоретически существует возможность возрастания амплитуды колебательного смещения тканей за счет интерференции механических и акустических колебаний сердца и других внутренних органов, частотный диапазон которых лежит в области низких частот.

Анализ публикаций двух десятилетий свидетельствует об увеличении внимания исследователей к поиску зависимостей биологических эффектов от параметров НАК. Отчетливо проявилась одна из закономерностей воздействия НАК высокой интенсивности - нарастание степени повреждения биологических тканей с увеличением уровня звукового давления. Важным направлением научных исследований

является поиск частотных зависимостей биологических эффектов НАК высокой интенсивности [11.6, 11.7].

Следует отметить, что слабое поглощение НАК в воздухе, а также незначительная амплитуда (10^{-8} м) колебательных смещений частиц воздушной среды позволяет НАК распространяться на значительные расстояния и буквально пронизывать различные физические тела. По образному выражению, такие колебания подобны «акустическому нейтрину» [11.2].

Экспериментальные данные свидетельствуют, что высокоэнергетические НАК могут вызывать поражения любых тканей [11.9]. Напротив, «мишенью» низкоэнергетических стимулов может выступать наиболее чувствительная к механическим колебаниям система механорецепторов. По мнению ряда авторов, значительное сходство процессов механотрансдукции в рецепторах различной морфофункциональной организации, обладающих высокой чувствительностью к механическим стимулам, позволяет рассматривать не только слуховую, но и другие механосенсорные системы как наиболее вероятные объекты непосредственного действия НАК. Разработанная принципиальная схема формирования начальных этапов механосенсорного акта восприятия НАК и запускаемый им патогенетически важный механизм его неблагоприятного действия включает следующие понятия:

Механоусиление - сдвиговые поверхностные волны, субгармоники и параметрический резонанс; нелинейный характер поглощения энергии анизотропными вязкоупругими средами; деформация механосенсорной мембраны; конформационные изменения механочувствительных ионных каналов.

Механотрансдукция - изменения мембранной проницаемости; деполаризация механосенсорной мембраны; генерация рецепторного потенциала; формирование импульсной активности.

Совокупность полученных экспериментальных данных позволила авторам сформулировать представления о возможных механизмах организации реакций организма на НАК. Для стимулов разной интенсивности они оказались различны. В этом плане рассмотрены информационная гипотеза биологических эффектов НАК, роли сенсорного восприятия механизмов биологических эффектов.

Информационными системами [11.10], участвующими в восприятии НАК, являются, прежде всего, механосенсорные системы. Формирующиеся в них афферентные потоки лежат в основе системных ответов организма на акустические стимулы. На их основе формируются генерализованные реакции организма, оценку которых необхо-

можно использовать при разработке критериев экологической безопасности населения к данному фактору окружающей среды. При этом корректным физическим критерием при оценке действия НАК является определяющая роль плотности потока энергии акустических колебаний в формировании сенсорных ответов. Величина этого показателя служит наиболее информативным показателем низкочастотного акустического воздействия и определяет механическую энергию, непосредственно поглощаемую биологическими объектами.

Следует подчеркнуть, что и поныне существует спектр дискуссионных вопросов: информативность физических критериев НАК, механизмы их биологического действия и реакций целостного организма, отсутствие частотной зависимости эффектов НАК, поглощение механической энергии биологическими объектами, экстраполяция на человека данных, полученных на изолированных биологических объектах и модельных средах и др.

Несомненный интерес представляют многолетние совместные исследования МГУ и ЗИЛ [11.4], касающиеся энергетической структуры ИЗ поля в замкнутом объеме и его влияния на комфортность среды обитания человека. Как показали исследования, для определения характера воздействия акустического поля в области низких частот необходимо знать его энергетические параметры: комплексную интенсивность, ее ротор и дивергенцию. Вектор комплексной интенсивности включает вектор активной интенсивности, являющийся вектором Умова, который определяет направление и величину потока энергии. Другой вектор - реактивной интенсивности, направленный от максимума потока среды или от источника при исследовании поля вблизи излучателя. Использование этих характеристик и то, что ротор активной интенсивности не равен нулю, позволило показать, что существуют области, где активная интенсивность может протекать по замкнутым траекториям, образуя вихри. Как показали исследования, при любых уровнях ИЗ (до 120 дБ) энергетическая структура звукового поля сохраняется постоянной и зависит, очевидно, от геометрической формы замкнутого объема, акустических характеристик ограничивающих поверхностей и условий возбуждения звука. В помещении лаборатории и в салоне легкового автомобиля обнаружены пространственные зоны с большой величиной ротора активной интенсивности (зона «В») и зона, где этот ротор равен нулю (зона «Д»). Биологические объекты неадекватно реагируют на пребывание в зонах «В» и «Д». Авторами показана зависимость самочувствия человека от пространственного распределения энергетических параметров инфразвукового поля. Вихревой харак-

тер поля (зона «В») соответствует комфортной среде обитания, а зона «Д», где векторы активной и реактивной интенсивности коллинеарны, оценивается как стрессовая.

Таким образом» приведенные данные показывают, что поиск критериев оценки ИЗ как фактора окружающей среды и адекватных физиологических критериев для выявления его воздействия на организм человека является актуальной и не до конца решенной задачей.

11.2. ИСТОЧНИКИ ИНФРАЗВУКА

Природные источники ИЗ. Изучением инфразвуковых волн, возникающих в океанах и морях, долгое время занимался академик В.В. Шулейкин [11.11]. Даже при отсутствии ветра над всей поверхностью моря, пульсация давления в турбулентных потоках может создавать локальные шумы в ИЗ диапазоне.

В атмосфере ИЗ волны распространяются своеобразно; излучение сначала идет вверх, на высотах 50 км изменяет свое направление, а потом на расстоянии 200-300 км от источника возвращается к поверхности земли, отражается от нее и вновь уходит вверх. ИЗ волны, обгоняя распространение самого шторма, доходят до места самой трагедии по воздуху со скоростью 1200 км/ч, а по воде - 1600 км/ч. Затухание ИЗ волны на таких расстояниях незначительно. ИЗ колебания могут распространяться на огромные расстояния и в земной коре.

Мощным источником ИЗ являются ураганы, океанические штормы. Они возникают из-за турбулентности потоков жидкостей и газов, возникающих при волнениях моря, приливных волнах, движении воздуха над изрезанной горами земной поверхностью, землетрясениях, извержениях вулканов, болидов, полярных сияниях», сильных грозах и других сейсмических явлениях. Происхождение некоторых низкочастотных акустических колебаний до сих пор неизвестно. Сейсмическая активность коррелирует с солнечной активностью. Весьма вероятно, что такая же корреляция с солнечной активностью имеет место и для интенсивности ИЗ шумов. Очень тесно связаны с солнечной активностью ИЗ сигналы, генерируемые полярным сиянием. Магнитные бури сопровождаются акустической ИЗ бурей с вероятностью 100 %, ее сигналы занимают полосу 0,05-0,01 Гц.

ИЗ активность обладает 27-дневной повторяемостью, а также испытывает значительные сезонные вариации (максимум наблюдается в марте и сентябре). В 11-летнем цикле минимум частот должен совпа-

дать с минимумом солнечной активности, а максимум располагается примерно на два года позже максимума солнечной активности,

В спектре флюктуации атмосферного давления ИЗ колебания занимают полосу от 16 Гц до 0,03 Гц (ниже этой частоты преобладают внутренние гравитационные волны). В указанном диапазоне всегда присутствуют значительные шумы, источники которых часто остаются неизвестными. Одна из причин - слабое затухание колебаний на частотах ниже 1 Гц. Кроме того, чем больше длина волны, тем значительнее выражено явление дифракции. Благодаря этому ИЗ легко проникает в помещения и обходит преграды, задерживающие слышимые звуки. ИЗ колебания способны вызвать вибрацию крупных объектов вследствие явлений резонанса,

ИЗ фон нашей планеты все время меняется, что обусловлено постоянным обменом энергии между различными явлениями природы: землетрясениями, извержениями вулканов, грозowymi разрядами, лесными пожарами, магнитными бурями и т.д. В последнее время наблюдается увеличение ИЗ фона в окружающей среде в связи с активной деятельностью человека на Земле. Хотя физическая природа ИЗ та же, что и звуковых волн любого диапазона частот, она обладает рядом специфических особенностей, которые позволяют ему распространяться на большие расстояния и воздействовать на огромных пространствах. Эти особенности обусловлены, прежде всего, низкими частотами и собственно большими длинами волн. Для ИЗ частот длины волн в воздухе составляют 17-34000 м; в воде - 75-150000 м; по поверхности земли - 150-300000 м. Затухание ИЗ в окружающей среде происходит с удалением от источника и обусловлено поглощением его энергии в атмосфере менее чем на 1 %. Полагают, что в среднем постоянный ИЗ фон характеризуется звуковым давлением порядка 0,001 - 0,0035 Па (35-40 дБ) в частотном диапазоне 1-0,02 Гц.

Движение транспорта, состояние мостовой, ветер, разгуливающий между зданиями, захлопывающиеся двери, качающиеся деревья, ветряные мельницы, молнии и т.д. являются естественными источниками сверхнизких частот. Так, в спокойную погоду в квартире на 16-м этаже высотного здания регистрировались уровни ИЗ, не превышающие 90 дБ, а в ветреную погоду уровни ИЗ возрастали до 118 дБ на частоте 1-10 Гц. При колебании атмосферного давления на частоте менее 1 Гц уровни ИЗ достигают 100 дБ.

ИЗ занимает, на первый взгляд, небольшой участок частотной шкалы: от 20 Гц до 0 Гц. До 0 означает практически диапазон колебаний, все более медленных. Он может быть разбит на ряд поддиапазо-

нов: от 20 до 1 Гц; от 1 до 0,1 Гц; от 0,1 до 0,01 Гц; от 0,01 до 0,001 Гц и т.д.

Акустические колебания с частотой ниже 0,01 Гц и все другие диапазоны после него называются субинфразвуковыми.

Ряд авторов приводят данные о корреляции между ИЗ, возникающим во время штормов, с увеличением частоты автомобильных катастроф и пропуска школьниками занятий в это время. Статистическая обработка данных показала наличие связи между частотой указанных явлений и появлением в атмосфере ИЗ. Влияние ИЗ взрывной волны на человека в равной степени сильно при передаче через воздух, газы, жидкости, твердые тела, независимо от частоты звука. Сильные подводные толчки возбуждают необычно большие длины колебания океана. Длина волны цунами от гребня до гребня достигает сотен километров. В глубоководных районах они распространяются со скоростью более 1000 км/час и способны проделать огромный путь. По мере приближения к берегу скорость снижается, а энергия колебаний остается прежней. Поэтому быстро возрастает высота волны - до 10, а иногда в особо изрезанных местах побережья - до 50 и более метров. Обрушиваясь на берег, такие волны все сметают на своем пути. Уровни давления естественного ИЗ величиной 75-95 дБ распространены довольно широко. Как правило, естественные ИЗ принадлежат к диапазону частот ниже 0,1 Гц, хотя иногда регистрируются и составляющие на частоте 1 Гц.

Люди хуже всего чувствуют себя при воздействии ИЗ и воздушных вибраций с частотой около 7 Гц: за счет резонанса грудной клетки и брюшной полости,

Техногенные источники инфразвука. Применение в различных сферах деятельности человека машин и механизмов, увеличение их мощности и габаритов» производительности и других технических характеристик обуславливают тенденцию повышения низкочастотных составляющих в спектрах шумов на рабочих местах и появление ИЗ.

ИЗ - это еще мало изученный фактор производственной среды, который способен оказывать неблагоприятное влияние на организм человека и его работоспособность. Из литературы известно [11.5, 11.6], что колебания воздушной среды при распространении ИЗ волн подчиняются законам аэродинамики. Характерными особенностями ИЗ в отличие от слышимого и ультразвукового диапазона частот являются большая длина волны и малая частота колебаний. При этом ИЗ волны могут свободно огибать препятствия, хорошо распространяясь в воздушной среде на большие расстояния с незначительной потерей энер-

гии, поскольку поглощение ИЗ в атмосфере незначительно и составляет $8 \cdot 10^{-6}$ дБ/км. Эти особенности ИЗ затрудняют борьбу с ним, так как классические способы, применяемые в борьбе с шумом (звукопоглощение, звукоизоляция, удаление от источника), эффективны лишь на высоких частотах.

В ряде работ отмечено [11.7], что в современном производстве и на транспорте источниками ИЗ являются компрессоры, кондиционеры, турбины, промышленные вентиляторы, нефтяные форсунки, вибрационные площадки, доменные и мартеновские печи, тяжелые машины с вращающимися частями, двигатели самолетов и вертолетов, дизельные двигатели судов и подводных лодок, а также наземные средства транспорта.

Производственный ИЗ представляет собой часть механической энергии, генерируемой различным оборудованием и возникает при перемещении поверхностей больших размеров, мощных турбулентных потоков жидкостей и газов, при ударном возбуждении конструкций, вращательном и возвратно-поступательном движении больших масс с повторением циклов не менее чем 20 раз/с. Многие спектры производственных и транспортных шумов содержат ИЗ составляющие, которые не регистрируются обычными измерительными приборами и обладают высокими уровнями звукового давления.

Измерение ИЗ на предприятиях металлургической промышленности показало, что уровни звуковой энергии 115-118 дБ на частотах 6-12 Гц отмечались вблизи доменных и сталеплавильных печей [11.3].

На рабочем месте сталевара мартеновского цеха уровни ВР составляли 97-100 дБ в октавах 16 и 31,5 Гц, в электросталеплавильном цехе – 100-105 дБ на частотах 12,5 и 16 Гц, в кузнечно-штамповочном цехе при работе парового молота - 107 дБ в октаве 16 Гц. При этом авторы отмечают, что в помещениях, расположенных рядом с нагревательными печами, уровни ИЗ были выше, чем непосредственно у источника, и достигали 102-105 дБ на частотах 8-12,5 Гц.

Гигиенические исследования, выполненные рядом исследователей, также показали широкую распространенность этого фактора в производственной среде металлургической промышленности.

Можно выделить три основных типа спектров (табл. 11.1); инфразвуковые, где наибольшие уровни звукового давления (УЗД) приходятся на октавные полосы среднегеометрических частот 2-26 Гц; инфра-низкочастотные, где наибольшие УЗД приходятся на полосы среднегеометрических частот 2-125 Гц, и низкочастотные, где макси-

мум УЗД находится в октавных полосах 31,5-125 Гц, Большинство спектров шума на рабочих местах металлургических цехов имеет инфра-низкочастотный характер. Чисто ИЗ спектры характерны для помещений, где отсутствуют источники ИЗ, а также для компрессорных станций, оснащенных поршневыми компрессорами.

Увеличение мощности технологического агрегата в общем случае не всегда сопровождается увеличением УЗД в ИЗ диапазоне. Большое влияние на генерирование шума агрегатом оказывают особенности его конструкций. Увеличение генерирования агрегатом низкочастотного шума и ИЗ при увеличении его мощности имеет место в газодинамических установках,

В сталеплавильном производстве УЗД ИЗ и низкочастотного шума у агрегатов существенно зависят от хода технологических процессов. Интенсификация технологических процессов приводит к возрастанию уровней низкочастотного шума и инфразвука.

Таблица 11.1

Классификация рабочих мест транспортных средств и технологического оборудования по шумовым характеристикам инфра-низкочастотного диапазона

Характер спектра	Октавные полосы с максимальными уровнями звукового давления, Гц/дБ	Примеры основных видов машин и оборудования
Инфразвуковые	2, 4, 8, 16 82-133	Автотранспорт, доменные и кислородно-конверторные печи» речные и морские суда, железнодорожный транспорт, компрессоры
Инфра-низкочастотные	2-125 84-112	Мартеновские печи, авто-машины, отдельные виды транспортных средств, самоходные и полустационарные машины
Низкочастотные	31,5; 63; 125 84-116	Электродуговые печи, тягачи, гусеничные тракторы, портовые краны, турбинные установки, автопогрузчики, экскаваторы

Основными источниками ИЗ и низкочастотного шума в электро-сталеплавильных цехах являются электрические дуги. Шум, создаваемый электродуговыми печами различной мощности, имеет широкополосный характер с преобладанием акустической энергии в низкочастотной и инфра-низкочастотной области спектра.

ИЗ обнаружен и в коридорах между цехами электродуговых печей, где наблюдается его пик в октавах 16 и 31,5 Гц (77 и 93 дБ соответственно) с разностью уровня звукового давления по показанию Д

между дБ Лин и дБА в 40 дБ. Такой характер спектра дает основание считать этот шум инфразвуковым, хотя абсолютные значения уровней невелики. Возникновение этих ИЗ колебаний объясняется, по-видимому, акустическим резонансом строительных перекрытий и цеховых коридоров [11.12].

Кислородно-конверторный процесс в настоящее время является ведущим способом выплавки стали. Наличие интенсивных газовых потоков обуславливает генерирование ИЗ и низкочастотного шума на этом производстве, Максимальные уровни ИЗ зарегистрированы при процессе продувки. Октавные спектры шума на рабочих местах сталеваров имеют ИЗ характер, максимальные уровни звукового давления 96-102 дБ отмечаются в диапазоне 8-31,5 Гц»

Источниками ИЗ и низкочастотного шума в мартеновских цехах являются печи. Уровни звукового давления ИЗ на рабочих местах сталеваров зависят от емкости печей и от хода технологического процесса, они особенно велики в период завалки и прогрева. Максимальные уровни звукового давления 96-100 дБ сосредоточены в октавах 8-31,5 Гц.

Средняя величина Д ИЗ для мартеновского цеха составляет 16 дБ, для конверторного - 21 дБ, Шум с таким спектром является низкочастотным с наличием инфразвуковой компоненты. Следует отметить, что уровень слышимого шума в дБА в конверторном цехе не превышает нормы, а в мартеновском - на 7 дБ выше нормативного уровня, поэтому гигиеническая значимость ИЗ в этом цехе меньше, чем шума.

В промышленности ИЗ колебания с максимальными уровнями звукового давления от 92 до 123 дБ преимущественно в октавах 8-16 Гц создают воздушные и поршневые компрессоры.

Измерение ИЗ в компрессорных цехах у пульта управления операторов показало, что спектр шума, создаваемый поршневыми компрессорами, имеет пик в треть-октаве 20 Гц при Д ИЗ, равной 23 дБ. Такой шум является тональным (превышение пика над соседними уровнями в треть-октавных полосах более 10 дБ), а характер спектра шума дает основание считать его выраженным инфразвуковым.

Измерения шума на рабочих местах операторов турбинного зала, у блочных щитов управления, в цехах конденсатоочистки и в помещениях компрессорных станций атомной электростанции (АЭС) показали, что шум, создаваемый технологическим оборудованием АЭС, имеет широкополосный спектр с преобладанием акустической энергии 86-98 дБ преимущественно в октавах 31,5-63 Гц, а Д ИЗ составляет 10-15 дБ. Этот шум является низкочастотным, с признаками ИЗ.

Как показали исследования, источниками ИЗ могут являться водосливные плотины (ИЗ образуется вследствие нестабильности перелива воды), башенные охладители электростанций (при падении струи охлаждаемой воды в резервуар) с уровнями 80 дБ в диапазоне частот 10-31,5 Гц.

Уровни ИЗ около 107 дБ на частотах 20-30 Гц были отмечены вблизи насосных станций сточных вод. ИЗ обнаружен также в спектрах шумов вентиляционных установок и систем кондиционирования воздуха. Так, для некоторых типов этого оборудования максимальные уровни звукового давления в октавах 4-31,5 Гц составляли 98-100 дБ. Октавный спектр шума у вентилятора доменной печи объемом 1370 м³ имеет инфразвуковой характер с максимумом УЗД в полосе среднегеометрической частоты 8 Гц, равным 118 дБ, что выше допустимого на 13 дБ.

Источники ИЗ выявлены в горнодобывающей промышленности, в частности при добыче золота дражным способом. Наибольшие уровни звукового давления на частотах 4-26 Гц были зарегистрированы на драгах и составляли 98-107 дБ.

Мощным источником ИЗ являются реактивные двигатели космических ракет. Так, при запуске некоторых типов ракет максимальные уровни звукового давления, превышающие 150 дБ, находятся на частотах 10 и 12,5 Гц. В связи с этим рекомендованы ПДУ ИЗ в 140 дБ для космонавтов и 120 дБ для персонала и окружающего населения при кратковременном воздействии фактора с длительными перерывами.

Высокие уровни ИЗ обнаружены также на трассах сверхзвуковых реактивных самолетов. При прохождении ими звукового барьера образуется ударная волна с максимумом спектральной плотности в диапазоне 1-10. В спектрах шумов турбореактивных самолетов наибольшие уровни звука обычно расположены в области 100-200 Гц, однако при увеличении мощности двигателя пик звуковой энергии может смещаться в диапазон более низких частот. Аналогичные данные были получены при измерении шума на взлете турбореактивных самолетов типа ТУ-154, уровни ИЗ в салоне которых составляли на частоте 4 Гц 80 дБ и на частоте 20 Гц - 90 дБ при уровне шума 100 дБА.

По литературным данным [11.12-11.14], уровни ИЗ в 133 дБ на частотах 7, 13, 14, 20 Гц наблюдались в машинных залах грузовых судов во время запуска судовых двигателей. На пассажирских судах было обнаружено, что в спектре шума корабельной рубки максимум акустической энергии в 100 дБ находится в октаве 8 Гц, а шум в салоне, расположенном над машинным отделением, имел пиковое значение

100 дБ на частоте 31,5 Гц. Замеры шума на катерах с подводными крыльями показали, что спектры их шумов имеют низкочастотный характер с наибольшими уровнями звукового давления 107-110 дБ на частотах 8 и 31,5 Гц.

Источниками ИЗ колебаний являются наземные средства транспорта. Высокие уровни инфразвука до 100 дБ и выше в диапазоне 9-16 Гц отмечаются в кабинах легковых автомобилей. При частично открытых окнах автомашины уровни ИЗ повышаются до 110-120 дБ, а их частотный диапазон расширяется до 31,5 Гц, при открытых окнах наиболее высокий уровень звукового давления 120 дБ наблюдается в диапазоне 2-6 Гц. Было отмечено, что открытое окно действует как сопло в резонаторе Гельмгольца, а замкнутым объемом в данном случае являлось пространство внутри автомобиля.

Материалы исследований по низкочастотным акустическим характеристикам рабочих мест основных видов транспортных средств и технологического оборудования можно почерпнуть из публикаций [11.4].

На рис. 10.1 представлены спектральные характеристики ИЗ на рабочих местах транспортных средств и технологического оборудования. Из рис. 10.1 следует, что октавные спектры ИЗ достаточно плоские и в сравнении с ориентировочным предельным спектром гигиеническая значимость является наибольшей на октавах 8 и 16 Гц.

При выполнении транспортных работ спектр ИЗ имел широкополосный характер с максимумом акустической энергии в области 2-8 Гц до 112 дБ.

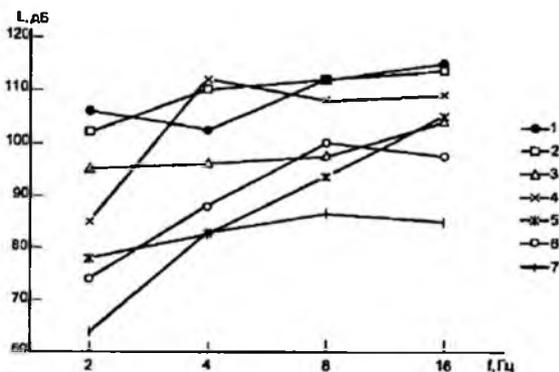


Рис. 11.1. Спектральный состав инфразвука от различных источников: 1 - автотранспорт; 2 - сельскохозяйственные и строительные машины; 3 - полустационарное оборудование; 4 - стационарное оборудование; 5 - водный транспорт; 6 - железнодорожный транспорт; 7 - коммунальные источники

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют, что спектральный состав низкочастотных акустических колебаний неоднороден.

Часть транспортных средств и технологического оборудования генерирует максимальные уровни акустической энергии в зоне ИЗ частот, часть - в зоне низкочастотного шума, а часть имеет смешанный инфра-низкочастотный характер, что представляет большую значимость для научно обоснованного гигиенического нормирования. Исходя из вышеизложенного, низкочастотные акустические характеристики на рабочих местах операторов транспортных средств, машин и технологического оборудования по частотному составу можно классифицировать как инфразвуковые, инфра-низкочастотные и низкочастотные.

Выделенные классы спектров охватывают основные виды трудовой деятельности операторов, подвергающихся воздействию низкочастотных акустических колебаний, и позволяют учитывать их особенности при гигиеническом нормировании. Классификация выдвигает необходимость разработки дифференцированных подходов и методов оценки неблагоприятного действия низкочастотных акустических колебаний инфра-звукового, низкочастотного и инфра-низкочастотного диапазонов.

Таблица 11.3

Априорные признаки наличия инфразвука в источнике

Типы признаков	Характеристики
Конструктивно-строительные	<ul style="list-style-type: none"> - большие площади перекрытий или ограждений источников шума (например, смежное расположение административных помещений с производственными); - большие габариты двигателей и рабочих органов машин (например, карьерные экскаваторы); - наличие замкнутых объемов, возбуждаемых динамически (например, кабины наблюдения за технологическим оборудованием); - подвеска самоходных и транспортно-технологических машин; - применение материалов для шумоглушения и звукоизоляции, эффективных на звуковых частотах слышимого шума в источнике его образования (например, при снижении рабочей частоты виброплощадки) или по пути его распространения (глушители, облицовки, кабины наблюдения)

Типы признаков	Характеристики
Технологические	<ul style="list-style-type: none"> - высокая единичная мощность машины при сравнительно низком рабочем числе оборотов, ходов или ударов (например, поршневые компрессоры с рабочей частотой 1200 об/мин и менее, виброплощадки); - неоднородность или цикличность технологического процесса при больших его мощностях или масштабах, при обработке крупногабаритных деталей или больших масс сырья (например, мартены и конвертеры металлургического производства, в горнодобывающей промышленности); - флюктуации мощных потоков газов или жидкостей (например, газодинамические или химические установки); - передвижение по местности, агрофону, дорогам, магистралям, мостам, тоннелям (например, строительные дорожные машины)

Общий уровень звукового давления составляет:

- в производственных помещениях в металлургическом производстве на рабочих местах операторов доменных, кислородно-конверторных печей 98,5±1,9 дБ Лин и 78,3±3,9 дБА;
- около компрессорного оборудования 96 дБ Лин, 64-86 дБА;
- на отдельных видах морских, речных судов 106 дБ Лин, 73 дБА и превышает нормативный уровень на некоторых типах судов в октавах 8, 16 Гц на 10-13 дБ;
- на некоторых видах железнодорожного транспорта - 104 дБ Лин и 82 дБА.

Многие виды шумов, в частности производственных и транспортных, содержат ИЗ составляющие, которые не регистрируются обычными измерительными приборами и практически не слышимы, хотя и обладают высокими уровнями звукового давления. В связи с этим следует иметь в виду конструктивно-строительные и технологические признаки, при которых следует ожидать появления ИЗ составляющих в шумовых спектрах (табл. 11.3).

Ориентировочной характеристикой для оценки наличия ИЗ в измеряемой точке является уровень звукового давления, измеренный по шкале шумомера «Линейная». Для оценки степени выраженности инфразвука используется разность между показаниями шумомера по шкале «Линейная» дБ Лин с использованием частотной коррекции «А», дБА. При разности уровней дБ Лин - дБА менее 10 дБ уровни ИЗ незначительны, при разности от 11 до 20 дБ имеет место ИЗ низких уровней, более 21 дБ - уровни инфразвука значительные.

В производственной среде ИЗ не встречается в чистом виде, и сопутствующими факторами» кроме шума, являются низкочастотные вибрации, нагревающий микроклимат, загрязненность воздушной среды. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований по выявлению особенностей биологического действия ИЗ для уточнения нормативных уровней в зависимости от параметров фактора.

ИЗ в жилых и производственных помещениях. Помимо воздействия ИЗ на водителей и пассажиров автотранспорта, отдельные автомобили и потоки транспорта формируют низкочастотный шум в окрестностях дорог.

При измерении шума от транспортных потоков внутри и снаружи дома с двойными стеклами в спектре выделяется пик до 90 дБ на частоте 63 Гц. При этом сравнение данных, полученных при измерениях снаружи и внутри дома, выявляет различие уровней на звуковых частотах от 20 до 50 дБ, на ИЗ частотах не более 10-15 дБ.

Анализ шума в административных зданиях шахты, расположенных на расстоянии около 100 м от компрессорной станции, показал, что наибольшие значения уровней также сосредоточены в ИЗ диапазоне частот Степень выраженности ИЗ, определявшаяся разностью дБ Лин – дБА, достигала 42 дБ, но общий уровень звукового давления был снижен и составил в дБА 45 дБ, в дБ Лин – 87 дБ, т.е. имело место отсутствие ослабления ИЗ на фоне снижения уровня звукового давления других составляющих спектра. Эти уровни следует оценивать, учитывая, что предельно допустимые уровни шума в административных зданиях и помещениях а также при выполнении творческих и других работ умственного характера существенно ниже для постоянных рабочих мест.

Специальные исследования, проведенные для оценки распространения ИЗ, показали, что источники ИЗ шума с уровнем 109 дБ с максимумом акустической энергии в октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц в радиусе 400-500 м создают ИЗ поле с уровнями интенсивности 88-93 дБ. При этом в квартирах домов уровни ИЗ отличаются от наружных не более чем на 2 дБ.

Резюмируя приведенные данные, следует отметить, что ИЗ колебания встречаются в жилых и общественных зданиях с уровнями от 70 до 20 дБ, на территории жилой застройки - от 80 до 100 дБ. При этом их выраженность в общем шумовом спектре определяется разностью дБ Лин - дБА, составляющей от 10 до 20-30 дБ, т.е. выявляемый ИЗ оценивается от незначительного до выраженного. В большинстве случаев ИЗ встречается в сочетании с низкочастотным шумом и вибрацией.

11.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНФРАЗВУКА

Результаты проведенных социально-гигиенических исследований показывают, что население, проживающее в районе, где имеет место круглосуточное воздействие инфразвука с уровнем 109 дБ, предъявляет достоверно больше жалоб, чем население контрольного района (табл. 11.4).

Т а б л и ц а 11.4

Результаты анкетного опроса жителей селитебной зоны и контрольного района, подвергшихся воздействию ИЗ

Жалобы	Число жалоб среди жителей двух районов (на 100 опрошенных)	
	опытный	контрольный
Нарушение дневного отдыха	52,3	14,7
Нарушение ночного отдыха	43,6	12,1
Неспокойный сон	49,0	26,3
Частые головные боли	26,4	13,0

Эффекты ИЗ сопровождаются также такими неприятными и раздражающими явлениями в домах, как дребезжание стекол, дрожание окон, дверей и др. Выявлена экологическая значимость действия ИЗ на население, что убедительно доказывается различием в частоте жалоб, при этом ИЗ оказывает не только мешающее и раздражающее действие, но и вызывает нередко выраженные функциональные нарушения.

Биологические, патометрические критерии ИЗ при воздействии на животных. В НИИ медицины труда РАМН [11.4] и институтах-исполнителях на протяжении ряда лет проводились комплексные исследования, включавшие гистологическое изучение влияния ВР на вестибулярный анализатор, морфологические и биохимические исследования головного мозга и нейроэндокринной системы и другие гомеостатические показатели в экспериментах на животных. Изучалось также влияние ИЗ на внутренние органы: легкие, печень, поджелудочную железу, сердце и др., а также на морфологический состав белой крови, структуру костной ткани и т.д.

Для изучения особенностей патогенетического действия ИЗ с различными амплитудно-частотными характеристиками проведены экспериментальные исследования на животных (крысах линии Вистар и морских свинках, на которых изучались морфологические реакции слухового и вестибулярного анализаторов). Для патометрической и цитоморфологической оценки изменений использованы гистохимические,

морфометрические, фотометрические, электропно-микроскопические и другие методы.

Количественные морфологические и биохимические исследования длительного воздействия НАК уровнем 130 дБ слышимого 31,5 Гц и не воспринимаемого слуховым анализатором 4, 8 и 16 Гц диапазона на организм животных позволили получить ряд принципиально новых фактов. Явления хроматолиза, увеличение числа гиперхромных нейронов слухового и вестибулярного подкорковых центров в ответ на воздействие ИЗ являются специфичными для данного фактора. Топический цитологический анализ показал, что в реакцию восприятия ИЗ частот вовлекаются преимущественно структуры вестибулярного анализатора (медиальные и латеральные вестибулярные ядра). Максимально выраженная реакция нейронов этих ядер отмечалась при воздействии ИЗ частотой 8 Гц. Та же закономерность наблюдалась в коре и ядрах мозжечка, которые находятся в тесной функциональной связи с проводящими путями вестибулярного анализатора.

Уже первые 25 ч. воздействия ИЗ и НАК приводят к необратимым структурным повреждениям исследуемых нервных центров. Патологические процессы затрагивают не только ганглиозный, но также зернистый и молекулярный слои мозжечка. После 100-часового воздействия резко возрастают явления гидропической дистрофии, множественные кровоизлияния, необратимые изменения нейронов; значительное количество клеток-теней, зон опустошения в вестибулярных ядрах, коре мозжечка.

Проведенные исследования позволили определить различную степень чувствительности нервных образований к действию ИЗ и НАК 31,5 Гц. Повышенной чувствительностью обладают структуры коры мозжечка, особенно клетки Пуркинье, клетки вестибулярных ядер и некоторых ядер мозжечка [11.15].

Данные о реактивных изменениях волосковых клеток преддверия, полукружных канальцев при воздействии ИЗ также свидетельствуют о максимальной заинтересованности вестибулярного анализатора в восприятии колебаний этого диапазона. Изменения в слуховых ядрах были максимально выражены на частоте 31,5 Гц что говорит о преимущественном участии слухового анализатора в восприятии низкочастотных шумов.

При исследовании влияния ИЗ и НАК уровнем 130 дБ на частотах 4, 8 и 31,5 Гц в экспериментах на крысах в различных областях головного мозга (кора больших полушарий, продолговатый мозг, мозжечок и др.) выявлены дистрофические нарушения нейронов, обуслов-

ленные преимущественно гемодинамическими и ликвородинамическими расстройствами, а также обратимые и необратимые клеточные процессы, ширина спектра которых стоит в прямой зависимости от частоты и времени его действия.

Выявленные ликвородинамические расстройства дают основание полагать, что развивающаяся при данном воздействии фактора внутричерепная гипертензия и тканевая гипоксия являются существенными моментами нарушающими функции головного мозга.

Обращают на себя внимание значительные повреждения и истощения нервных центров, регулирующих поддержание постоянства внутренней среды организма - гомеостатическое равновесие.

Результаты биологических эффектов при воздействии инфразвука 4 и 8 Гц и НАК 31,5 Гц с уровнем 130 дБ и их динамика в системах вестибулярного и слухового анализаторов, в системе нейрогуморальной регуляции и некоторых показателей гомеостаза можно почерпнуть в [11.4].

Одним из ключевых звеньев в патогенетическом механизме повреждающего действия ИЗ на головной мозг является нарушение внутримозгового кровообращения, обуславливающее тканевую гипоксию и патологические изменения в нервных клетках. Нарушения в микроциркуляторном русле нарастают по мере увеличения частоты ИЗ, появляясь уже при 4 Гц, и достигают максимальной выраженности при частоте воздействия 31,5 Гц.

Эндокринной системе принадлежит важнейшая роль как в адаптации организма к действию неблагоприятных факторов внешней среды, так и в развитии вызываемых этими факторами патологических изменений. В то же время, несмотря на значительное количество работ, посвященных влиянию ИЗ на организм, состояние эндокринной системы при указанном воздействии практически не изучено. Имеющиеся исследования отражают изменения лишь отдельных звеньев эндокринной регуляции.

Проведенные исследования нейроэндокринной системы при воздействии фактора разных октавных полос выявили однотипную в целом динамику ее изменений в ходе данного воздействия. Вместе с тем реакция гипоталамо-гипофизарной нейросекреторной системы (ГНС) обнаруживает отчетливые различия в зависимости от частоты. При воздействии ИЗ имеет место кратковременная активация ГНС (по данным анализа состояния нейросекреторных ядер и содержания нейросекрета в задней доле гипофиза), и по мере увеличения времени воздействия происходит нормализация функциональной активности сис-

темы, НАК 31,5 Гц не вызывает достоверных сдвигов содержания нейросекрета в задней доле гипофиза.

Изменения в состоянии ГГНС при воздействии ИЗ 4 и 8 Гц и НАК 31,5 Гц имеют обратимый, фазовый характер и укладываются в картину реакции стресса.

В качестве интегральных показателей оценки влияния ИЗ на организм животных были выбраны те параметры, которые обнаруживают тесную функциональную зависимость от состояния нейроэндокринной системы, в частности показатели белой крови и мочи. Анализ их динамики говорит о наличии повреждающего действия ИЗ и в целом укладывается в картину общего адаптационного синдрома. Сопоставление действия ИЗ разных частот на систему белой крови показал, что ИЗ является более сильным раздражителем, чем низкочастотный шум. Максимально выраженные изменения наблюдались на частоте 8 Гц»

Оценка морфологических изменений в ряде органов при воздействии ИЗ показала максимальную их выраженность в миокарде и легких. В остальных органах изменения носили более умеренный характер. Полученные результаты дают основание предполагать зависимость глубины повреждающего эффекта ИЗ как от особенностей гемодинамики в органах, так и от уровня их энергетического метаболизма,

Таким образом, на основании экспериментальных исследований на животных, включавших изучение влияния ИЗ на вестибулярный и слуховой анализаторы, морфологические и биохимические исследования головного мозга, нейроэндокринной системы, а также комплекса гомеопатических показателей и влияния инфразвука на внутренние органы, разработаны количественные биологические критерии влияния ИЗ и НАК с УЗД 130 дБ на функциональное состояние организма. Они включают функциональную морфологию центров слухового и вестибулярного анализаторов, структур мозжечка и подкорковых структур головного мозга, коры больших полушарий, основных звеньев нейроэндокринной системы, а также некоторые показатели гомеостаза, обладающие выраженной зависимостью от состояния нейроэндокринной системы.

Полученные материалы свидетельствуют о важной патогенетической роли реакций целостного организма в формировании непосредственных и отдаленных эффектов воздействия ИЗ и позволяют научно обосновать требования об ограничении предельного уровня инфразвука 135 дБ, который ранее был установлен по порогу болевого восприятия [11.20]. Эти данные также свидетельствуют о необходимости корректировки кривой предельно допустимых значений ИЗ со спадом 3 дБ

на октаву повышения частоты в отличие от 12 дБ на октаву по проекту Международного стандарта ИСО, обоснованного только по ауральным эффектам и субъективной оценке фактора.

Кроме того, полученные новые данные по механизму действия ИЗ на организм могут послужить основой для разработки мер профилактики неблагоприятного действия низкочастотных акустических колебаний на организм работающих.

Клинико-физиологические критерии неблагоприятного влияния ИЗ на человека. Гигиеническая проблема, связанная с влиянием ИЗ на человека, возникла сравнительно недавно - в 70-е годы. Накопленные данные свидетельствуют о том, что ИЗ волны оказывают выраженное неблагоприятное действие на организм, особенно на психоэмоциональную сферу, влияют на работоспособность, сердечно-сосудистую, эндокринную и другие системы, кохлеовестибулярный аппарат. Было показано, что выраженное воздействие ИЗ проявляется прежде всего при работе на автомобильном, водном и железнодорожном транспорте, на тракторах и самоходных машинах, экскаваторах, подъемных кранах, у компрессоров, печей и других видов технологического оборудования. При этом максимальными уровнями звукового давления обладают в основном октавы со среднегеометрическими частотами 8, 16 и 31,5 Гц, а сами максимальные уровни колеблются от 90 до 118 дБ, так что при уровнях звука на таких рабочих местах от 70 до 100 дБА степень выраженности ИЗ по разности дБ Лип - дБА составляет от 5 до 42 дБ.

Многие исследователи считают, что ВР обладает выраженной биологической активностью, другие отмечают, что последствия воздействия ВР сильно преувеличены. Нет единого мнения и о том, какие уровни считать безопасными для организма, в литературе имеется значительное количество данных о биологических эффектах ИЗ высоких экстремальных уровней, Вопрос о нижней границе НАК обсуждался давно, и принято считать, что границей отсутствия заметных эффектов может быть принят уровень 120 дБ на частоте 20 Гц, причем с понижением частоты уровни «пограничного» звукового давления возрастали. Однако проведенный специалистами анализ материалов по обоснованию нормативной кривой показал, что эти нормативы базируются на кратковременных биологических эффектах ИЗ больших уровней, а длительное действие уровней ниже 120 дБ не изучалось. Результаты исследований на производстве, а также при моделировании длительной ИЗ нагрузки в лабораторных условиях на добровольцах и в эксперименте на животных убедительно показали многообразие неблагоприят-

ных эффектов ИЗ с уровнями около 120 дБ и ниже с длительностью воздействия 8 ч и более.

В связи с этим необходимы дополнительные исследования по дальнейшему выяснению патогенетических механизмов и оценке риска заболеваемости с целью совершенствования гигиенического нормирования ИЗ. В частности, еще нет точного представления о симптомо-комплексе нарушений, вызванных действием ИЗ, и критериях здоровья для разных экспозиций и уровней риска.

Накопленные результаты, а также данные литературы по оценке влияния ИЗ на организм человека, классифицированные по зонам риска для здоровья человека, показывают, что его биологическое действие можно условно разделить на ряд зон: смертельных уровней и экстремальных эффектов; высокого риска здоровью даже при периодических воздействиях; высокого риска при кратковременных воздействиях; выраженного прогрессирующего риска здоровью; умеренного риска, особенно при сочетании действия с другими физическими факторами (общая и локальная вибрация, шум), неясных, стертых, трудно обнаруживаемых эффектов; экологически неблагоприятного действия на население жилой зоны.

Патогенетические критерии ИЗ воздействия на человека.

Как было показано выше, при воздействии ИЗ наблюдались эффекты, которые позволили постулировать представление о гипоталамическом синдроме (диэнцефальном кризе).

Сравнивая субъективные признаки, обусловленные действием ИЗ с проявлениями типичного гипоталамического синдрома, можно заметить, что эти эффекты диэнцефального криза хорошо соотносятся с описанными выше морфологическими изменениями корково-подкорковых образований головного мозга экспериментальных животных при воздействии ИЗ.

Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях на добровольцах, показали, что основными субъективными признаками при воздействии ИЗ являются ощущение вибрации грудной клетки и брюшной стенки, колебания барабанной перепонки и механического ее массажа, тремор конечностей, ознобopodobный тремор тела, затруднение дыхания, головокружение, головная боль, тошнота, синдром морской болезни, пространственная дезориентация, затруднение при глотании, модуляция речи, чувство необъяснимого страха.

Экспериментальные исследования показывают, что НАК, в том числе и ИЗ диапазона продолжительностью от 25 с до 2 мин с УЗД от 145 до 150 дБ в диапазоне частот от 1 до 100 Гц, вызывал у доброволь-

цев ощущение вибрации грудной стенки, сухость в полости рта, нарушение зрения, головную боль, головокружение, тошноту, кашель, удушье, беспокойство в области подреберий, звон в ушах, модуляцию звуков речи, боли при глотании и некоторые другие признаки нарушений в деятельности организма.

Обращает на себя внимание и то, что все исследуемые жаловались на резко выраженное общее утомление. Часть недомоганий прекращалась после воздействия НАК, другая часть жалоб на недомогание проходила по истечении нескольких часов. Состояние утомления полностью проходило только после ночного сна. Следует отметить, что в одних и тех же случаях наблюдении различные испытуемые показывали значительные различия в субъективной оценке воздействия ИЗ.

В опубликованной литературе [11.16-11.18] приведены данные о влиянии ИЗ частотой ниже 22 Гц и УЗД от 119 до 144 дБ длительною 3 мин на практически здоровых людей (21 человек) в возрасте 21-33 лет. После воздействия исследуемые жаловались на резкую слабость, чувство страха, изменения ритма сердечных сокращений, затрудненное дыхание, абдоминальный спазм, отсутствие аппетита. Все испытуемые отмечали также ощущения вибрации в теле, пространственную дезориентацию, умственную конфузию, уменьшение чувствительности (сенсорный декремент). В некоторых случаях резкая слабость сменялась полной прострацией, которая испытывается людьми после сильного нервного потрясения.

Хотя нарушения в работе вестибулярного аппарата наблюдались только в одном случае, авторы полагают, что при продолжительном действии ИЗ изменения функции этого аппарата могут быть самой значительной из физиологических реакций.

На кафедре гигиены труда ЛСГМИ и ЛИИЖТ (Н.И. Карпова, Э.Н. Малышев, С.В. Алексеев, Г.А. Суворов, В.Н. Ерохин, А.В. Кадыскина и др.) [11.1] экспериментально проведено исследование влияния ИЗ промышленных параметров на организм частотой 10 Гц и уровнем звукового давления 135 дБ в течение 15 мин. Добровольцами были 50 мужчин в возрасте от 20 до 25 лет, прошедшие полное поликлиническое обследование и признанные здоровыми. Во время проведения исследований добровольцы через микрофон сообщали свои субъективные ощущения.

Исследуемые предъявляли жалобы на головную боль, тяжесть в голове, колебания и давление на барабанные перепонки, ощущения колебания внутренних органов, брюшной стенки, отдельных групп мышц (икроножных, спинных и др.). Обращали на себя внимание жа-

лобы на сухость в полости рта, затруднение глотания, влажность рук и резко выраженное чувство усталости. Указанные жалобы через 15-30 мин после воздействия ИЗ проходили, однако чувство усталости сохранялось более длительное время.

Большого внимания заслуживает работа О.В. Реутова (1970) по изучению влияния ИЗ на физиологические функции человека. В этой работе проанализированы субъективные ощущения, возникающие у добровольцев при действии ИЗ интенсивностью 135 дБ и частотой 5 Гц (56 человек) и 10 Гц (61 человек). Наиболее общими жалобами, предъявляемыми после действия ИЗ обеих частот, явились ощущения общей усталости, вялости, рассеянности и давления в ушах. Эти явления, в некоторых случаях сопровождающиеся тревожным, пугливым состоянием, приходят на смену ощущению депрессии. Возникновение ощущения, подобного усталости, имеет место после мышечного напряжения, что было отмечено в 50 случаях на частоте 5 Гц и в 58 случаях на частоте 10 Гц примерно на 10-15-й минуте от начала воздействия ИЗ. У части исследуемых лиц были зафиксированы жалобы на рассеянность, раздражительность и сонливость. Два первых симптома имели место в среднем на 10-й минуте восстановительного периода, а сонливость, как и ощущение общей усталости, и усталость сохранялись более 30 мин после эксперимента,

Описанная выше группа симптомов указывает на психотропное действие ИЗ, проявляющегося на фоне общей слабости функционального генеза. При этом отмечаемая исследуемыми сонливость в большинстве случаев (75 %) имела место при действии ИЗ частотой 5 Гц, в то время как при частоте 10 Гц этот симптом отмечался лишь у 44 % исследуемых. В 100 % случаев на обеих частотах появлялось ощущение давления в ушах, сохраняющееся в течение всего времени проведения эксперимента и связанное с изменением давления в камере в результате работы генератора. В течение всего периода воздействия ИЗ часть испытуемых отмечали вибрацию внутренних органов, которая сказывалась в основном в ощущении колебаний грудной клетки, брюшной стенки и желудка. Вибрация грудной клетки, более характерная для частоты 5 Гц, наблюдалась более чем в половине случаев (57%), а вибрация брюшной стенки отмечалась в равной степени при действии ИЗ обеих частот. Большое количество жалоб на затруднение дыхания имело место на частоте 5 Гц (64 % случаев).

По мнению ряда специалистов, физиологическое действие ИЗ даже небольшой интенсивности - то же, что и воздействие вибрации низкой частоты. Болезненные явления под влиянием ИЗ могут прояв-

ляться в виде головокружения и морской болезни. При интеллектуальном труде ИЗ частотой 7 Гц вызывает тошноту и утомление после 2 ч его действия. Авторы отмечают, что под влиянием ИЗ может возникать вибрация внутренних органов, которая за несколько минут своего действия способна вызывать расстройства нервной системы, пищеварения, привести к ослаблению зрения и другим нежелательным биологическим эффектам. Указанные выше нарушения могут иметь место и при диэнцефальных кризах.

В работах [11.14-11.16] отмечается влияние ИЗ на частоту пульса и артериальное давление, на нарушение сна, на вибрацию грудной клетки, общую усталость, слабость, недомогание, снижение работоспособности и головокружение, что, несомненно, может иметь значение для работников, обслуживающих транспортные средства и промышленное оборудование. Такая симптоматика отражает полиморфный гипоталамический синдром (вегетативно-висцеральный, нервно-мышечный, нарушение сна и бодрствования), который характеризуется многочисленными диэнцефальными расстройствами без преобладания какого-либо ведущего симптома или синдрома.

Ряд исследователей [11.1-11.5] наблюдали патологические нарушения под влиянием ИЗ у телефонисток, работающих в новом коммутаторе, расположенном около котельной, Пуск в эксплуатацию нового коммутатора сопровождался появлением у всех телефонисток целого ряда жалоб, Первые симптомы были относительно незначительны, они проявлялись в функциональном нарушении нервной системы. Телефонистки жаловались на головную боль, рассеянность, чувство необъяснимой усталости, им было трудно сосредоточиться, особенно их беспокоили «тяжелые ноги», прилив крови к лицу. Через некоторое время телефонистки стали отмечать, что к описанным явлениям присоединились другие нарушения; удушье, потливость, сухость в горле, нарушение функции зрительного анализатора. Авторы указывают, что при обследовании условий труда и характера работы они обратили внимание на систему кондиционирования воздуха, которая являлась источником вибрации и ИЗ. Уровень постоянного ИЗ был в пределах 80 дБ в диапазоне 8 Гц, а дополнительные ИЗ колебания достигали 90 дБ при частоте 6 Гц. Вибрация соответствовала допустимым величинам. Авторы считают, что выявленные нарушения обусловлены воздействием на организм ИЗ.

Длительное воздействие ИЗ частотой 4-10 Гц может вызывать хронический гастрит, колит, висцероптоз, сохраняющиеся длительное время после экспозиции, что дало право заключить, что ИЗ оказывает

не только механическое действие, но и иной эффект стрессового характера.

Резонансными частотами для человека являются 5, 10 и 15 Гц. Но этот резонанс зависит от механического импеданса тела человека и мышечного напряжения. Хуже всего переносятся резонансные явления в полости живота [11.6-11.8].

Исследования показывают [11.12, 11.14], что «резонанс» человеческого тела расположен в интервале 4-10 Гц. ИЗ колебания частотой до 10 Гц вызывают резонансные явления со стороны крупных внутренних органов - желудка, печени, сердца, легких, что проявляется в ощущении давления в подреберье, вибрации грудной клетки и брюшной стенки. Частоты более 10 Гц могут вызывать неприятные ощущения в носоглотке, мочевом пузыре, прямой кишке.

Авторы многих работ [11.1, 11.3] связывают ощущение вибрации в различных частях тела (вибрация грудной клетки, стенки живота, гортани и др.) при воздействии ИЗ и НАК с непосредственным биомеханическим резонансным эффектом, адекватность которого аргументируется биодинамической моделью человека сосредоточенного параметра.

Модель сосредоточенного параметра организма человека может, например, быть использована для предсказания и понимания реакции дыхательной системы на ИЗ и взрывные волны, для анализа связи между стенкой грудной клетки и брюшной стенки при вибрации в таких условиях.

Согласно представлениям Н.Е. von Gierke [11.4], если длина волны намного больше размеров объекта, в данном случае человеческого тела, то акустическое давление действует на него со всех сторон в одной и той же фазе, периодически сжимая его. Во время сжатия происходит перемещение органов брюшной полости внутрь по направлению к грудной клетке и имеет место колебательное движение тканей, в первую очередь за счет вытеснения или сжатия воздуха, находящегося в полостях тела. Самая большая такая полость - грудная клетка. Основной колеблющейся массой являются органы брюшной полости, движущиеся как одно целое, то сжимая ее, то разряжая воздух в легких. Подобный эффект наблюдается и при действии низкочастотной вибрации, но в случае низкочастотных акустических колебаний звуковое давление действует на брюшную полость, грудную клетку и одновременно на воздух, поступающий в ротовую полость, трахею и легкие, т.е. как бы «снаружи и изнутри». Поэтому описанная биомеханическая система оказывается более жесткой для колебаний воздуха, чем для

вибрации, и главный торакоабдоминальный резонанс должен проявиться при частотах 40-60 Гц (в отличие от 4-8 Гц для общей вибрации).

Отдавая должное концептуальной логичности и полезности биодинамической модели сосредоточенного параметра организма человека, тем не менее, следует отметить, что она не учитывает нейробиологические аспекты восприятия низкочастотных акустических колебаний сенсорными системами (слуховая, вестибулярная реакция, проприорецепция, висцерорецепция), а также афферентных и эфферентных нервных образований головного и спинного мозга.

Экспериментальные исследования показывают, что тремор может вызываться раздражением ядер гипоталамуса и части ретикулярной формации около краснойядерно-спинномозгового пути. Вовлечение растрального отдела ретикулярной формации приводит к ритмическому гиперкинезу лица, языка, шеи, а нижних отделов краснойядерно-спинномозгового пути и ретикулярной формации - к дрожанию туловища. Механизм тремора объясняют существованием обратной связи в системах иннервации мышц, что приводит их к самовозбуждению и реализации тремора.

В основе тремора лежит синхронизация процессов возбуждения, возникающая под влиянием «водителя ритма», расположенного в стволе мозга и мозжечка. Приведенный патогенетический механизм экстрапирамидного гиперкинеза адекватен обнаруженным в наших исследованиях цитоморфологическим нарушениям указанных структур.

Анализ приведенных выше публикаций отечественных и зарубежных авторов показывает, что многие субъективные и объективные признаки воздействия ИЗ позволяют связать их с преходящими дисцефальными нарушениями.

11.4. ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ИНФРАЗВУКА

Основные направления исследований для усовершенствования гигиенического нормирования ИЗ включают следующие аспекты:

- гигиеническую оценку биологически значимых физических параметров ИЗ с учетом сопутствующих виброакустических факторов, и в первую очередь таких, как низкочастотный шум и вибрация. Учитываются влияние продолжительности экспозиции, прерывистый и непрерывный характер ИЗ воздействия;
- оценка состояния здоровья, включающая изучение заболеваемости, состояние психоэмоциональной сферы, когнитивной функции

на основании физиологических, психофизиологических и социологических исследований (анкетный опрос) с обработкой данных современными методами математического и статистического (комбинированное влияние факторов можно охарактеризовать при использовании множественного корреляционно-регрессионного анализа, канонической корреляции, факторного, дисперсионного и дискриминантного анализа и др.) анализа на ЭВМ для выявления факторной доли ИЗ в суммарном эффекте от факторов производственной и окружающей среды;

- экспериментальные исследования на добровольцах изолированного и совместного действия ИЗ с другими виброакустическими факторами для количественной оценки его влияния на субъективное восприятие, функциональные системы и психоэмоциональную сферу;

- экспериментальные исследования на животных с количественной оценкой влияния ИЗ на динамику биологических эффектов по показателям, характеризующим системы вестибулярного и слухового анализаторов, систему нейрогуморальной регуляции, а также некоторые показатели гомеостаза.

Необходимым условием гигиенического нормирования ИЗ является выбор объективных критериев, позволяющих судить о качественных изменениях в организме и дифференцировать такие состояния, как утомление и функциональные изменения, так как явная патология не может быть критерием вредности.

В процессе изучения влияния инфразвука на человека многими специалистами предложены разные предельно допустимые уровни, и по мере накопления данных о влиянии этого фактора на организм его предельные уровни снижаются.

Впервые предельно допустимые уровни инфразвука были предложены D.L. Johnson, C.W. Nixon (1973) [11.4] как безопасные для системы слуха, поскольку воздействие на все тело имело место при уровнях более 150 дБ, Предложенные уровни были рассчитаны для 8-минутного воздействия при 16-часовом отдыхе между экспозициями и составляли для частот 1-7 Гц 150 дБ; 8-11 Гц - 145 дБ; 12-20 Гц - 140 дБ.

Для установления ПДУ при длительных воздействиях авторы использовали метод экстраполяции и принцип «равной энергии». Предложенная формула равного риска, основанная на этом принципе, имела следующий вид:

$$УЗД = 10 \lg(\text{времени}) + 10 \lg(\text{частоты}) + \text{базовый } УЗД, \text{ дБ,}$$

где УЗД - уровень звукового давления.

Исходя из экспериментальных условий, инфразвук частотой 10 Гц и уровнем 144 дБ действовал в течение 8 мин и был рассчитан следующим образом:

$$ПДУ = 10 \lg \left(\frac{t}{8} \right) + 10 \lg \left(\frac{t}{20} \right) + 144 \text{ ПДУ} \sim 10 \lg | + 10 \lg 4 + 144, \text{ дБ.}$$

Ограничительные уровни для частот от 1 до 20 Гц представлены в табл. 11.5.

Т а б л и ц а 11.5

Предельно допустимые уровни инфразвука
[Johnson D.L., Nixon C.W., 1973]

Продолжительность в часах	Частоты, Гц			
	1	5	10	20
1	145	138	135	132
8	136	129	126	123
24	131	124	121	118

Как следует из табл. 11.5, для 8-часового действия предельно допустимые уровни имеют диапазон 123-136 дБ и возрастают со снижением частоты.

Международным коллоквиумом по ИЗ также был использован принцип «равенства энергии» и рекомендованы как безопасные для слухового анализатора уровни в диапазоне 120-140 дБ, возрастающие на 3 дБ на октаву с понижением частоты.

В 1974 г. А. Stan [11.4] предложил графически представить границы отдельных зон и действия ИЗ по материалам коллоквиума в Париже (рис. 11.2).

Однако практический интерес представляют данные об оценке влияния ИЗ на здоровье человека в целом, на его работоспособность и производительность труда в производственных условиях.

Из данных литературы видно, что ИЗ влияет не столько на орган слуха, сколько на организм в целом. Поэтому предложенные С.В. Nixon (1973) [11.4] предельные значения ИЗ можно рассматривать как допустимые при кратковременном действии (5 мин), При воздействии ИЗ на работающих продолжительное время значения предельных уровней должны быть ниже.

Необходимой основой решения проблемы защиты человека от ИЗ являются критерии, отражающие его неблагоприятное влияние на организм в целом. Таким образом, должен быть принят тот же критерий, что и для оценки шума, т.е. критерий сохранения здоровья. Это означает, что вредное действие ИЗ на человека не должно проявляться или проявляться весьма незначительно при систематическом его действии на организм в течение многих лет.

На основе литературных данных в качестве октавного предельно допустимого спектра ИЗ на рабочих местах предложены следующие величины: 16 Гц - 105 дБ; 8 Гц - 108 дБ, 4 Гц - 111 дБ; 2 Гц - 114 дБ. Это на 15 дБ ниже, чем рекомендует W.Tempest (1976).

В отечественных гигиенических (санитарных) нормах ИЗ на рабочих местах [11.19] в качестве допустимой нормы принят уровень 105 дБ в октавных полосах частот 2-16 Гц и 90 дБ для жилых территорий [11.2] (рис. 11.3).

Исследования, проведенные А.С. Нехорошевым (1986), А.С. Нехорошевым, В.В. Глинчиковым (1991, 1992) [11.4], позволили выделить следующие зоны активного и пассивного воздействия ИЗ:

- Зона «функционального покоя» - верхняя граница 85-90 дБ. В этой зоне ИЗ не оказывает влияния на организм.

- Зона «функционального утомления» - верхняя граница 105-115 дБ, в этой зоне при пребывании в условиях относительного звукового поля (ниже 90 дБ) в течение 15-20 мин. происходит полный восстановительный процесс. При сроках воздействия до 15 сут. (110 дБ) изменения в организме носили аналогичный характер, но время восстановительных процессов составляло около 6 ч.

- Зона «функциональных начальных деструктивных изменений» - верхняя граница 125-140 дБ (у миокарда 115-120 дБ), На восстановительные процессы в этой зоне требуется 2-2,5 суток пребывания в условиях относительного звукового покоя ниже уровня 90 дБ. При больших уровнях начинается зона необратимых деструктивных изменений в организме.

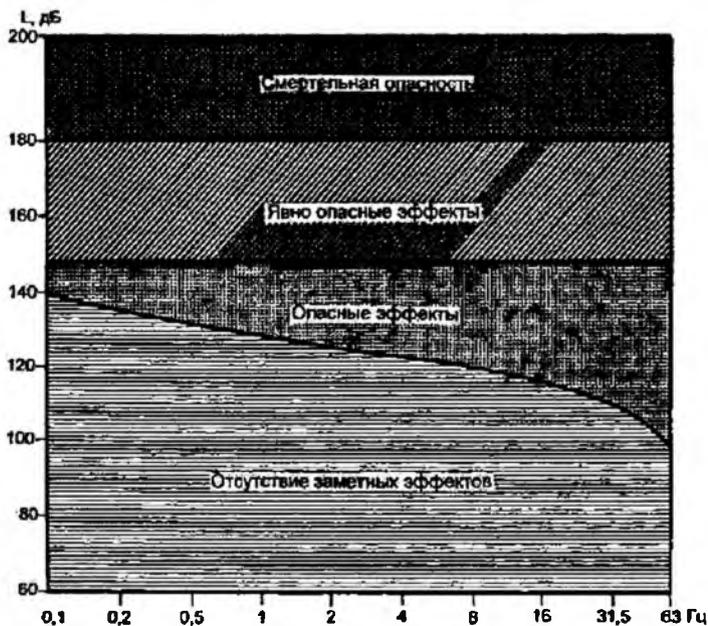


Рис. 11.2. Зоны предельных уровней инфразвуковых эффектов [Stan A., 1974] [11.4]

На основании проведенных исследований сотрудниками НИИ медицины труда РАМН, МНИИГ им. Ф.Ф. Эрисмана Санкт-Петербургской медицинской академии, Воронежской государственной медицинской академии М.Н. Бурденко были разработаны санитарные правила и нормы [11.23].

Этот нормативный документ устанавливает критерии безопасности, безвредности для человека в среде его обитания и требования к обеспечению благоприятных условий его жизнедеятельности.

Настоящие санитарные правила устанавливают классификацию, гигиенические регламенты, требования к проведению измерений и оценке ИЗ на рабочих местах, территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях, требования к организации защиты и мер профилактики неблагоприятных последствий, а также требования к проведению контроля за их соблюдением.

Гигиенические требования распространяются на вновь создаваемые, модернизируемые, закупаемые за рубежом и находящиеся в эксплуатации машины и оборудование, а также процессы, при которых возникает ИЗ, и предназначены для использования специалистами при

конструировании, проведении экспертизы нормативно-технической документации (ГОСТов, ТУ, ОСТ и др.), оценки, сертификации и реализации продукции населению торговыми предприятиями.

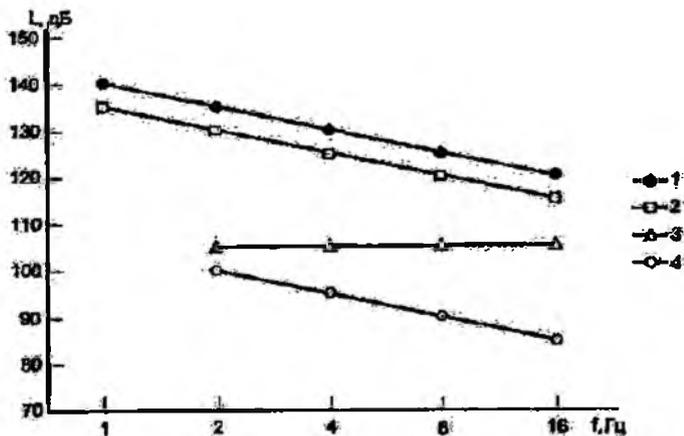


Рис. 11.3. Допустимые уровни инфразвука:

1 - предложены D.L. Johnson, С.W.Nixon (1973); 2 - рекомендованы специалистами на парижском коллоквиуме в 1973 г.; 3 - разработаны НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР в 1980 г., 4 - разработаны НИИ медицины труда РАМН в 1996 г. [11.4]

Анализ результатов комплексных гигиенических, физиологических, биохимических и морфологических исследований также свидетельствует в пользу необходимости введения в гигиенические нормы частотной коррекции ИЗ с понижением регламентируемого уровня на октаву в 5-6 дБ/окт. в отличие от принятых в Международном стандарте ИСО 7196.2 12 и 24 дБ, которые основаны на ауральных эффектах и субъективной оценке раздражающего действия ИЗ. Таким образом, новые данные по механизму биологического действия ИЗ на организм позволили предложить принципиально новую концепцию регламентации безопасного уровня. Предлагаемые предельные уровни в октавных полосах частот 2, 4, 8 и 16 Гц основаны на учете всего спектра неблагоприятных эффектов, реагировании целостного организма. Считается, что воздействие ИЗ таких уровней в течение полной рабочей смены на протяжении всего производственного стажа (до 40 лет) не приведет к развитию специфических и неспецифических заболеваний. Разработаны также гигиенические принципы ограничения неблагоприятного

действия ИЗ, базирующиеся на физических акустико-физиологических особенностях фактора и медико-технических требованиях к направлениям профилактики.

Полученные результаты явились основанием для обоснования градации ИЗ в зависимости от параметров по зонам риска здоровью, а также по классам вредности и опасности для состояния здоровья работающих и населения, что является существенным дополнением к Руководству Р 2.2.755-99 «Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса».

Принципы нормирования ИЗ. В НИИ медицины труда РАМН сформулированы основные рекомендации, в соответствии с которыми должны разрабатываться и совершенствоваться нормы на допустимые уровни ИЗ на рабочих местах, в жилых и общественных зданиях и на территории жилой застройки.

Нормирование по характеру спектра ИЗ: широкополосный, с непрерывным спектром шириной более одной октавы; тональный, в спектре которого имеются слышимые дискретные составляющие.

Гармонический характер ИЗ устанавливают в октавных полосах частот по превышению уровня в одной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ. При нормировании следует учитывать временные характеристики ИЗ, по которым фактор подразделяется на постоянный и непостоянный.

Постоянный ИЗ - его уровень звукового давления изменяется за время не более чем в 2 раза (на 6 дБ) при измерениях по шкале шумомера «Линейная» на временной характеристике «Медленно», Уровень звукового давления непостоянного ИЗ изменяется не менее чем в 2 раза (на 6 дБ) при измерениях по шкале шумомера «Линейная» на временной характеристике «Медленно».

Нормируемыми характеристиками постоянного инфразвука являются уровни звукового давления (L_p) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц в дБ, определяемые по следующей формуле [11.3]:

$$L_p = 10 \lg(P^2 / P_0^2),$$

где P - среднеквадратичное значение звукового давления, Па; P_0 - исходное значение звукового давления в воздухе, равное $2 \cdot 10^{-5}$, Па.

Нормируемыми характеристиками непостоянного ИЗ являются эквивалентные по энергии уровни звукового давления ($L_{ЭКВ}$) в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц и эквивалентный общий уровень звукового давления, выраженный в дБ и определяемый по формуле [11.4]:

$$L_{ЭКВ} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,11 L_i} \right),$$

где T - период наблюдения, ч; t_i - продолжительность действия шума с уровнем L_i , ч; n - общее число промежутков действия ИЗ; L_i - логарифмический уровень ИЗ в i -й промежуток времени, дБ.

Эквивалентный уровень может быть установлен при непосредственном инструментальном измерении или путем расчета по измеренному уровню и продолжительности воздействия.

В качестве дополнительной характеристики для оценки ИЗ (например, в случае тонального ИЗ) могут быть использованы уровни звукового давления в 1/3 октавных полосах со среднегеометрическими частотами 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16 и 20 Гц. Их следует пересчитывать в уровни в октавных полосах частот с указанными среднегеометрическими частотами в соответствии с «Методическими указаниями по проведению измерений и гигиенической оценки шумов на рабочих местах».

В табл. 11.5 приведены нормативные уровни ИЗ для различных видов работ и мест измерения. Для колеблющегося во времени и прерывистого ИЗ уровни звукового давления, измеренные по шкале шумомера «Линейная», не должны превышать 120 дБ.

Для шумов, спектр которых охватывает ИЗ и слышимый диапазоны, измерение и оценка скорректированного уровня звукового давления ИЗ является дополнительной к измерению и оценке шума.

При воздействии ИЗ на человека в течение суток, в рабочее и нерабочее время, суммарную оценку воздействия следует проводить в соответствии с «Методическими указаниями по гигиенической оценке производственной и непроизводственной шумовой нагрузки».

Измерение и гигиеническая оценка ИЗ, а также профилактические мероприятия должны проводиться в соответствии с руководством СН 2.2,4/2.1.8.583-96.

Таблица 11.5

Предельно допустимые уровни ИЗ на рабочих местах, допустимые уровни в жилых и общественных зданиях и на территории жилой застройки

№ № п/п	Назначение помещений	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц				Общий уровень звукового давления, дБ Лин
		2	4	8	16	
1	Работа с различной степенью тяжести и напряженности трудового процесса в производственных помещениях и на территории предприятий: - работы различной степени сложности; - работы различной степени интеллектуальноэмоциональной напряженности	100	95	90	85	100
		95	90	85	80	95
2	Территория жилой застройки	90	85	80	75	90
3	Помещения жилых и общественных зданий	75	70	65	60	75

ГЛАВА 12. УЛЬТРАЗВУК

12.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКА

Ультразвук (УЗ) - колебания и волны в упругих средах с частотой, превышающей верхнюю границу слышимого звука.

По своей природе УЗ волны не отличаются от звуковых, а также ИЗ волн, имеющих частоту ниже нижней границы слышимого звука.

Граница между звуком и УЗ, например, зависит от индивидуальных особенностей человеческого слуха. Одни люди не слышат звуки с частотой и 10 кГц, другие могут воспринимать звуки с частотой до 25 кГц.

К УЗ относятся упругие колебания и волны с частотой выше 20 кГц, не слышимые человеческим ухом. В настоящее время удается получать УЗ колебания с частотой до 10 ГГц. Соответственно указанным частотным диапазонам область длины УЗ волн в воздухе составляет от 1,6 до $0,3 \cdot 10^{-4}$ см, в жидкостях - от 6,0 до $1,2 \cdot 10^{-4}$ см и в твердых телах - от 20,0 до $4,0 \cdot 10^{-4}$ см.

Распространение УЗ подчиняется основным законам, общим для акустических волн любого диапазона частот. К основным законам распространения УЗ относятся законы отражения и преломления на границах различных сред, дифракция и рассеяние УЗ при наличии препятствий и неоднородностей на границах, законы волноводного распространения в ограниченных участках среды.

Верхняя граница УЗ диапазона обусловлена физической природой упругих волн, которые могут распространяться в среде лишь при условии, что длина волны больше средней длины свободного пробега молекул в газах или межмолекулярных (межатомных) расстояний в жидкостях и твердых телах. Исходя из этого, нетрудно рассчитать, что верхняя граница УЗ диапазона в газах составляет около 1 ГГц, а в твердых телах - примерно 10^{13} Гц.

УЗ с частотой более 1 ГГц иногда выделяют в отдельный диапазон и называют гиперзвуком.

Вместе с тем высокая частота УЗ колебаний и малая длина волн обуславливают ряд специфических свойств, присущих только УЗ.

Так, возможно визуальное наблюдение УЗ волн с помощью оптических методов. Далее, благодаря малой длине волны УЗ волны хорошо фокусируются, и, следовательно, возможно получение направленного излучения. Еще одна весьма важная особенность УЗ заключа-

ется в возможности получения высоких значений интенсивности при относительно небольших амплитудах колебаний.

Уменьшение амплитуды и интенсивности УЗ волны по мере ее распространения в заданном направлении, т. е. затухание, определяется рассеиванием и поглощением УЗ, переходом УЗ энергии в другие формы, например тепловую.

12.2. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОЛЕ

Решение ряда задач, связанных с практическим применением УЗ, невозможно без знания характера акустического поля, т.е. распределения в пространстве звукового давления или интенсивности.

Известно, например, что скорость разрушения клеток крови в суспензии под действием УЗ зависит от его интенсивности. Однако даже плоский излучатель, используемый в установке для определения скорости ультразвукового цитолиза, дает весьма неоднородное поле.

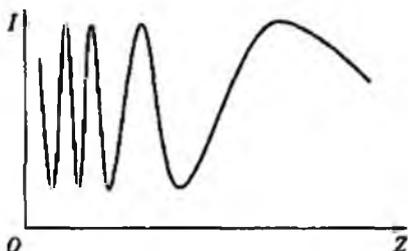


Рис. 12.1. Идеализированное поле плоского акустического излучателя

В медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии нашел широкое применение плоский высокочастотный излучатель. Для практических целей можно принять, что амплитуда колебаний на его поверхности всюду постоянна, а диаметр D намного больше длины УЗ волны. Идеализованная форма звукового поля этого излучателя представлена на рис. 12.1.

Вблизи поверхности плоского высокочастотного излучателя ультразвуковое поле сосредоточено в цилиндрическом объеме диаметром D и длиной Z_0 .

Начиная с расстояния $Z_0 = D / A\lambda$ поле конусообразно расширяется. Интервал от излучателя до Z_0 называется ближней зоной, или

зоной Френеля. Область, где $Z > Z_0$, называется дальней зоной, или зоной Фраунгофера. В этой зоне амплитуда давления падает пропорционально расстоянию от излучателя. Угол между направлением распространения УЗ волны и образующей пучка определяется условием $\sin \alpha = A\lambda / D$ (λ - длина волны).

Для круглой пластинки $A = 1,22$, D - диаметр круга; для квадратной пластинки $A = 1$, D - сторона квадрата.

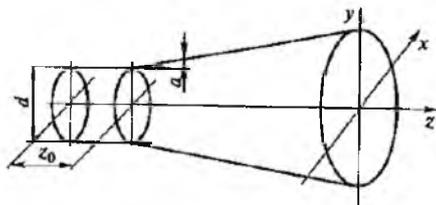


Рис. 12.2. Изменение интенсивности колебаний в упругой волне в зависимости от расстояния до излучателя

Распространено представление о плоском характере волны в ближней зоне. В действительности поле в этой зоне имеет весьма сложный характер, что объясняется наложением волн, излучаемых отдельными участками поверхности излучателя. Анализ показывает, что интенсивность УЗ в ближней зоне периодически меняется в интервале от излучателя до Z_0 (рис. 12.2). Последний максимум находится на расстоянии Z_0 . Далее амплитуда звукового давления монотонно уменьшается.

Распределение интенсивности УЗ в поперечном к оси сечении также неоднородно и зависит от расстояния до излучателя.

В ближней зоне, при $Z < Z_0$, интенсивность может иметь несколько максимумов. В дальней зоне, при $Z > Z_0$, интенсивность имеет один максимум и монотонно падает по мере удаления от оси пучка.

Эти зависимости легко проверить, измеряя, например, распределение интенсивности вдоль диаметра плоского круглого излучателя, излучающего ультразвук в воду или другую жидкость.

Следует отметить, что распределение интенсивностей в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения УЗ волн, будет меняться в зависимости от расстояния до излучателя, однако характер этого распределения сохранится, по крайней мере, на расстояниях, сравнимых с диаметром излучающей поверхности

Для оценки распределения интенсивностей в УЗ ноле удобно воспользоваться любым точечным приемником УЗ и простым координатным устройством из двух взаимно перпендикулярных линеек (рис. 12.3,а). Площадь под экспериментальной кривой на приведенном рисунке пропорциональна энергии УЗ. Средняя интенсивность соответствует высоте прямоугольника, построенного на том же основании, что и экспериментальная кривая, и имеющего площадь» ограниченную экспериментальной кривой (рис. 12.3,б)

Более точные измерения распределения интенсивностей позволяют выявить также и добавочные максимумы (лепестки) интенсивности. Зависит распределение интенсивностей в поле и от соотношения размеров излучателя с длиной волны излучаемого УЗ, и от свойств самого излучающего элемента, и от способа его крепления в излучателе.

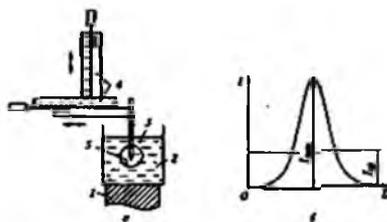


Рис. 12.3. Метод регистрации распределения интенсивности ультразвука вдоль диаметра высокочастотного излучателя:

а - схема регистрации (1 - излучатель ультразвука; 2 - кювета с жидкостью; 3 - ультразвуковой зонд 4- координатной устройством; 5- чувствительный элемент зонда - дифференциальная термопара, один из спаев которой sensibilizirovan эпоксидной смолой); б- распределение интенсивности для плоского излучателя, б - экспериментальная кривая

Таким образом, даже в идеальных условиях, поле в ближней зоне излучателя весьма неоднородно, и максимальные значения интенсивности могут в 3-4 раза отличаться от средних значений. Это следует учитывать при определении порогов физико-химического и биологического действия ультразвука

Следует отметить, что далеко не все исследователи учитывают особенности распределения интенсивностей в поле используемых ими УЗ излучателей и это может быть одной из причин расхождения в полученных ими результатах.

Затухание УЗ. Распространяясь в среде, УЗ волны затухают, и их интенсивность, а следовательно, и амплитуда колебания частиц среды уменьшаются с увеличением расстояния от источника. Затухание обусловлено поглощением звука средой, т.е. переходом звуковой энергии в другие виды энергии, в частности в тепловую энергию, рассеянием звука на неоднородностях среды, в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении распространения волны, а также расхождением звукового луча по мере удаления от источника.

Плоская волна в однородной среде затухает в основном в результате поглощения УЗ. Амплитуда колебания частиц и интенсивность ультразвука уменьшаются с расстоянием согласно уравнениям

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad A = A_0 e^{-\alpha x},$$

где I_0 и A_0 - интенсивность УЗ и амплитуда колебания частиц вблизи источника; I и A - интенсивность и амплитуда на расстоянии x от источника; α - коэффициент поглощения; e - число Непера ($e = 2,72$).

Коэффициент поглощения, в жидких средах пропорционален их вязкости η и квадрату частоты колебаний [12.1]:

$$\alpha = \frac{2\eta f^2}{3\rho c^3},$$

где ρ - плотность среды; c - скорость продольных волн.

Коэффициент поглощения α быстро увеличивается с возрастанием частоты, зависит от свойств вещества, в котором распространяется волна, а также температуры, давления и других условий.

Величина $1/\alpha$, обратная коэффициенту поглощения, определяет расстояние, на котором амплитуда колебаний частиц уменьшается в e раз.

Затухание УЗ в биологических тканях значительно больше, чем в воде. Так, затухание в жировой ткани в 4 раза, в мышце в 10 раз, а и костной ткани примерно в 75 больше, чем в воде или в жидких биологических средах - крови и лимфе.

В терапевтических целях для эффективного воздействия на ткани чаще всего используют УЗ с частотой 0,7 МГц и выше. УЗ в диапазоне 0,7...1 МГц обычно применяют для воздействия на глуболежащие ткани и внутренние органы. Для лечения кожных заболеваний частоту повышают до 2,5...3 МГц.

В диагностике, в частности для визуализации внутренних органов, применяют интенсивный импульсный УЗ с частотой 6...10 МГц, так как разрешающая способность диагностической аппаратуры пропорциональна частоте УЗ. При более высоких частотах поглощение УЗ значительно увеличивается. Поэтому для получения сигнала, отраженного от внутренних органов, пришлось бы применять слишком высокие интенсивности ультразвука, опасные для жизнедеятельности организма.

Поглощенная веществом, в частности биологическими средами, УЗ энергия выделяется в основном в виде тепла, что приводит к повышению температуры вещества. Это повышение температуры неоднократно измеряли экспериментально и рассчитывали теоретически. Теплопродукция в разных тканях неодинакова из-за различий в их коэффициентах поглощения.

12.3. ИСТОЧНИКИ И ПРИЁМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА

Источники ультразвука. Существует множество устройств-преобразователей, применяемых для возбуждения УЗ колебаний и воли в газах, жидкостях и твердых телах. Эти устройства преобразуют тепловую, механическую, электрическую или другие виды энергии в энергию УЗ поля. Проще всего получить УЗ, используя обычную струну. Частота колебаний струны, как известно, зависит от длины и, постепенно укорачивая ее, можно извлекать все более высокие звуки. Струна длиной в 10 см колеблется уже с частотой 25 кГц, находящейся за пределами возможностей человеческого слуха.

Струна в качестве механического преобразователя используется в моноорде - приборе для определения верхнего предела слышимости.

Этим, однако, и ограничивается применение моноорда, поскольку колебания струны обладают слишком малой энергией и быстро затухают.

Наиболее удобными для исследовательских и практических целей в ветеринарии, медицине, экспериментальной биологии и УЗ технологии оказались электроакустические преобразователи, в частности пьезоэлектрические и магнитострикционные. Нашли применение также струйные излучатели - УЗ свистки, преобразующие кинетическую энергию струи газа или жидкости в энергию акустических колебаний. Газоструйные излучатели наиболее эффективны для получения аэрозолей в больших объемах.

Излучатели УЗ характеризуются мощностью излучения, частотой колебаний, направленностью излучения, коэффициентом полезного действия.

Наибольшее распространение в УЗ медицинской технике получили пьезоэлектрические преобразователи. Позволяя получать акустические колебания в диапазоне частот от нескольких кГц до десятков и сотен МГц, они используются в аппаратах для УЗ терапии, в диагностических приборах, применяемых в медицине и ветеринарии, в устройствах для УЗ стимуляции биотехнологических процессов.

Принцип действия пьезоэлектрических преобразователей основан на эффекте, открытом в 1860 г. Пьером и Жюлио Кюри, наблюдавшими его у кварца и некоторых других кристаллов.

Если пластинку, определенным образом вырезанную из пьезоэлектрика, подвергнуть деформации, то на ее поверхности появятся электрические заряды. Это явление получило название прямого пьезоэффекта.

При внесении пластинки в ЭП она деформируется, и величина деформации линейно зависит от напряженности ЭП (обратный пьезоэффект). Переменное ЭП вызывает периодические деформации в пьезоэлектрике, частота которых равна частоте изменения ЭП, амплитуда деформации достигает наибольших значений, если частота переменного ЭП совпадает с собственной частотой колебаний преобразователя, определяемой его размерами.

Периодические деформации пьезоэлектрического преобразователя и служат источником акустических волн.

В ветеринарии, биотехнологии и экспериментальной биологии наряду с высокочастотным УЗ используется и УЗ низкой частоты, весьма эффективный для решения ряда практических задач.

УЗ в диапазоне частот от самых низких и до примерно 100 кГц чаще всего получают, применяя магнитострикционные преобразователи, представляющие собой магнитопровод с навитой на него обмоткой. Переменный ток, протекающий по обмотке, создает ПемП, преобразующееся в энергию механических колебаний магнитопровода. Следует отметить, что этот эффект обратим, т. е. если деформировать магнитопровод, то в нем возникает МП, которое вызывает в обмотке появление электрического тока.

В зависимости от поставленной цели магнитострикционные преобразователи используют в сочетании с теми или иными пассивными элементами - диафрагмами, если необходимо воздействовать на процессы, протекающие в жидкости, или стержневыми концентраторами,

обеспечивающими увеличение амплитуды колебаний и составляющими основу УЗ хирургических и инструментов.

В отличие от магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей газоструйные излучатели генерируют колебания в широком диапазоне частот, в том числе звуковых. Этим существенно ограничивается применение газоструйных аэрозольных генераторов, так как их работа сопровождается сильным шумом.

Газоструйный генератор аэрозоля представляет собой совокупность УЗ свистка и пульверизатора (рис. 12.4). Воздушная струя увлекает с собой жидкость из резервуара и вместе с ней через кольцевой зазор попадает на отражатель. Часть смеси воздуха с каплями жидкости отражается во внутренний объем. Здесь давление периодически повышается до критических значений, достаточных для разрыва кольцевой струи. После этого давление в резонирующем объеме снова падает ниже критического, и цикл повторяется.

Такой газоструйный излучатель УЗ обеспечивает дробление захваченной струей воздуха жидкости на капли микронных размеров, образующих стабильное облако аэрозоля.

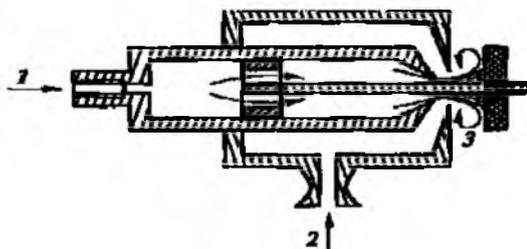


Рис. 12.4. Газоструйный генератор аэрозоля:

1 - подача сжатого воздуха; 2 - отражатель кольцевой струи; 3 - кольцевое сопло

Газоструйный генератор аэрозоля представляет собой совокупность УЗ свистка и пульверизатора (рис. 12.4). Воздушная струя увлекает с собой жидкость из резервуара и вместе с ней через кольцевой зазор попадает на отражатель. Часть смеси воздуха с каплями жидкости отражается во внутренний объем. Здесь давление периодически повышается до критических значений, достаточных для разрыва кольцевой струи. После этого давление в резонирующем объеме снова падает ниже критического, и цикл повторяется.

Такой газоструйный излучатель УЗ обеспечивает дробление захваченной струей воздуха жидкости на капли микронных размеров, образующих стабильное облако аэрозоля.

Приёмники УЗ. Обнаружить в жидкости поле УЗ относительно большой интенсивности достаточно просто по совокупности характерных признаков: появлению на поверхности жидкости ряби, а при более высоких интенсивностях и фонтана; по акустическим течениям, приводящим к перемешиванию жидкости; по кавитации, сопровождающейся характерным шумом, УЗ свечением, специфическими химическими реакциями, эрозией поверхности предметов в УЗ поле; по выделению тепла, особенно на границах тел с отличающимися акустическими сопротивлениями и т. д.

Измерить параметры УЗ - его интенсивность, амплитуду колебания, колебательную скорость и ускорение частиц в УЗ волне, а также УЗ давление - можно при помощи специальных устройств - приемников УЗ. Приемники, размеры которых намного больше длины волны УЗ, дают усредненные значения измеряемой величины, а структуру УЗ поля можно получить лишь с помощью приемников, размеры которых меньше длины волны.

В биомедицинской практике, как правило, учитывают частоту и интенсивность УЗ, а также форму поля. В биотехнологии при использовании низкочастотного УЗ измеряют плотность акустической энергии в среде.

Частота УЗ обычно задается конструкцией и параметрами излучателей. Частота не может быть выбрана произвольно, она должна соответствовать одной из частот, разрешенных Международной электротехнической комиссией.

В медицине и экспериментальной биологии для воздействия на организм с хирургической или терапевтической целью обычно используют УЗ с частотами 22, 44, 880 кГц, 2,65 МГц, а также УЗ более высоких частот в диапазоне 2...10 МГц для применения в диагностике.

Природа УЗ эффектов качественно одинакова в широком диапазоне частот, и лишь количественные различия приводят к появлению характерных особенностей, оправдывающих условное деление УЗ диапазона на низкочастотный и высокочастотный.

Биологическое действие УЗ весьма существенно зависит от его интенсивности, меняя которую, можно получить любые эффекты - от стимуляции до разрушения. Поэтому выбор, а значит, и измерение интенсивности УЗ требует особой тщательности.

Из множества разработанных к настоящему времени методов измерения интенсивности УЗ в медицине чаще всего используется радиометр (УЗ весы), позволяющий определить усредненную интенсивность, но давлению звукового излучения.

Для более точных измерений используют калориметрический метод, основанный на измерении изменения температуры в теплоизолированном сосуде (термосе), заполненном поглощающим УЗ веществом. Этот метод, так же, как и радиометрический, позволяет определить только средние значения интенсивности УЗ и характеризуется еще большей инерционностью.

Для измерения интенсивности УЗ в разных точках поля и в тех случаях, когда необходимо знать характер быстрых изменений интенсивности УЗ во времени, используют УЗ приемники-зонды, размеры которых меньше длины волны.

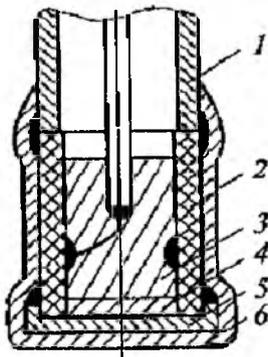


Рис. 12.5. Конструкция миниатюрного гидрофона:

1 - никелевая трубочка; 2 - металлизированный внутри и снаружи пьезокерамический цилиндр; 3 - легкоплавкий припой; 4 - изолирующая прокладка; 5 - экранирующая крышка из фольги; 6 - пленка эпоксидного лака

Простейший по конструкции УЗ зонд представляет собой дифференциальную термопару, один из спаев которой sensibilizирован слоем эпоксидной смолы.

Пьезоэлектрические приемники УЗ в жидких средах (гидрофоны) значительно превосходят термопарные зонды по многим параметрам. Приемники этого типа преобразуют УЗ сигнал непосредственно в электрический. Их крайне малая инерционность позволяет воспроизводить

форму сигнала и, следовательно, получать информацию о его амплитуде, фазе, частоте и спектре.

Одна из простейших конструкций приемника УЗ с цилиндрическим пьезокерамическим приемным элементом (гидрофона) показана на рис. 12.5.

12.4. КЛАССЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ УЛЬТРАЗВУКА

По способу распространения ультразвуковых колебаний выделяют:

- контактный способ - УЗ распространяется при соприкосновении рук или других частей тела человека с источником УЗ, обрабатываемыми деталями, приспособлениями для их удержания, озвученными жидкостями, сканерами медицинских диагностических приборов, физиотерапевтической и хирургической УЗ аппаратуры и т. д.;
- воздушный способ - УЗ распространяется по воздуху.

По типу источников УЗ колебаний выделяют: ручные источники, стационарные источники.

По спектральным характеристикам УЗ колебаний выделяют: низкочастотный УЗ – 16- 63 кГц (указаны среднегеометрические частоты октавных полос); среднечастотный УЗ - 125 - 250 кГц; высокочастотный УЗ- 1,0 - 31,5 МГц.

По режиму генерирования УЗ колебаний выделяют: постоянный ультразвук, импульсный ультразвук.

По способу излучения УЗ выделяют: источники УЗ с магнитострикционным генератором, источники УЗ с пьезоэлектрическим генератором[12.2].

12.5. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Общие виды биологического воздействия. УЗ волны способны вызывать разнонаправленные биологические эффекты, характер которых определяется интенсивностью УЗ колебаний, частотой, временными параметрами колебаний (постоянный, импульсный), длительностью воздействия, чувствительностью тканей.

При систематическом воздействии интенсивного низкочастотного УЗ с уровнями, превышающими предельно допустимые, у работающих могут наблюдаться функциональные изменения центральной и периферической нервной системы, сердечно-сосудистой, эндокринной систем, слухового и вестибулярного анализаторов, гуморальные нару-

шения. Наиболее характерным является наличие вегетососудистой дистонии и астенического синдрома. Лица, длительное время обслуживающие низкочастотное УЗ оборудование, предъявляют жалобы на головную боль, головокружение, общую слабость, быструю утомляемость, расстройство сна, сонливость днем, раздражительность, ухудшение памяти, повышенную чувствительность к звукам, боязнь яркого света. Встречаются также жалобы на похолодание конечностей, приступы бледности или покраснения лица, нередко жалобы диспепсического характера.

Общие церебральные нарушения часто сочетаются с явлениями умеренного вегетативного полиневрита рук. Это обусловлено тем, что наряду с общим воздействием УЗ на организм работающих через воздух низкочастотный УЗ оказывает локальное действие при соприкосновении с обрабатываемыми деталями и средами, в которых возбуждены колебания, или с ручными источниками.

Так, например, в период загрузки и выгрузки деталей из УЗ ванн, при удержании деталей и выполнении других технологических операций интенсивность воздействующего на руки УЗ может достигать 10 Вт/см² и более.

Операторы низкочастотных УЗ установок могут подвергаться также воздействию других факторов производственной среды (органические растворители, поверхностно-активные вещества - ПАВ, свинец и др.), загрязняющие воздух рабочих помещений, одежду и руки работающих.

При воздействии низкочастотного УЗ вегетативно-сосудистые нарушения наступают (при одинаковом стаже работы), как правило, раньше, чем высокочастотные, и характеризуются наличием трофических расстройств, распространяющихся на мышечную ткань с последующей гипертрофией мышц кисти.

Систематический, даже кратковременный контакт с жидкими и твердыми средами, в которых возбуждены УЗ колебания, заметно усиливает действие воздушного УЗ.

По сравнению с высокочастотным шумом УЗ слабее влияет на слуховую функцию, но вызывает более выраженные отклонения от нормы со стороны вестибулярной функции.

Применяемые в промышленности, биологии, медицине интенсивности контактного УЗ принято подразделять на низкие (до 1,5 Вт/см²), средние (1,5-3,0 Вт/см²) и высокие (3,0-10,0 Вт/см²).

По данным ряда исследователей, в зависимости от интенсивности контактного УЗ различают три основных типа его действия:

УЗ низкой интенсивности способствует ускорению обменных процессов в организме, легкому нагреву тканей, микро-массажу и т.д. Низкие интенсивности не дают морфологических изменений внутри клеток, так как переменное звуковое давление вызывает только некоторое ускорение биофизических процессов, поэтому малые экспозиции УЗ рассматриваются как физиологический катализатор.

УЗ средней интенсивности за счет увеличения переменного звукового давления вызывает обратимые реакции угнетения, в частности нервной ткани. Скорость восстановления функций зависит от интенсивности и времени облучения УЗ.

УЗ высокой интенсивности вызывает необратимые угнетения, переходящие в процесс полного разрушения тканей.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что УЗ колебания, генерируемые в импульсном режиме, оказывают несколько иное биологическое действие, чем постоянные колебания. Своеобразие физиологического действия импульсного УЗ заключается в меньшей выраженности, но большей мягкости и длительности проявления эффектов. Мягкость действия импульсного контактного УЗ связана с преобладанием физико-химических эффектов действия над тепловым и механическим.

Воздействие УЗ на биологические структуры обусловлено целым рядом факторов. Эффекты, вызываемые УЗ, условно подразделяют на:

- механические, вызываемые знакопеременным смещением среды, радиационным давлением и т.д.;
- физико-химические, связанные с ускорением процессов диффузии через биологические мембраны, изменением скорости биологических реакций;
- термические, являющиеся следствием выделения тепла при поглощении тканями УЗ энергии, повышением температуры на границах тканевых структур, нагревом на газовых пузырьках;
- эффекты, связанные с возникновением в тканях УЗ кавитации (образование с последующим захлопыванием парогазовых пузырьков в среде под действием УЗ).

Данные о действии высокочастотного УЗ на организм человека свидетельствуют о полиморфных и сложных изменениях, происходящих почти во всех тканях, органах и системах.

Происходящие под воздействием УЗ (воздушного и контактного) изменения подчиняются общей закономерности: малые интенсивности

стимулируют, активируют, средние и большие угнетают, тормозят и могут полностью подавлять функции.

Высокочастотный контактный УЗ вследствие малой длины волны практически не распространяется в воздухе и оказывает воздействие на работающих только при контакте источника УЗ с поверхностью тела. Изменения, вызванные действием контактного УЗ, обычно более выражены в зоне контакта, чаще это пальцы рук, кисти, хотя не исключается возможность дистальных проявлений за счет рефлекторных и нейрогуморальных связей. Длительная работа с УЗ при контактной передаче на руки вызывает поражение периферического нейрососудистого аппарата, причем степень выраженности изменений зависит от интенсивности УЗ, времени озвучивания и площади контакта, т.е. УЗ экспозиции, и может усиливаться при наличии сопутствующих факторов производственной среды, усугубляющих его действие (воздушный УЗ, локальное и общее охлаждение, контактные смазки - различные виды масел, статическое напряжение мышц и т.д.).

Среди работающих с источниками контактного УЗ отмечен высокий процент жалоб на наличие парестезий, повышенную чувствительность рук к холоду, чувство слабости и боли в руках в ночное время, снижение тактильной чувствительности, потливость ладоней. Имеют место также жалобы на головные боли, головокружение, шум в ушах и голове, на общую слабость, сердцебиение, болевые ощущения в области сердца.

Впервые в 1989 г. вегетативно-сенсорная (апгионевроз) полинейропатия рук, разбивающаяся при воздействии контактного УЗ, признана профессиональным заболеванием и внесена в список профзаболеваний. Установлено, что биологическое действие УЗ колебаний при контактной передаче обусловлено влиянием на нервно-рецепторный аппарат кожи с последующим включением рефлекторных, нейрогуморальных связей и определяется механическими и физико-химическими факторами, поскольку роль термического и кавитационного компонентов при уровнях, создаваемых источниками УЗ в контактных средах, незначительно [12.3].

Специфические особенности воздействия на работающих контактного УЗ, обусловленные его высокой биофизической активностью, проявляются в сенсорных, вегетативно-сосудистых нарушениях и изменениях опорно-двигательного аппарата верхних конечностей.

Наряду с изменениями нейромышечного аппарата у лиц, работающих с источниками контактного УЗ, выявляются изменения костной структуры в виде остеопороза, остеосклероза дистальных отделов

фаланг кистей, а также некоторые другие изменения дегенеративно-дистрофического характера. Наиболее информативным рентгенологическим методом, позволяющим дать количественную характеристику состояния минеральной насыщенности костной ткани и оценить степени остеопоротических изменений, является метод рентгеноденситофотометрии.

Результаты клинико-физиологических исследований позволяют сделать вывод о возможности развития генерализованных рефлекторно-сосудистых изменений при воздействии контактного ультразвука. Однако патогенез изменений, выявленных у больных с выраженными проявлениями ультразвуковой патологии желудочно-кишечного тракта, почек, сердечно-сосудистой системы, пока изучен недостаточно.

При разработке эффективных профилактических мероприятий, направленных на оптимизацию и оздоровление условий труда работников УЗ профессий, на первое место выдвигаются вопросы гигиенического нормирования УЗ как неблагоприятного физического фактора производственной среды и среды обитания.

Механизмы биологического воздействия УЗ. Поток молекул через клеточную мембрану описывается первым законом Фика [12.1]

$$\bar{j} = -D \frac{dc}{dx}$$

где D - коэффициент диффузии; dc/dx - градиент концентрации вещества.

$$\bar{j} = -D \frac{c_{11} - c_1}{l} = P(c_1 - c_{11})$$

В стационарных условиях dc/dx можно заменить отношением разности концентраций $c_{11} - c_1$ к толщине мембраны l , где $P = D/l$ - коэффициент проницаемости мембраны.

Для молекул, диффундирующих сквозь нее, этот коэффициент определяется толщиной мембраны и коэффициентом диффузии.

В реальных условиях слои раствора, непосредственно прилегающие к мембране, практически не перемешиваются, следовательно, концентрация диффундирующих молекул в данных слоях может существенно отличаться от концентрации аналогичных молекул в объеме. Толщина этих так называемых слоев Нернста меняется от единиц до сотен микрометров и зависит от свойств поверхности и интенсивности перемешивания раствора. Совокупность собственно мембраны с диф-

фузионными слоями можно рассматривать как эффективную мембрану, толщину которой определяют по формуле:

$$l_{эфф} = l + \Delta_{x_1} + \Delta_{x_2},$$

где Δ_{x_1} и Δ_{x_2} - толщины диффузионных слоев по обе стороны от мембраны.

Поток через мембрану описывается уравнением [12.6]

$$\vec{j}_{эфф} = -D_{эфф} \frac{c_{11} - c_1}{l_{эфф}} = P_{эфф} (c_1 - c_2).$$

где $D_{эфф}$ - обобщенный коэффициент диффузии с прилегающими слоями; $P_{эфф}$ - проницаемость; $c_1 - c_2$ - концентрации молекул.

Под влиянием УЗ величины Δ_{x_1} и Δ_{x_2} существенно уменьшаются в результате интенсивного перемешивания раствора микропотоками. Соответственно уменьшается $l_{эфф}$ и возрастает поток веществ через мембрану

Коэффициент диффузии в среде и диффузионных слоях также может меняться под действием УЗ, так как цитоплазма и прилегающая к поверхности клетки среда отличаются выраженной тиксотропией, и уже при интенсивности УЗ 40 мВт/см², используемой в диагностике, вязкость клеточного содержимого существенно уменьшается, а температура среды несколько увеличивается за счет поглощения УЗ энергии. Возрастание температуры среды и уменьшение ее вязкости приведут к увеличению коэффициента диффузии в при мембранных слоях, что обусловит увеличение потока молекул не электролитов через мембраны.

Путем обычной диффузии через клеточные мембраны в клетку проникают самые разные соединения. Помимо воды это незаряженные молекулы многих растворимых в воде веществ, в том числе многих сложных лекарственных препаратов. В то же время трансмембранный транспорт ряда жизненно важных для клетки веществ осуществляется специальными, присутствующими в мембранах клетки переносчиками,

Такой транспорт по градиенту концентрации, не требующий затраты энергии, называют облегченной диффузией.

При облегченной диффузии, так же, как и в случае простой диффузии, УЗ микро-потоки, перемешивая среду, частично снимают диффузионные ограничения и ускоряют перенос веществ. Это подтверждается ускорением поглощения эритроцитами глюкозы из инкубационной среды при облучении суспензии клеток ультразвуком с интенсивностью $0,1 \text{ Вт/см}^2$.

При активном транспорте перенос молекул через мембрану осуществляется против градиента концентрации с затратой энергии. Действие УЗ микро-потоков снижает эффективность транспортировки веществ. В этом случае поток частиц, например, ионов натрия, складывается из двух слагаемых:

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{диф}} + \vec{j}_{\text{а.м.}}$$

где $\vec{j}_{\text{диф}}$ - поток ионов Na^+ за счет простой диффузии; $\vec{j}_{\text{а.м.}}$ - поток ионов Na^+ , активно транспортируемых через мембрану.

Очевидно, что $\vec{j}_{\text{диф}}$ и $\vec{j}_{\text{а.м.}}$ противоположно направлены и в стационарных условиях равны.

Под влиянием УЗ $\vec{j}_{\text{диф}}$ увеличивается, а в лучшем случае не изменяется. В результате нарушается равновесие ионов на мембране, изменяется её потенциал.

В этих рассуждениях не учитывалось действие УЗ на структуру самой мембраны.

Между тем, УЗ потоки способны «смыть» с поверхности мембран биомакромолекулы. Это меняет условия экранировки зарядов на мембранах и влияет на их проницаемость и условия диффузии ионов через мембраны.

Интенсивные микро-потоки способны нарушать целостность клеточных мембран, через разрывы в которых частично или полностью вытекает содержимое клеток. Этот случай может рассматриваться как предельный случай изменения условий транспортировки веществ через клеточную мембрану при УЗ воздействии.

При нагревании за счет перехода энергии УЗ в теплоту разность температур между центром клетки и ее периферией при интенсивности

ультразвука Вт/см² по расчётам оказывается возможным изменение скоростей потоков веществ в результате термодиффузионного переноса как внутри клетки, так и через клеточную мембрану.

Потенциал Дебая (вибропотенциал), возникающий в суспензиях клеток и тканях под влиянием УЗ, используемого в терапевтической практике, достигает 10 мВ, т. е. величин, сравнимых со значениями потенциалов клеточных мембран.

При кавитации, когда интенсивность УЗ излучения превышает 0,3 Вт/см², на клеточные мембраны наряду с ударными волнами, энергичными микро-потоками и потенциалами Дебая, могут влиять свободные радикалы, азотная и азотистая кислоты, а также перекись водорода.

Таким образом, изменение проницаемости клеточных мембран - универсальная реакция на УЗ воздействие, независимо от того, какой из факторов УЗ, действующих на клетку, превалирует в том или ином случае.

Нарушение состава внутриклеточной среды и микроокружения клетки не может не отразиться на скорости биохимических реакций с участием ферментов, весьма чувствительных к содержанию в среде тех или иных ионов, продуктов ферментативных реакций и некоторых других веществ.

Суммируя, можно предложить следующий механизм действия УЗ на клетки. Физико-химические УЗ эффекты в среде (механические, тепловые, электрические, химические) → нарушение микроокружения клеточных мембран (снижение градиентов концентраций различных веществ возле мембран, обратимая десорбция молекул с их поверхности, изменение мембранного потенциала, обратимое уменьшение вязкости внутриклеточной среды) → изменение проницаемости клеточных мембран (ускорение диффузии, изменение эффективности активного транспорта, нарушение целостности мембран) → нарушение состава внутри - и внеклеточной среды → изменение скоростей ферментативных реакций в клетке (небольшая активация и преимущественное подавление ферментативных реакций в клетках вследствие изменения оптимальных для функционирования ферментов концентраций веществ) → развитие репаративных реакций в клетке, связанных с синтезом других веществ (синтез РНК и новых ферментов, продуцируемых клеткой для компенсации возникшего недостатка в продуктах ферментативных реакций) → ...

Из анализа этой схемы - результата существенных упрощений - следует, что специфичным в действии УЗ на биологические системы является изменение микроокружения клеточных мембран, приводящее к нарушению процессов переноса веществ через мембраны. Дальнейшая цепочка процессов может быть инициирована и другими физико-химическими факторами, приводящими к аналогичным нарушениям, в частности, к увеличению проницаемости клеточных мембран.

12.6. ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

При разработке эффективных профилактических мероприятий, направленных на оптимизацию и оздоровление условий труда работников УЗ профессий, на первое место выдвигаются вопросы гигиенического нормирования УЗ как неблагоприятного физического фактора производственной среды и среды обитания.

Материалы, полученные в результате проведенных в НИИ медицины труда РАМН комплексных исследований, послужили основанием для разработки новой системы гигиенической регламентации ультразвука, что нашло отражение в санитарных нормах и правилах - СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 «Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного УЗ промышленного, медицинского и бытового назначения». С утверждением этого нормативного документа упразднены и утратили силу ранее действовавшие «Санитарные нормы и правила при работе на промышленных ультразвуковых установках» № 1733-77 и «Санитарные нормы и правила при работе с оборудованием, создающим УЗ, передаваемый контактным путем на руки работающих» № 2282-80 [12.4].

Новые федеральные санитарные нормы и правила устанавливают гигиеническую классификацию УЗ, воздействующего на человека-оператора; нормируемые параметры и предельно допустимые уровни УЗ для работающих и населения; требования к контролю воздушного и контактного ультразвука, меры профилактики. Следует отметить, что настоящие нормы и правила не распространяются на лиц (пациентов), подвергающихся воздействию УЗ в лечебно-диагностических целях.

Таблица 12.1

Соотношения между логарифмическими уровнями
виброскорости в дБ и её значениями в м/с

Логарифмические уровни виброскорости					
десятки, дБ	единицы, дБ				
	0	1	2	3	4
50	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
60	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$
70	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
80	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
90	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
100	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$
110	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
120	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$
130	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
140	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$	$6,3 \cdot 10^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	$7,9 \cdot 10^{-1}$

Продолжение

Логарифмические уровни виброскорости					
десятки, дБ	единицы, дБ				
	5	6	7	8	9
50	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
60	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
70	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
80	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
90	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
100	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
110	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
120	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
130	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
140	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^0$	$1,1 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^0$	$1,4 \cdot 10^0$

В отличие от СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96, действующим в настоящее время ГОСТом 12.1.001-89 «ССВТ. Ультразвук. Общие требования безопасности» установлены нормативы только для работающих [12.7].

Нормируемыми параметрами воздушного УЗ являются уровни звукового давления в децибелах в треть-октавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100 ГГц.

Нормируемыми параметрами контактного УЗ являются пиковые значения виброскорости или ее логарифмические уровни в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16; 31,5; 63; 125;

250; 500; 1000; 2000, 4000; 8000; 16000; 31500 кГц, определяемые по формуле [12.5]:

$$L_v = 20 \lg(V / V_0),$$

где V - пиковое значение виброскорости, м/с; V_0 - опорное значение виброскорости, равное $5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Соотношения между логарифмическими уровнями виброскорости (дБ) и ее значениями (м/с) приведены в табл. 12.1.

В табл. 12.2 представлены предельно допустимые уровни воздушного УЗ на рабочих местах и контактного ультразвука в зонах контакта рук или других частей тела работающих с источниками УЗ колебаний или средами, в которых они распространяются.

Новые нормативы построены по спектральному принципу (ранее имела место одночисловая оценка контактного УЗ для всего нормируемого диапазона 0,1-10,0 МГц по СН 2282-80) с учетом совместного воздействия контактного и воздушного УЗ путем установления понижающей поправки, равной 5 дБ, к ПДУ контактного УЗ, обладающего более высокой биологической активностью.

При использовании УЗ источников бытового назначения (стиральные машины, устройства для отпугивания насекомых, грызунов собак охранная сигнализация и т.д.), как правило, работающих на частотах ниже 100 кГц, нормативные уровни воздушного и контактного УЗ воздействующего на человека, не должны превышать 75 дБ на рабочей частоте.

Кроме санитарных правил и норм, разработан ряд нормативно-методических документов, регламентирующих, в частности, условия труда медработников, использующих УЗ источники в виде аппаратуры оборудования или инструментария.

В этом плане представляют интерес «Гигиенические рекомендации по оптимизации и оздоровлению условий труда медработников, занятых ультразвуковой диагностикой» № 3939-85, содержащие общие требования к оборудованию кабинета УЗ диагностики, организации и проведению диагностических исследований; санитарно-гигиенические и медико-профилактические мероприятия по ограничению неблагоприятного влияния контактного УЗ на медперсонал,

Таблица 12.2

Предельно допустимые уровни ультразвука на рабочих местах

Воздушный ультразвук		
среднегеометрические частоты $1/3$ -октавных полос, кГц	уровни звукового давления, дБ	
12,5	80	
16,0	90	
20,0	100	
25,0	105	
31,0—100,0	110	
Контактный ультразвук ¹		
среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	пиковые значения виброскорости, м/с	уровни виброскорости, дБ
8,0—63,0	$5,0 \cdot 10^{-3}$	100
125,0—500,0	$8,9 \cdot 10^{-3}$	105
$1,0 \cdot 10^3$ — $31,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	110

В настоящее время параллельно с нормативно-методическими документами (санитарными нормами и правилами» гигиеническими рекомендациями, приказами и др.), утвержденными Министерством здравоохранения и имеющими приоритетное значение при решении вопросов профилактики неблагоприятного влияния УЗ на работающих в ходе проведения предупредительного и текущего санитарного надзора, действуют стандарты: ГОСТ 12.1.001-89 «ССБТ. Ультразвук. Общие требования безопасности»; ГОСТ 12.4.077-79 «ССБТ. Ультразвук. Методы измерения звукового давления на рабочих местах»; ГОСТ 12.2.051-80 «ССБТ Оборудование технологическое ультразвуковое. Требования безопасности».

ГЛАВА 13. ВИБРАЦИЯ

13.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИИ

Вибрация - это механические колебания тела. Самый простой вид вибрации - это колебание или повторяющееся движение объекта около положения равновесия. Этот тип вибрации называется общей вибрацией, потому что тело перемещается как единое целое и все его части имеют одинаковую по величине и направлению скорость. Положением равновесия называют такое положение, в котором тело находится в состоянии покоя или положение которое оно займет, если сумма действующих на него сил равна нулю.

Колебательное движение твердого тела может быть полностью описано в виде комбинации шести простейших типов движения: поступательного в трех взаимно перпендикулярных направлениях (X, Y, Z в декартовых координатах) и вращательного относительно трех взаимно перпендикулярных осей (Ox, Oy, Oz). Любое сложное перемещение тела можно разложить на эти шесть составляющих. Поэтому о таких телах говорят, что они имеют шесть степеней свободы.

Представим себе некий объект, перемещения которого ограничены одним направлением, например, маятник настенных часов. Такая система называется системой с одной степенью свободы, т.к. положение маятника в любой момент времени может быть определено одним параметром - углом в точке закрепления. Другим примером системы с одной степенью свободы является лифт, который может перемещаться только вверх и вниз вдоль ствола шахты.

Вибрация тела всегда вызывается какими-то силами возбуждения. Эти силы могут быть приложены к объекту извне или возникать внутри него самого.

Колебательные процессы характерны для всей живой и неживой природы - от клетки до сообществ организмов и от атома до галактик. Они играют заметную роль и в нервно-психической жизни человека, и даже в сфере социальных явлений. Вопрос о том, почему природа часто "предпочитает" колебания монотонному течению процессов, до сих пор не имеет общего ответа. Только в ряде конкретных случаев можно догадаться, что колебательные процессы характеризуются определенной целесообразностью, а иногда и оптимальностью.

Вибрация - один из видов колебательных процессов. Под нею понимают механические колебания с периодом, значительно меньшим

промежутка времени, на котором рассматривается движение системы, и амплитудой, значительно меньшей характерного размера системы.

Долгое время вибрация рассматривалась в основном как вредный фактор - причина поломок, аварий, а также производственных заболеваний. И лишь в начале прошлого столетия берет отсчет период бурного развития вибрационной техники, без которой сейчас немислим ряд важных производств при добыче и переработке полезных ископаемых, в химической технологии, в металлургии, в промышленности строительных материалов и при строительстве различных сооружений. Впрочем, отдельные примеры использования вибрации известны с очень давних времен, когда она применялась при просеивании сыпучих материалов, при строительных работах и даже в медицинской практике.

Кратко перечисленные выше (и более подробно - рассматриваемые ниже) вибрационные эффекты как раз и лежат в основе принципов действия ряда высокоэффективных машин; с другой стороны, те же эффекты могут стать причиной нежелательных и даже катастрофических ситуаций.

Их существенная черта - нелинейный характер: результаты действия двух или нескольких факторов не складываются, а комбинируются, порой достаточно сложным, неожиданным образом (пример: результат одновременного приема двух хороших по отдельности лекарств может быть плохим).

О вибрационной механике. Для большинства случаев характерно, что возникающее в системе под действием вибрации движение X естественно представляется в виде суммы двух составляющих - медленной X , мало изменяющейся за один период колебаний, и быстрой, "вибрационной" y , причем обычно основной интерес представляет именно медленное движение (рис. 13.1).

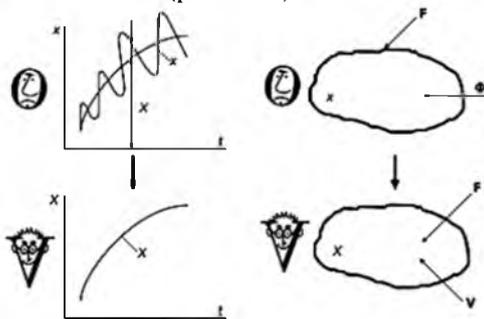


Рис. 13.1. "Мир" наблюдателей О и V

Наблюдатель O видит реальный процесс x , а наблюдатель V - только его медленную (среднюю) составляющую $X(a)$. Наблюдатель O видит систему, на которую действуют медленные силы F и быстрые F , а наблюдатель V видит только систему, находящуюся под действием медленных сил F и $V(b)$.

Рассматривая соответствующие дифференциальные уравнения движения, можно прийти к положению, аналогичному известной теореме механики относительного движения. Согласно этой теореме, наблюдатель, связанный с ускоренно движущейся системой координат, должен ко всем действующим на систему обычным силам добавить силы инерции. В нашем же случае наблюдатель V , не замечающий ни быстрых сил, ни быстрых движений, обязан добавить ко всем обычным силам вибрационные силы. Если в механике относительного движения введение сил инерции - своего рода штраф за использование неинерциальной системы отсчета, то добавление вибрационных сил представляет собой штраф за игнорирование быстрых (как правило, малых) движений системы.

Учитывая сказанное, будем называть механику, которой должен руководствоваться наблюдатель, не замечающий быстрых сил и быстрых движений (наблюдатель V), вибрационной механикой [13.8].

Одна из основных задач в вибрационной механике - о нахождении выражений для вибрационных сил. Эта задача достаточно эффективно решается в рамках разработанной теории.

Вибрационная механика - новый раздел механики и теории нелинейных колебаний, который интенсивно развивается учеными России, Украины, Германии, Дании и других стран. Она служит, в частности, теоретической основой вибрационной техники и технологии. Возникла в нашей стране эта дисциплина не на пустом месте. Она базируется на фундаментальных исследованиях в области теории нелинейных колебаний и устойчивости движения, в которых отечественная школа физиков, математиков и механиков сыграла (и до сих пор играет) выдающуюся роль. Речь идет о трудах А.М. Ляпунова, Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, А.А. Андропова, А.А. Витта, Н.М. Крылова, Н.Н. Боголюбова, Н.Г. Четаева, И.Г. Малкина, Б.В. Булгакова, А.И. Лурье и многих других.

Термины и определения.

1. Предельно допустимый уровень (ПДУ) вибрации - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен

вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ вибрации не исключает нарушение здоровья у сверхчувствительных лиц.

2. Допустимый уровень вибрации в жилых и общественных зданиях - это уровень фактора, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к вибрационному воздействию.

3. Корректированный уровень вибрации - одночисловая характеристика вибрации, определяемая как результат энергетического суммирования уровней вибрации в октавных полосах частот с учетом октавных поправок.

4. Эквивалентный (по энергии) корректированный уровень изменяющейся во времени вибрации - это корректированный уровень постоянной во времени вибрации, которая имеет такое же среднеквадратичное корректированное значение виброускорения и/или виброскорости, что и данная непостоянная вибрация в течение определенного интервала времени.

13.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ

При изучении биологического действия вибрации принимается во внимание характер ее распространения по телу человека, которое рассматривается как сочетание масс с упругими элементами. В одном случае это все туловище с нижней частью позвоночника и тазом (стоящий человек), в другом случае - верхняя часть туловища в сочетании с верхней частью позвоночника, нагибающийся вперед (сидящий человек).

Для стоящего на вибрирующей поверхности человека имеются два резонансных пика на частотах 5 - 12 Гц и 17 - 25 Гц, для сидящего - на частотах 4 - 6 Гц. Для головы резонансные частоты лежат в области 20 - 30 Гц. В этом диапазоне частот амплитуда колебаний головы может превышать амплитуду колебаний плеч в три раза. Для лежащего человека область резонансных частот находится в интервале 3 - 3,5 Гц. Одной из наиболее важных колебательных систем является совокупность грудной клетки и брюшной полости. Колебания в этой системе возникают в положении стоя. Колебания внутренних органов этих полостей обнаруживают резонанс на частотах 3 - 3,5 Гц. Максимальная

амплитуда колебаний брюшной стенки наблюдается на частотах от 7 до 8 Гц, а передней стенки грудной клетки – от 7 до 11 Гц.

При увеличении частоты колебаний происходит ослабление ее передачи по телу человека. В положении стоя и сидя величина ослабления в костях таза увеличивается на 9 дБ на октаву изменения частоты, на груди и на голове – 12 дБ, на плече – 12 – 14 дБ. Эти данные не распространяются на резонансные частоты, при воздействии которых происходит не ослабление, а увеличение колебательной скорости. В условиях передачи через руку при силе нажима 10 кг ослабление вибрации на тыле кисти происходит с наклоном 2,5 дБ на октаву, а на голове – с наклоном 16 дБ на октаву.

Рука человека может быть представлена эквивалентной системой, состоящей из сосредоточенных масс упругостей и сопротивлений. Коэффициенты, характеризующие упругость массы и колебательные потери руки, зависят главным образом от степени напряженности мышц руки и позы работающего. На рукоятке ручной машины в условиях работы с ней имеется один максимум - в области ниже 5 Гц и второй интенсивный максимум - в области частот 30 – 40 Гц, что соответствует резонансу системы «эффективная масса руки» (примерно 1 кг) и упругости мягких тканей внутренней стороны кисти.

Механическая система прямой руки человека имеет резонанс в области частот 30 – 60 Гц. При передаче колебаний от ладони к тыльной стороне кисти амплитуда колебаний при неизменной частоте 40 – 50 Гц уменьшается на 35 - 65 %. На участках между кистью и локтем, локтем и плечом происходит дальнейшее ослабление колебаний. Наибольшее затухание наблюдается в плечевом суставе и на голове. С увеличением силы нажима на рукоятку наблюдается пропорциональное возрастание проводимости вибрации на плече, составляющее 1,2 дБ на удвоение силы нажима для частоты 8 Гц, около 3 дБ – для частоты 16 Гц и 4 – 5 дБ – для частот 32 – 125 Гц. При увеличении силы нажима на инструмент человеком не только будет получено большое количество колебательной энергии в связи с увеличением входного механического импеданса, но воздействие вибрации распространится на большую рецептивную зону.

Особенности воздействия производственной вибрации определяются частотным спектром и распределением в его пределах максимальных уровней энергии колебания.

Согласно разработанной в нашей стране концепции, признанной в ряде стран Восточной Европы и Японии, вибрационная болезнь считается профессиональным заболеванием всего организма.

В Западной Европе и США в качестве профессионального заболевания, вызванного воздействием локальной вибрации, рассматривают главным образом синдром, связанный с побелением пальцев рук. Эти сосудистые нарушения имеют различные названия, например феномен «мертвых», белых пальцев или синдром Рейно профессионального происхождения, травматическая вазоспастическая болезнь; более позднее название – вызванные вибрацией белые пальцы (VWF). Однако клиническая симптоматика вибрационных нарушений не исчерпывается сосудистыми поражениями, она включает и невротические расстройства, что постепенно начинают признавать и за рубежом.

Во многих странах широко применяется классификация вибрационного синдрома, разработанная *W. Taylor* и *P. Pelmear* (1974) [13.1]. Согласно этой классификации, выраженность вибрационных нарушений – побеление пальцев (IV стадии) оценивается в зависимости от числа вовлеченных в патологический процесс фаланг, частоты приступов побеления с учетом того, насколько они мешают трудовой деятельности и отдыху.

В 1983 г. *Rigby* и *Cornish* [13.2] предложили более полную систему оценки нарушений от локальной вибрации. Авторы выделили 4 категории: к I категории отнесено чувство онемения и (или) покалывания (не поддающееся объективизации), ко II категории – эпизодическое побеление пальцев рук, степень которого оценивается по специальной цифровой шкале, к III категории – акроцианоз, постоянная циркуляторная недостаточность с ухудшением чувствительности, к IV категории – некроз тканей каких-либо фаланг пальцев. Кроме стадии и количественной оценки степени побеления пальцев, указывается одна из пяти категорий нарушения трудоспособности.

На IV Международном симпозиуме по локальной вибрации (1986 г.) была представлена модификация классификации *W. Taylor – P. Pelmear* [13.6], где параллельно с сосудистыми выделены и неврологические стадии, в основу установления которых заложено снижение тактильной чувствительности и тактильной пространственной разрешающей способности. Мышечные и костно-суставные нарушения в зарубежных классификациях не учитываются.

В нашей стране используется иной подход к оценке вибрационных нарушений. Разработанная впервые в мире Е.Ц. Андреевой-Галаниной и соавт. (1956) [13.2] классификация вибрационных нарушений – вибрационной болезни как самостоятельной нозологической формы, позволяющая выделить комплекс наиболее часто встречающихся синдромов, в настоящее время существенно развита.

Утвержденная в 1985 г. Минздравом СССР «Классификация вибрационной болезни от воздействия локальной вибрации» устанавливает 3 степени выраженности заболевания 2 [13.3]: начальные проявления (I степень); умеренно выраженные проявления (II степень); выраженные (III степень) проявления.

Каждая степень характеризуется определенными синдромами (периферический ангиодистонический, вегетативно-сенсорной полинейропатии и т.п.), причем при I степени отмечаются лишь нарушения в руках (сосудистые и сенсорные), при II и III степенях нарушения носят более генерализованный характер.

Помимо периферических сосудистых и сенсорных расстройств, рассматриваются дистрофические нарушения опорно-двигательного аппарата рук и плечевого пояса, нарушения мозгового кровообращения и синдром энцефалопалинейропатии. Классификация позволяет оценить трудоспособность в зависимости от характера наблюдаемых синдромов.

В 1982 г. отечественными учеными разработана классификация вибрационной болезни от воздействия общей вибрации, в основу которой положен синдромный принцип, при этом учтен низкочастотный характер вибрации, хорошо распространяющейся по телу человека и вовлекающий в процесс вестибулярный анализатор.

В классификации выделяются начальные (I степень), умеренно выраженные (II степень) и выраженные (III степень) проявления вибрационной болезни от общих вибраций. В клинической картине вибрационной болезни ведущими являются церебрально-периферический ангиодистонический синдром и синдром вегетативно-сенсорной полинейропатии в сочетании с синдромом полирадикулонейропатии, вторичным пояснично-крестцовым синдромом (вследствие остеохондроза поясничного отдела позвоночника).

Вибрационная болезнь, вызванная воздействием общей вибрации и толчков, наблюдаемая у операторов транспортных и транспортно-технологических средств, характеризуется синдромом вестибулопатии, который проявляется главным образом вестибуловегетативными расстройствами – головокружением, головной болью, тошнотой, рвотой, адинамией, брадикардией и др. Весьма характерны также дегенеративно-дистрофические изменения со стороны опорно-двигательного аппарата.

Особое место в клинике вибрационной болезни занимает патология со стороны опорно-двигательного аппарата. Воздействие общей вибрации приводит к прямому микро-травмирующему действию на

позвоночник вследствие значительных аксиальных нагрузок на межпозвоночные диски, которые ведут себя как фильтры низких частот, являясь линейными даже в случае локальных перегрузок в позвоночно-двигательном сегменте в результате перенапряжения познотонических мышц. Воздействие внешних и внутренних нагрузок на позвоночник приводит к дегенерации диска.

Локализация дегенеративных изменений в одном и том же отделе позвоночника и значительная частота поясничных остеохондрозов у лиц виброопасных профессий позволяет предложить прямую связь данных изменений с патологией вибрационного генеза. Отмечено, что отчетливо выраженные остеофиты, как правило, локализуются на нижних краях I и II грудного и поясничного позвонков, а также на верхних краях II, III и IV поясничных позвонков.

Следует признать, что дегенеративные изменения позвоночного столба наряду с изменениями такого же порядка других отделов скелета у работающих обнаруживаются нередко вне связи с неврологической симптоматикой. При этом диагностируемые на рентгенограммах патологические изменения костной структуры подчас являются единственными и сравнительно ранними признаками вибрационной болезни.

В основе патогенеза вибрационной болезни лежит сложный механизм нервно-рефлекторных и нейрогуморальных нарушений, которые приводят к развитию застойного возбуждения с последующим стойким изменением, как в рецепторном аппарате, так и в различных отделах нервной системы. Неблагоприятное влияние вибрации на организм человека характеризуется локальным действием на ткани и заложенные в них многочисленные экстеро- и интерорецепторы (прямой микро-травмирующий эффект) и опосредованно через центральную нервную систему на различные системы и органы. Важную роль играют вторичные расстройства в результате нарушения трофики, вызванного сосудистой дисфункцией.

Клиническая симптоматика вибрационной болезни, обусловленная локальной или общей вибрацией, складывается из нейрососудистых нарушений, поражений нервно-мышечной системы, опорно-двигательного аппарата, изменений обмена веществ и др.

Существенное значение для патогенеза вибрационной болезни имеют как специфические, так и неспецифические реакции общего типа, отражающие адаптационно-компенсаторные реакции организма. Многолетнее изучение данной патологии позволило установить различные варианты ее течения с преимущественным проявлением нейро-

сосудистых расстройств или патологии опорно-двигательного аппарата.

Выраженность клинической симптоматики определяется в первую очередь спектральными и амплитудными параметрами вибрации и тем, в каких условиях это воздействие происходит. Так, воздействие низкочастотной вибрации приводит к развитию вибрационной патологии с превалированием поражений нервно-мышечной системы, опорно-двигательного аппарата и менее выраженным сосудистым компонентом. Например, такая форма наблюдается у формовщиков, бурильщиков и др. Средне- и высокочастотная вибрация вызывает различные по степени выраженности сосудистые, нервно-мышечные, костно-суставные и другие нарушения. При работе со шлифовальными машинами и другими источниками высокочастотной вибрации возникают в основном сосудистые нарушения.

Повреждающее действие вибрации вызывает снижение функции гомеостатического регулирования тканевого метаболизма. Наступает также местное повреждение интимы сосудов. Повышается активность щелочной фосфатазы крови, изменяется соотношение содержания нуклеиновых кислот – РНК и ДНК, снижается активность сукцинатдегидрогеназы.

Важную роль в инициировании приступа побеления пальцев играет воздействие холода, вызывающее рефлекторное, опосредованное симпатической системой сужение сосудов. В пользу этой гипотезы свидетельствуют результаты гистологического изучения тканей пальцев рук, показавшие, что наряду с другими нарушениями в этих случаях имеет место выраженная гипертрофия мышц сосудистой стенки.

Усугубляет нарушение микроциркуляции и проницаемости сосудов кислородный дисбаланс. Исследование различных звеньев патогенеза вибрационной болезни (нейрогуморальных, микроциркуляторных, гормональных, ферментативных) позволяет предположить, что изменение тканевого метаболизма и развитие дистрофических процессов связаны с наличием нарушений как местных ферментных систем, так и центральных рефлекторных влияний на тканевый обмен.

Дефицит кислорода способствует также развитию трофических нарушений в дистальных отделах верхних конечностей, в частности возникновению миофиброзов, артрозов и периартрозов, образованию кист, эностозов, снижению минерального компонента костной ткани. Страдает капиллярное и прекапиллярное кровообращение в пальцах рук, а в последующем изменяется тонус крупных сосудов (артерий и

вен) на предплечьях и плече, что клинически проявляется в виде ангиодистонического (или ангиоспастического) синдрома.

Определенное значение в патогенезе вибрационной болезни имеют изменения в свертывающей системе крови, способствующие нарушению микроциркуляции и прогрессированию процесса. Наряду с указанным большое влияние на развитие периферических гемодинамических нарушений оказывает изменение механизмов вегетативно-сосудистой регуляции, связанное с измененным функционированием высших вегетативных центров и ретикулярной формации ствола головного мозга, а также периферических вегетативных ганглиев.

Сосудистые нарушения при вибрационной болезни имеют тенденцию к генерализации, что в выраженных случаях может привести к постепенному развитию хронической недостаточности мозгового кровообращения.

Отмечаются также изменения функции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы; нарушается соотношение вазоактивных веществ ренин-ангиотензиальдостероновой системы, появляются сдвиги в соотношении гормонов гипоталамо-тиреоидного комплекса, изменения в содержании циклических нуклеотидов и повышение в крови уровня простагландинов, сдвиги в кальций-магниевом обмене и т.д. В отдельных случаях вибрационной болезни наблюдается изменение иммунологических показателей; при тяжелых формах вибрационной патологии отмечено нарушение функциональной активности Т- и В-лимфоцитов.

При работе с тяжелым пневматическим инструментом, когда имеет место значительное напряжение верхних конечностей, часто наблюдаются миофасцикулиты, миозиты мышц плечевого пояса, тендомиозит предплечья.

Нередко обнаруживаются деструктивно-дистрофические процессы в костно-суставном аппарате.

Таким образом, в генезе вибрационной болезни от воздействия локальной вибрации играют роль как местное повреждение тканевых структур, обеспечивающих гомеостатическое регулирование тканевого метаболизма, так и нарушение центральных (гуморальных и нейрорефлекторных) механизмов регуляции периферического кровообращения, способствующее усугублению патологического процесса.

Что касается патогенеза вибрационной болезни от воздействия общих вибраций, то он остается до настоящего времени недостаточно изученным. Обобщенная клинико-физиологическая картина действия общей вибрации позволяет высказать гипотезу о механизме прямого

микротравмирующего действия вибрации на опорно-двигательный аппарат, вестибулообусловленные и экстравестибулярные реакции. Частота и степень выраженности нарушений зависят от физических характеристик вибрации, эргономических параметров рабочего места, медико-биологических параметров человека-оператора.

Как известно, вибрационная болезнь отличается от общей вибрации полиморфностью, а наблюдаемые ранние периферические и церебральные вегетативно-сосудистые нарушения при этом нередко носят неспецифический функциональный характер.

По современным представлениям, патогенетический механизм формирования вибрационных нарушений от воздействия общей вибрации является сложным процессом, состоящим из трех основных взаимосвязанных этапов.

Первый этап – рецепторные изменения, характеризующиеся дисфункцией вестибулярного аппарата, и связанные с ними функциональные нарушения вестибулосоматических, вестибуло-вегетативных, вестибулосенсорных реакций.

Второй этап – дегенеративно-дистрофические нарушения позвоночника (остеохондроз), возникающие при наличии экзогенных и эндогенных факторов, и связанные с ними явления декомпенсации трофической системы.

Третий этап – потеря адаптационных способностей органами равновесия и связанные с этим нарушения функционального состояния оптовестибулоспинального комплекса вследствие патологической вестибулоафферентации.

На основании клинических, функциональных и экспериментальных исследований установлено, что одним из патогенетических механизмов вибрационной болезни наряду с нервно-рефлекторными нарушениями являются повышение венозного сопротивления, изменение венозного оттока, приводящего к венозному полнокровию, увеличение фильтрации жидкости и снижение питания тканей с развитием в дальнейшем периферического ангио-дистонического синдрома.

Низкочастотная вибрация ведет к изменению морфологического состава крови: эритроцитопении, лейкоцитозу; имеет место снижение уровня гемоглобина.

Отмечено влияние общей вибрации на обменные процессы, проявляющиеся в изменении углеводного обмена; биохимических показателей крови, характеризующих нарушения белкового и ферментативного, а также витаминного и холестерина обмена. Наблюдаются нарушения окислительно-восстановительных процессов, проявляю-

щиеся в снижении активности цитохромоксидазы, креатинкиназы, в повышении концентрации молочной кислоты крови, изменении показателей азотистого обмена, в снижении альбумин-глобулинового коэффициента, в изменении активности коагулирующих и антисвертывающих факторов крови.

Общая вибрация оказывает также отрицательное влияние на женскую половую сферу, что выражается в расстройствах менструального цикла, альгодисменорее и меноррагии; у мужчин нередко наблюдается импотенция; эти нарушения наиболее характерны для операторов транспортных и транспортно-технологических средств, подвергающихся действию толчкообразной вибрации.

При всех видах вибрационной болезни нередко наблюдаются изменения со стороны центральной нервной системы в виде вегетодисфункции на неврастеническом фоне, которые могут быть связаны с комбинированным действием вибрации и интенсивного шума, постоянно сопутствующего вибрационным процессам.

По той же причине у работников виброопасных профессий с большим стажем возникают невриты слуховых нервов, при выраженных стадиях заболевания наблюдается понижение слуха не только на высокие, но и на низкие тоны.

Таким образом, многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных специалистов показано, что вибрационная болезнь от локальных и общих вибраций отличается полиморфностью симптоматики, своеобразием клинического течения и нередко может приводить к нарушению трудоспособности больных.

Таблица 13.1

Показатель заболеваемости вибрационной болезнью в основных виброопасных профессиях и средние значения латентного периода

Профессиональная группа	Заболеваемость в виброопасных профессиях, на 1000 человек	Латентный период, годы
Обрущик литья	5,4	10,8 ± 0,3
Наждачник	2,6	12,1 ± 0,7
Вальщик леса	4,0	14,4 ± 0,4
Шлифовщик	0,5	14,5 ± 0,6
Заточник	3,9	14,7 ± 1,0
Слесарь механосборочных работ	0,3	16,8 ± 0,6
Стерженщик	0,5	17,4 ± 1,2
Горнорабочий очистного забоя	2,2	17,8 ± 0,5
Бурильщик	5,9	17,9 ± 0,8
Проходчик (телескопы)	23,4	17,9 ± 0,9
Проходчик (электросверла)	1,3	18,1 ± 1,4
Клепальщик	0,2	20,1 ± 1,2
Формовщик	1,0	18,2 ± 0,8

Статистика возникновения вибрационной профпатологии. По статистическим данным, треть выявленных профессиональных заболеваний связана с воздействием вибрации и шума. По структуре в общей доле профзаболеваний: 1991 г. – 22,5 %; 1992 г. – 22,7 %; 1993 г. – 24,1 %; 1994 г. – 26,9 %; 1995 г. – > 25 %. Причем при профосмотрах выявляется всего 1 – 10 % реальных случаев заболеваний. Наиболее высокая заболеваемость вибрационной болезнью регистрируется на предприятиях тяжелого, энергетического, транспортного машиностроения, угольной промышленности и цветной металлургии (см. табл. 13.1).

Данные по заболеваемости вибрационной болезнью среди основных виброопасных профессий за 2011 год представлены в диаграмме, приведенной ниже (рис. 13.2).

Распределение выявленных случаев вибрационной болезни по профессиям в 2011 году [13.3]

Было выявлено, что вибрационная болезнь по видам ведущих виброопасных профессий в основном регистрировалась в 2011 г. у работников таких профессий, как: проходчик – 18,04 %, водитель автомобиля – 11,59 %, горнорабочий очистного забоя – 7,77 %, тракторист – 6,94 %, машинист экскаватора – 6,38 % и целом ряде других профессий. Статистические данные профзаболеваемости в Российской Федерации в 2011 г. обработали эксперты Федерального центра гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора.

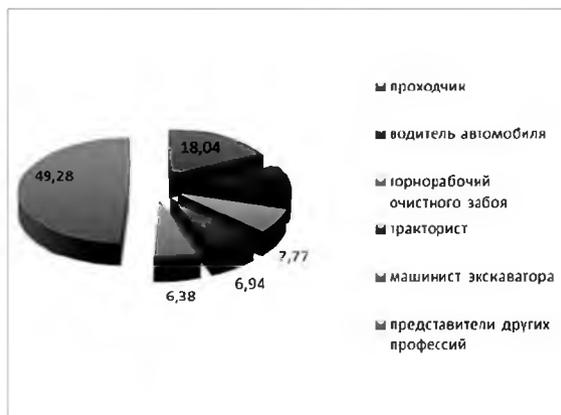


Рис. 13.2. Диаграмма заболеваемости основных виброопасных профессий

В основном, наиболее вредными и опасными являются колебания частотой от 3 до 30 Гц. Они близки к частотам собственных колебаний тела человека или отдельных его органов, для которых резонанс наступает при следующих диапазонах частот: от 4 до 6 Гц – для туловища в положении сидя; от 3 до 3,5 Гц – для внутренних органов, расположенных в брюшной полости и грудной клетке; от 20 до 30 Гц или от 1,5 до 2 Гц – для головы в положении сидя соответственно при вертикальных и горизонтальных вибрациях; от 60 до 90 Гц для органов зрения (резонанс глазных яблок).

Длительное воздействие вибрации приводит к тяжелому заболеванию – вибрационной болезни, которая является практически неизлечимой.

Также вибрация представляет опасность для зданий, строительных конструкций, машин, механизмов, технологического оборудования. При этом снижается эффективность работы этих машин и механизмов, ускоряется их износ, уменьшается время межремонтного периода и проявляются другие негативные последствия. Кроме этого, распространяющаяся и предающаяся через твердые основания и в иной среде вибрация, способствует разрушению других машин, оборудования, сооружений, изменяет показания контрольно-измерительных приборов, регулирующей аппаратуры. Все это способно привести к нарушению технологического процесса. Поэтому обеспечение вибробезопасных условий является серьезной технической и санитарной задачей.

13.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИБРАЦИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЧЕЛОВЕКА

Вибрацию принято классифицировать с различных позиций:

I. По способу воздействия на человека вибрация подразделяется на общую и локальную.

Общая вибрация передается на тело человека через опорные поверхности: в положении стоя – это подошвы ног, а в положении сидя – через ягодицы.

Локальная вибрация передается через руки. Причем, вибрация, передающаяся на ноги сидящего человека и на предплечья, контактирующие с вибрирующими поверхностями рабочих столов, тоже относится к локальной вибрации. Локальную вибрацию по источнику ее возникновения подразделяется на локальную вибрацию, передающуюся человеку от ручного механизированного инструмента, органов руч-

ного управления машинами и оборудованием; локальную вибрацию, передающуюся человеку от ручного немеханизированного инструмента.

Общая вибрация по источнику ее возникновения подразделяется на следующие категории:

– общую вибрацию 1 категории – транспортную вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах самоходных и прицепных машин, транспортных средств при движении по местности и дорогам (в том числе при их строительстве).

– общую вибрацию 2 категории – транспортно-технологическую вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах машин, перемещающихся по специально подготовленным поверхностям производственных помещений, промышленных площадок, горных выработок.

– общую вибрацию 3 категории – технологическую вибрацию, воздействующую на человека на рабочих местах стационарных машин или передающуюся на рабочие места, не имеющие источников вибрации.

II. По направлению действия вибрацию подразделяют в соответствии с направлением осей ортогональной системы координат:

– локальную вибрацию подразделяют на действующую вдоль осей ортогональной системы координат X_p, Y_p, Z_p , где ось X_p параллельна оси места охвата источника вибрации (рукоятки, ложемента, рулевого колеса, рычага управления, удерживаемого в руках обрабатываемого изделия и т.п.), ось Y_p перпендикулярна ладони, а ось Z_p лежит в плоскости, образованной осью X_p и направлением подачи или приложения силы (или осью предплечья, когда сила не прикладывается);

– общую вибрацию подразделяют на действующую вдоль осей ортогональной системы координат X_0, Y_0, Z_0 , где X_0 (от спины к груди) и Y_0 (от правого плеча к левому) – горизонтальные оси, направленные параллельно опорным поверхностям; Z_0 – вертикальная ось, перпендикулярная опорным поверхностям тела в местах его контакта с сиденьем, полом и т.п.

III. По характеру спектра вибрации выделяют:

- узкополосные вибрации, у которых контролируемые параметры в одной 1/3 октавной полосе частот более чем на 15 дБ превышают значения в соседних 1/3 октавных полосах;
- широкополосные вибрации - с непрерывным спектром шириной более одной октавы

IV. По частотному составу вибрации выделяют:

- низкочастотные вибрации (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах частот 1-4 Гц для общих вибраций, 8-16 Гц - для локальных вибраций);
- среднечастотные вибрации (8-16 Гц - для общих вибраций, 31,5-63 Гц - для локальных вибраций);
- высокочастотные вибрации (31,5-63 Гц - для общих вибраций, 125-1000 Гц - для локальных вибраций).

V. По временным характеристикам вибрации выделяют:

- постоянные вибрации, для которых величина нормируемых параметров изменяется не более чем в 2 раза (на 6 дБ) за время наблюдения;
- непостоянные вибрации, для которых величина нормируемых параметров изменяется не менее чем в 2 раза (на 6 дБ) за время наблюдения не менее 10 мин при измерении с постоянной времени 1 с, в том числе:
 - а) колеблющиеся во времени вибрации, для которых величина нормируемых параметров непрерывно изменяется во времени;
 - б) прерывистые вибрации, когда контакт человека с вибрацией прерывается, причем длительность интервалов, в течение которых имеет место контакт, составляет более 1 с;
 - в) импульсные вибрации, состоящие из одного или нескольких вибрационных воздействий (например, ударов), каждый длительно-стью менее 1 с.

13.4. НОРМИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВИБРАЦИИ

Гигиеническая оценка постоянной и непостоянной вибрации, воздействующей на человека, должна производиться следующими методами:

- частотным (спектральным) анализом нормируемого параметра;

- интегральной оценкой по частоте нормируемого параметра;
- интегральной оценкой с учетом времени вибрационного воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемого параметра.

Нормируемый диапазон частот устанавливается [13.3, 13.8]:

- для локальной вибрации в виде октавных полос со среднегеометрическими частотами: 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц;
- для общей вибрации в виде октавных или 1/3 октавных полос со среднегеометрическими частотами: 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 Гц.

При частотном (спектральном) анализе нормируемыми параметрами являются среднеквадратичные значения виброскорости (V) и виброускорения (a) или их логарифмические уровни (L_v, L_a), измеряемые в 1/1 и 1/3 октавных полосах частот.

Логарифмические уровни виброскорости (L_v) в дБ, определяют по формуле:

$$L_v = 20 \lg \frac{V}{5 \cdot 10^{-8}}, \quad (13.1)$$

где V – среднеквадратичное значение виброскорости, м/с; $5 \cdot 10^{-8}$ – опорное значение виброскорости, м/с.

Логарифмические уровни виброускорения (L_a) в дБ, определяют по формуле

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{1 \cdot 10^{-6}}, \quad (13.2)$$

где a – среднеквадратичное значение виброускорения, м/с²; $1 \cdot 10^{-6}$ – опорное значение виброускорения, м/с².

При интегральной оценке по частоте нормируемым параметром является скорректированное значение виброскорости и виброускорения (U) или их логарифмические уровни (L_U), измеряемые с помощью корректирующих фильтров или вычисляемые по формулам:

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i K_i)^2}, \quad (13.3)$$

или

$$L_U = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{U_i} + L_{K_i})}, \quad (13.4)$$

где U_i, L_{U_i} - среднеквадратичное значение виброскорости или виброускорения (или их логарифмические уровни) в i -ой частотной полосе; N - число частотных полос (1/3 или 1/1 октав) в нормируемом частотном диапазоне; K_i, L_{K_i} - весовые коэффициенты для i -ой частотной полосы соответственно для абсолютных значений или их логарифмических уровней, определяемых для локальных вибраций по табл. 13.2, для общих вибраций (см. [13.1]).

При интегральной оценке вибрации с учетом времени ее воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемым параметром является эквивалентное скорректированное значение виброскорости или виброускорения ($U_{экр}$) или их логарифмический уровень ($L_{U_{экр}}$), измеренное или вычисленное по формуле:

$$U_{экр} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2 t_i}{T}}, \quad (13.5)$$

Таблица 13.2

Значения весовых коэффициентов K_i, L_{K_i} (дБ) для локальной вибрации

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Значения весовых коэффициентов			
	для виброускорения		для виброскорости	
	K_i	L_{K_i}	K_i	L_{K_i}
8	1,0	0	0,5	-6
16	1,0	0	1,0	0
31,5	0,5	-6	1,0	0
63	0,25	-12	1,0	0
125	0,125	-18	1,0	0
250	0,063	-24	1,0	0
500	0,0315	-30	1,0	0
1000	0,016	-36	1,0	0

$$L_{U_{\text{экв}}} = \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} t_i \right), \quad (13.6)$$

где U_i – скорректированное по частоте значение контролируемого параметра виброскорости (v, L_v) м/с, или виброускорения (a, L_a) м/с²; t_i – время действия вибрации, с;

$$T = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (13.7)$$

где n – общее число интервалов действия вибрации.

13.5. ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВИБРАЦИИ В ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ВИБРАЦИИ

Допустимые значения нормируемых параметров вибрации в жилых помещениях и общественных зданиях информативно приведены в табл. 13.3 и 13.4.

Таблица 13.3

Допустимые значения вибрации в жилых помещениях, палатах больниц, санаториев

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Предельно допустимые значения ¹ по осям X _a , Y _d , Z _a			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с ²	дБ	· 10 ⁻² м/с	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	135	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109
250	22,0	147	1,4	109
500	45,0	153	1,4	109
1000	89,0	159	1,4	109
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни	2,0	126	2,0	112

¹ Работа в условиях воздействия вибрации с уровнями, превышающими настоящие санитарные нормы более чем на 12 дБ (в 4 раза) по интегральной оценке или в какой-либо октавной полосе, не допускается.

Предельно допустимые величины нормируемых параметров производственной локальной вибрации при длительности вибрационного воздействия 480 мин (8 ч) также в информационных целях приведены в табл. 13.3.

Предельно допустимые величины нормируемых параметров вибрации рабочих мест при длительности вибрационного воздействия 480 мин (8 ч) приведены в [13..9].

Таблица 13.4
Предельно допустимые значения производственной вибрации

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения виброускорения							
	м/с ²				дБ			
	в 1/3 октаве		в 1/1 октаве		в 1/3 октаве		в 1/1 октаве	
	Z ₀	X ₀ , Y ₀	Z ₀	X ₀ , Y ₀	Z ₀	X ₀ , Y ₀	Z ₀	X ₀ , Y ₀
0,8	0,70	0,22			117	107		
1,0	0,63	0,22	1,10	0,40	116	107	121	112
1,25	0,56	0,22			115	107		
1,6	0,50	0,22			114	107		
2,0	0,45	0,22	0,79	0,45	113	107	118	113
2,5	0,40	0,28			112	109		
3,15	0,35	0,35			111	111		
4,0	0,32	0,45	0,56	0,79	110	113	115	118
5,0	0,32	0,56			110	115		
6,3	0,32	0,70			110	117		
8,0	0,32	0,89	0,63	1,60	110	119	116	124
10,0	0,40	1,10			112	121		
12,5	0,50	1,40			114	123		
16,0	0,63	1,80	1,10	3,20	116	125	121	130
20,0	0,79	2,20			118	127		
25,0	1,00	2,80			120	129		
31,5	1,30	3,50	2,20	6,30	122	131	127	136
40,0	1,60	4,50			124	133		
50,0	2,00	5,60			126	135		
63,0	2,50	7,00	4,50	13,00	128	137	133	142
80,0	3,20	8,90			130	139		
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни			0,56	0,40			115	112

БИБЛИОГРАФИЯ

К ГЛАВЕ 1

- 1.1. Аполлонский С. М. Электромагнитные поля в общей проблеме безопасности жизнедеятельности человека, ч. 1 //Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности», 2009, № 11, с. 1-24.; ч.2 //Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности», 2009, № 12, с. 1-24.
- 1.2. Аполлонский С. М., Каляда Т. В., Синдаловский Б. Е. Безопасность человека в электромагнитных полях. - СПб.: Политехника, 2006. – 263 с.
- 1.3. Аполлонский С. М., Малаяп К. Р. Электромагнитная экология человека: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 556 с.
- 1.4. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека: Монография в 3-х томах:
Т. I. Формирование внешней электромагнитной среды: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 223 с.
Т. II. Воздействие электромагнитной среды на технические устройства и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.
Т. III. Воздействие внешней электромагнитной среды на человека и средства защиты: Монография. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 286 с.
- 1.5. Аполлонский С. М., Горский А. Н. Расчёты электромагнитных полей. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
- 1.6. Аполлонский С. М. Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике: Монография. – М.: SCience, 2016. – 324 с.
- 1.7. Федеральный закон «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств». – М., 1999.
- 1.8. ГОСТ Р 51320-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи индустриальные. Методы испытаний технических средств – источников индустриальных радиопомех.
- 1.9. Аполлонский С. М., Каляда Т. В., Синдаловский Б. Е. Регламентация электромагнитных полей, безопасных для жизнедеятельности человека //Вестник МАНЭБ, 2001, № 3(39), с. 19-37.
- 1.10. Директива европейского парламента и совета 2004/108/ЕС от 15 декабря 2004 г., касающаяся сближения законодательств государств-членов относительно ЭМС, и отменяющая Директиву 89/336/ЕЭС от 03.05.1989 г. «О согласовании законодательных актов государств –

участников Сообщества, касающихся электромагнитной совместимости».

1.11. Уилльямс Т. Электромагнитная совместимость для разработчиков продукции». – М.: Изд. дом «Технологии», 2001. – 540 с.

1.12. Уилльямс Т., Армстронг К. Электромагнитная совместимость для систем и установок» - М.: Изд. дом «Технологии», 2004. – 508 с.

1.13. ИСО 8613-1:1994. Информационные технологии. Открытая структура документа (ODA) и формат обмена. Введение и общие принципы.

1.14. ИСО 10007:1995. Контроль качества. Руководство по управлению конфигурацией.

1.15. ИСО / МЭК TR 15846. Информационные технологии. Процессы.

К ГЛАВЕ 2

2.1. Анохин П.К. Физиология функциональных систем, 1995.

2.2. Брейнард Дж., Бернекер К. Влияние света на физиологию и поведение человека //Светотехника, 1996, №1-2, с. 10-13.

2.3. Вавилов С.И. Глаз и солнце. — М.: Наука, 1976.

2.4. ГОСТ 24940-96. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности.

2.5. ГОСТ 26824-86. Здания и сооружения. Методы измерения яркости.

2.6. ГОСТ Р.50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.

2.7. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1983. - 384 с.

2.8. Жилое Ю.Д. О значении яркости рабочей поверхности // Гигиена труда и проф. заболевания, 1966, № 1, 6, с. 18-20.

2.9. Жилое Ю.Д., Назарова Е.Н. Нормирование видимой радиации в гигиене труда // Гигиена и санитария, 1984, № 9, с. 13-15.

2.10. Коваленко И. Г., Никитина Е.А. и др. Руководство по контролю безопасности труда на рабочих местах с дисплеями

на электронно-лучевых трубках. — МНИИ охраны труда, 1992. - 56 с.

2.11. Методические рекомендации «Установление требуемых уровней освещенности (яркости) для точных зрительных работ с учетом их напряженности» № 3862-85.

2.12. Назарова Е.Н. О гигиеническом нормировании естественного освещения//Гигиена труда и проф. заболевания, 1987, № 1, с. 36-37.

2.13. Назарова Е.Н. Принципы физиолого-гигиенической регламентации видимого излучения: докт. дис., 1996.

2.14. Строительные нормы и правила РФ. Естественное и искусственное освещение. СНиП 23-05-95.

2.15. Суворов Г.А., Пальцев Ю.П. и др. Роль видимого излучения в медицине труда // Медицина труда и промышленная экология, 1996, № 3, с. 10-13.

2.16. ISO 8995: 1989 (E). International Standart. Principics of Visual Ergonomics. 2.17. The Lighting of Indoor Systems. (Проект международного стандарта ИСО).

К ГЛАВЕ 3

3.1. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

3.2. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

3.3. Мушников В.С., Фетисов И.Н., Барышев Е.Е. Определение интенсивности теплового излучения: Учебное электронное текстовое издание. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГ-ТУ–УПИ, 2005.

3.4. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003. – 560 с.

- 3.5. Афанасьева Р.Ф. и др. К обоснованию регламентации термической нагрузки среды на работающих в нагревающем микроклимате // Медицина труда и промышленная экология, 1997, № 2.
- 3.6. ГОСТ 12.4.045-87. Костюмы мужские для защиты от повышенных температур. Технические условия. - М., 1988. - 5 с.
- 3.7. ГОСТ 12.4.176-89 (СТ СЭВ 6350) ССБТ. Одежда специальная для защиты от теплового излучения. Требования к защитным свойствам и метод определения теплового состояния человека. - М.: Изд. стандартов, 1989. - 6 с.
- 3.8. Руководство Р 2.2.013-94. Гигиенические критерии оценки условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1994. - 42 с.
- 3.9. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. - 21с.

К ГЛАВЕ 4

- 4.1. Охрана труда: учебник для ВУЗов /Н.Н. Карнаух. - М: Издательство Юрайт, 2011.
- 4.2. СН 4557-88. Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях.
- 4.3. Саенко В.Б. Источник УФ излучения с энергией фотонов 7-15 эВ //Успехи современного естествознания, 2008, № 10, с. 67-73.
- 4.4. Занько Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Занько Н.Г., Малаяп К.Р., Русак О.Н. - Изд. 13-е, испр. - СПб.: Лань, 2010. - 671 с.
- 4.5. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003. – 560 с.
- 4.6. СНиП 23-05-95*. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Естественное и искусственное освещение. - М.: Госстрой России, 2003.
- 4.7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.
- 4.8. Руководство Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классифи-

кация условий труда. - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005.

4.9. ГОСТ 24940-96. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности. М.: Госстрой России, 1996.

4.10. Кроль Ц.И., Мясоедова Е.И., Терешкевич С.Г. Качество промышленного освещения. - М.: Энергоатомиздат, 1991.

4.11. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Савкин К.П., Салашенко Н.Н., Чхало Н.И., Юшков Г.Ю., Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда //Письма в ЖЭТФ, 2008, т. 88, вып. 2, с.103–106.

4.12. Теоретическая информация. Ультрафиолетовое излучение /http://www.elm.su/dejstvie-uf-izlucheniya-na-organizm.html.

К ГЛАВЕ 5

5.1. Лазеры: Устройство и действие: Учеб. пособие /А. С. Борейшо. – СПб.: Мех. ин-т, 1992. - 215 с.

5.2. Занько Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Занько Н.Г., Малаяп К.Р., Русак О.Н. - Изд. 13-е, испр. - СПб.: Лань, 2010. - 671 с.

5.3. Руководство Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005.

5.4. Феоктистова Т.Г. Пособие для выполнения практических работ "Защита от лазерного излучения". – М., 2007.

5.5. ГОСТ 12.1.040-83. Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения.

5.6. Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование. Справочник /С.В. Белов, А.Ф. Козьяков, О.Ф. Партолин и др.; Под ред. С.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1989.

5.7. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003. – 560 с.

К ГЛАВЕ 6

- 6.1. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Ядерные технологии в различных сферах человеческой деятельности: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. - 342 с.
- 6.2. Радиация. Дозы, эффекты, риск: пер. с англ. - М.: Мир, 1988. - 79 с.
- 6.1. Аполлонский С. М. Защита от ионизирующих излучений. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.
- 6.2. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов . 8-е изд., стер./Девисилов В. А., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф., Морозова Л. Л., Павлихин Г. П., Переездчиков И. В., Сивков В. П., Смирнов С. Г. – М.: Высш. шк., 2009. - 616 с.
- 6.3. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Климанов В. А., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.1. Физические основы защиты от излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 510 с.
- 6.4. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- 6.5. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.
- 6.6. Матвеев А. В., Коваленко А. И. Основы организации защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени: Учебное пособие /Под ред. А. В. Матвеева. – СПб: ГУ-АП, 2007. – 224 с.
- 6.7. Мокров Ю. В. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – Дубна: Межд. ин-т природы, общества и человека, 2007.
- 6.8. Промышленная экология. Учебное пособие /Под ред. В. В. Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. - 720с.
- 6.9. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. I, 1972; Т. II, 1973.
- 6.10. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
- 6.11. Нормы радиационной безопасности НРБ - 76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП - 72/87. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

- 6.12. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.4.1.2660-10. – М.: Изд. Феликс. Нормативная литература, 2011.
- 6.13. Метрологическое обеспечение радиационного контроля ГОСТ Р 8.594-2002.
- 6.14. Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения //Методические рекомендации МР 2.6.1.0006-10. – М., 2010.

К ГЛАВЕ 7

- 7.1. Аполлонский С. М. Защита от ионизирующих излучений. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.
- 7.2. Белов С. В. и др. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. для вузов . 8-е изд., стер./Девисилов В. А., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф., Морозова Л. Л., Павлихин Г. П., Переездчиков И. В., Сивков В. П., Смирнов С. Г. – М.: Высш. шк., 2009. - 616 с.
- 7.3. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Ковалёв Е. Е., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.2. Защита от ионизирующих излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
- 7.4. Матвеев А. В., Коваленко А. И. Основы организации защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени: Учебное пособие /Под ред. А. В. Матвеева. – СПб: ГУ-АП, 2007. – 224 с.
- 7.5. Мокров Ю. В. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие. – Дубна: Межд. ин-т природы, общества и человека, 2007.
- 7.6. Промышленная экология. Учебн. пособие /Под ред. В. В.Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. – 720 с.
- 7.7. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. I, 1972; Т. II, 1973.
- 7.8. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
- 7.9. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.4.1.2660-10. – М.: Изд. Феликс. Нормативная литература, 2011.

7.10. Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения //Методические рекомендации МР 2.6.1.0006-10. – М., 2010.

К ГЛАВЕ 8

- 8.1. Аполлонский С. М. Защита от ионизирующих излучений. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2014. – 545 с.
- 8.2. Гусев Н. Г. и др. Защита от ионизирующих излучений в 2-х т. /Климанов В. А., Машкович В. П., Суворов А. П., под ред. Н. Г. Гусева. Т.1. Физические основы защиты от излучений. 3-е переработанное издание. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 510 с.
- 8.3. Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций: Учебн. пособие для вузов/ Под общ. ред. акад. Н. А. Доллежаля. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- 8.4. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учеб. пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 88 с.
- 8.5. Кулешов В. К. и др. Радиационный контроль: Уч. пособие.- Томск: Изд. ТПУ, 2000.
- 8.6. Промышленная экология. Учеб. пособие /Под ред. В. В. Денисова. – М: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2007. – 720 с.
- 8.7. Руководство по радиационной защите для инженеров. В 2-х т. Пер. с англ. /Под ред. Д. Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат; Т. I, 1972; Т. II, 1973.

К ГЛАВЕ 9

- 9.1. СП 2.6.1. 799-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): Санитарные правила. М.: Минздрав России, 2000.
- 9.2. СанПин 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
- 9.3. Постановление от 18 февраля 2003 г. № 8 о введении в действие САНПИН 2.6.1.1192-03.

- 9.4. Рентгенологическое обследование: типы обследований, дозы облучения, безопасность и риски рентгенологического обследования.
<http://www.polimed.ru/lab-roentg-post001.html>.
- 9.5. СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований».
- 9.6. Морокина, Г.С. Методы и средства досмотрового рентгеновского контроля: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во СЗТУ, 2009. – 222 с.
- 9.7. Международные основные требования по безопасности для защиты от ионизирующего излучения и безопасности источников излучения: IAEA Safety. Series No. 115. Vienna, 1996.
- 9.8. Радиационная защита и безопасность в промышленной радиографии: IAEA Safety Reports. Series No. 13. Vienna, 1999.

К ГЛАВЕ 10

- 10.1. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / С.В. Белов, В.А. Девисиллов, А.Ф. Козьяков и др.; Под общ. ред. С.В. Белова. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 606 с.
- 10.2. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие для вузов / Под ред. проф. Л.А. Муравья. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 431 с.
- 10.3. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда / П.П. Кукин, В.Л. Лапин, Н.Л. Пономарев и др.; Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2001. – 431 с.
- 10.4. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности /ССБТ. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 6 с.
- 10.5. ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума. Классификация – ССБТ. М.: Изд. Стандартов, 1982. – 5 с.
- 10.6. Девисиллов В.А. Охрана труда: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 448 с.
- 10.7. Охрана труда в машиностроении: Учебник для машиностроительных вузов / Е.Я. Юдин, С.В. Белов, С.К. Баланцев и др.; Под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 432 с.
- 10.8. Паспорт лабораторного стенда «Звукоизоляция и звукопоглощение БЖ 2». – М.: РНПО «Росучприбор», 1999.
- 10.9. Смирнов С.Г., Комкин А.И. Исследование глушителей шума: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. –
(http://www.mhts.ru/biblio/metod/smirnov_komkin/metodsm-kom.htm).

- 10.10. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 19 с.
- 10.11. Средства защиты в машиностроении /Под ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

К ГЛАВЕ 11

- 11.1. Сокол Г. И. "Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот" - Днепропетровск: Проминь, 2000. – 143 с.
- 11.2. Жуков А. И., Иванников А. Н., Фрайман Б. Я. О необходимости изучения пространственной структуры звукового поля при оценке действия низкочастотного шума. «Борьба с шумом и звуковой вибрацией». - Москва, 1989 г., с. 53-59.
- 11.3. Жуков А. И., Иванников А.Н, Ларюков А. С., Нюпин Б. Н., Павлов В. И., Фрайман Б. Я. Определение аномально активной зоны вредного действия инфразвуковых шумов в жилых и административных помещениях //Проблемы акустической экологии. – Л.: Стройиздат, 1990, с.13-21.
- 11.4. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003. – 560 с.
- 11.5. Fraiman B., Ivannikov A., Zhukov A. On the influence of infranoise fildes on humanus / 6-th Internacionol Meetingon Low friguence Noise and Vibracion». 4-6 September 1991. - Leiden, pp.46-56.
- 11.6. Fraiman B., Voronin A., Fraiman E. The alternative mechanism of the infrasound influence on organism. "Noise and Man – 93. 6-th Internationale Congress. Nice, France, 1993, vol.2, pp. 501-504.
- 11.7. Fraiman B. Mechanism of the infrasound effect in transport means. «Transport Noise - 94». St-Petersburg,Russia,1994, pp. 29-32.
- 11.8. Ерущенков А.И., Пономарев Е.А. Илфразвуковые волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика, 1977. Т. 20, № 12. С. 1773–1789.
- 11.9. Ерущенков А.И. Авроральные инфразвуковые волны // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1977. вып. 43, с. 153–162.
- 11.10. Ерущенков А.И., Пономарев Е.А., Турчанинов И.П. Прибор для регистрации илфраакустических и гравитационных атмосферных волн // Там же. Иркутск, 1974, вып. 34, с. 50–57.

- 11.11. Ерущенков А.И., Довбня Б.В. О связи высокочастотного инфразвука и геомагнитных пульсаций в авроральной зоне // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. - М.: Наука, 1977, вып. 43, с. 142–146.
- 11.12. Ерущенков А.И., Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Орлов В.В. Основные результаты исследований атмосферного инфразвука в ИСЗФ СО РАН (1972–1992 гг.) // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Новосибирск, 1993, вып. 100, с. 54–94.
- 11.13. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. - М.: Мир, 1982. - 428 с.
- 11.14. Пономарев Е.А. О «резонансном» механизме генерации ионосферных неоднородностей // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. - М.: Наука, 1979, вып. 47, с. 3–9.
- 11.15. Хайнс К.О. Атмосферные гравитационные волны (обзор). Термосферная циркуляция / под ред. У. Уэба. - М.: Мир, 1975, с. 85–99.
- 11.16. Maeda K., Watanabe T. Pulsating auroras and infrasonic waves in the polar atmosphere // J. Atm. Sci. 1964. V. 21, N 1. P. 15–29.
- 11.17. Wilson C.R. Infrasonic wave generation by aurora // J. Atmos. Terr. Phys. 1975. V. 37, N 6/7. P. 973–988.
- 11.18. ЗАО «Руднев–Шиляев». Преобразователь измерительный аналого-цифровой ЛА-1,5 РСІ. Руководство по эксплуатации. ВКФУ.411619.060-01РЭ. Москва, 2002.
- 11.19. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Санитарные нормы шума на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".
- 11.20. ГОСТ 12.1.003-83 "ССБТ. Шум. Общие требования безопасности".
- 11.21. Руководство 2.2.4/2.1.8.000-95 "Гигиеническая оценка физических факторов производственной и окружающей среды".
- 11.22. Методические указания по гигиенической оценке производственной и непроизводственной шумовой нагрузки N 4435-87.
- 11.23. СанПиН 4948-89. Санитарные нормы допустимых уровней инфразвука и низкочастотного шума на территории жилой застройки.

К ГЛАВЕ 12

- 12.1. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.Н. Основы физики и техники ультразвука: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
- 12.2. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2005. – 223 с.
- 12.3. Балдев Радж, Раджендран В., Паланичами П. Мир физики и техники. Применения ультразвука. - М.: Техносфера, 2006.
- 12.4. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003. – 560 с.
- 12.5. Ультразвук /Под ред. А.Б. Мишина др. – М.: Высшая школа, 1977. – 425 с.
- 12.6. Хмелев, В.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции: монография / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, С.В. Левин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 196 с.
- 12.7. Хорбенко И.Г. Звук, ультразвук, инфразвук. – М., 1986.

К ГЛАВЕ 13

- 13.1. Хузиахметов Р.А. Исследование вибрации ее оценка: Методические указания к лабораторно-практическим занятиям. - Казань: КГАСУ, 2013. – 34 с.
- 13.2. Профессиональные заболевания. Руководство для врачей/Н.Ф. Измеров, А.М. Монаенкова, В.Г. Артамонова и др. // Под ред. Н.Ф. Измерова. – М.: Медицина, 1996. – В 2 томах. Т. 2.
- 13.3. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А. Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль. – М.: Медицина, 2003.
- 13.4. Руководство Р 2.2.2006–05. «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда», утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 29.07.2005 г.
- 13.5. О состоянии профессиональной заболеваемости в Российской Федерации в 2011 году: Информационный сборник статистических и

аналитических материалов. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012.

13.6. Беляев В. М., Миронов В. М., Сечин А. И. Расчет и проектирование средств защиты: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 184 с.

13.7. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. Ред. совет: В. Н. Челомей и др. - М: Машиностроение, 1981.

13.8. Блехман И.И. Вибрационная механика. - М., 1994; англ. пер.: *Blekhman I.I., Vibrational Mechanics (Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications)*. Singapore, 2000.

13.9. СН 2.2.4_2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОЛЯ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	5
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ГЛАВА 1. НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТЕХНОСФЕРУ	7
1.1. ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	7
1.1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....	7
1.1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	8
1.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА	12
1.2.1. РЕЦЕПТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ.....	12
1.2.2. МЕХАНИЗМЫ СВЯЗИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	18
1.2.3. ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	27
1.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЧЕЛОВЕКА.....	35
1.3.1. ВИДЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА.....	35
1.3.2. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕХНОСФЕРЕ	52
ГЛАВА 2. ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.....	71
2.1. ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА	71
2.1.1. ИСТОЧНИКИ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	71
2.1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСВЕЩЕНИЯ.....	74
2.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ВИДИМОГО СВЕТА НА ЧЕЛОВЕКА	77
2.3. НОРМИРОВАНИЕ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	87
2.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	87
2.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ОСВЕЩЁННОСТИ	91
ГЛАВА 3. ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	93
3.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	93
3.1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	95

3.1.2. ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	95
3.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА	96
3.3. НОРМИРОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	99
3.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	99
3.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНФРАКРАСНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ.....	105
ГЛАВА 4. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	106
4.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	106
4.2. ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	107
4.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УФИ [4.12].....	108
4.3.1. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА	108
4.3.2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА	111
4.3.3. ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА	115
4.4. НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	117
ГЛАВА 5. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	121
5.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	121
5.2. ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	121
5.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	124
5.4. НОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	126
РАЗДЕЛ II. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	128
ВВЕДЕНИЕ.....	128
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И КОНСТАНТЫ.....	130
ГЛАВА 6. ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ПАРАМЕТРЫ	132
6.1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ	132
6.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	132
6.1.2. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	135
6.1.3. ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	138
6.2. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ В ОБЛАСТИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	139
6.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	139
6.2.2. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ	140

6.2.3. ДОЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ	144
6.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	158
ГЛАВА 7. РАДИАЦИОННАЯ СРЕДА И ЧЕЛОВЕК	165
7.1. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЧЕЛОВЕКА	165
7.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	167
7.3. ПЕРВИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	173
ГЛАВА 8. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	176
8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ДОЗОВЫЕ ПРЕДЕЛЫ ..	176
8.2. УРОВНИ ФОНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА	181
8.3. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ДОЗОВЫХ ПРЕДЕЛОВ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИМИ ДОКУМЕНТАМИ	187
8.4. ОСНОВНЫЕ САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	194
ГЛАВА 9. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	198
9.1. ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	198
9.1.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	198
9.1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	204
9.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	207
9.2.1. ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ..	207
9.2.2. ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	208
9.2.3. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	210
9.3. НОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	213
9.3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	213
9.3.2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ.....	218
РАЗДЕЛ III. ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	220
ВВЕДЕНИЕ.....	220
ГЛАВА 10. ШУМ.....	222
10.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА	222
10.2. ПОНЯТИЕ О ШУМАХ. ИСТОЧНИКИ ШУМА.....	228

10.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ШУМА	232
10.4. НОРМИРОВАНИЕ ШУМА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ	235
ГЛАВА 11. ИНФРАЗВУК	238
11.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКА	238
11.2. ИСТОЧНИКИ ИНФРАЗВУКА	244
11.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНФРАЗВУКА	255
11.4. ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ИНФРАЗВУКА	265
ГЛАВА 12. УЛЬТРАЗВУК	274
12.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКА	274
12.2. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОЛЕ	275
12.3. ИСТОЧНИКИ И ПРИЁМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА	279
12.4. КЛАССЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ УЛЬТРАЗВУКА	284
12.5. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА	284
12.6. ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА	292
ГЛАВА 13. ВИБРАЦИЯ	296
13.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИИ	296
13.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ	299
13.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИБРАЦИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЧЕЛОВЕКА	309
13.4. НОРМИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВИБРАЦИИ	311
13.5. ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВИБРАЦИИ В ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ВИБРАЦИИ	314
БИБЛИОГРАФИЯ	316

С.М. Аполлонский

**ЗАЩИТА ТЕХНОСФЕРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ**

Том 1. Виды физических полей и излучений.
Нормативно-правовые документы

Монография

В авторской редакции

Подписано в печать 23.02.2016
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 20,75.
Тираж 1000 экз.

ООО «Русайнс».
117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.
Тел.: +7 (495) 741-46-28.
E-mail: autor@ru-science.com
<http://ru-science.com>