

А.Г. Ветошкин

Защита окружающей среды от энергетических воздействий

Допущено

*Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому
образованию в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
«Инженерная защита окружающей среды»
направления «Защита окружающей среды»*



Москва «Высшая школа» 2010

УДК 628.5
ББК 20.1
В 39

Рецензенты:

кафедра «Инженерная экология» Пензенской государственной технологической академии — зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф., член-корр. Нью-Йоркской академии наук *К.Р. Таранцева*;
д-р биол. наук, проф., академик МАНЭБ *Н.Ю. Келина*
(Пензенский филиал Международного независимого экологического университета)

Ветошкин А.Г.

В39 **Защита окружающей среды от энергетических воздействий:**
Учеб. пособие для вузов / А.Г. Ветошкин. — М.: Высш. шк., 2010. — 383 с.: ил.

ISBN 978-5-06-005923-6

Рассмотрены основы процессов воздействия физических полей преимущественно антропогенного происхождения на человека и окружающую среду. Описаны методы и средства защиты от действия энергетических выбросов и физических загрязнений различной природы, включая колебательно-волновое (шумы, вибрации, инфра- и ультразвук) загрязнение, постоянные и переменные электромагнитные поля различных длин волн (от промышленной частоты до электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты), тепловое загрязнение и оптическое излучение, а также ионизирующие излучения, включая рентгеновский и γ -диапазоны. Большое внимание уделено методикам и примерам расчета защиты от энергетических воздействий.

Для студентов, обучающихся по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды», может быть использовано в качестве основной учебной литературы при изучении и курсовом проектировании по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» и в качестве дополнительной учебной литературы при изучении дисциплин «Экология» и «Безопасность жизнедеятельности» студентами других инженерных специальностей.

УДК 628.5
ББК 20.1

ISBN 978-5-06-005923-6

© ОАО «Издательство
«Высшая школа», 2010

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

ПРЕДИСЛОВИЕ

С точки зрения современной науки, геофизическая оболочка Земли представляет собой ноосферу — сферу взаимодействия природы и общества, или систему «окружающая природная среда—человек—техника». Под окружающей природной средой, или окружающей средой, понимают совокупность естественных и измененных природных условий обитания человека и производственной деятельности общества.

Одним из главных абиотических факторов окружающей природной среды являются физические поля, заполняющие среду обитания и воздействующие на живую и неживую природу с момента образования Земли. Воздействие физических полей на среду обитания во многом определяет большинство процессов биосферы. Изучение физических полей естественного и техногенного происхождения и их воздействия на человека составляет основное содержание физической экологии.

Биосфера подвергается воздействию многих факторов, имеющих как естественное, так и техногенное происхождение.

Физические поля околоземного пространства (электромагнитные излучения, статические электрические и магнитные поля, радиация, шумы, вибрация и т. п.) пронизывают биосферу и постоянно воздействуют на человека и другие живые организмы.

На нашей планете описаны и получили наименование более миллиона биологических видов. Каждая клетка живого организма представляет собой элементарную физиологическую ячейку. Человек состоит примерно из 10^{16} клеток и является индивидуальной упорядоченной и самоорганизующейся системой.

Неживая материя окружающей природной среды также обладает разнообразием. Более ста химических элементов и тысячи известных изотопов образует более 1 млн идентифицированных химических соединений, жидких и твердых растворов и сплавов, минералов, имеющих самые различные физические и химические свойства.

Развитие цивилизации и современный научно-технический прогресс непосредственно связаны с природопользованием, т. е. с глобальным использованием природных ресурсов.

«Человек—среда обитания» — сложная термодинамическая, неравновесная, диссипативная система, характеризующаяся наличием обратных связей, стохастичностью (случайностью) и требующая для своего устойчивого развития ряд необходимых и достаточных условий.

Деятельность человека все глубже проникает в биосферу — область активной жизни оболочки Земли, включающую нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы, которые заселены живыми организмами. Толщина этой оболочки (40...50 км) ничтожно мала по сравнению с диаметром Земли, доступна для человеческой деятельности и чрезвычайно ранима. Воздействие человека на биосферу связано со все возрастающими темпами научно-технического прогресса и необходимостью решения возникающих социально-экономических задач.

Физическая экология тесно связана со многими направлениями как экологии биосферы, так и экологии техносферы.

Процессы воздействия физических полей антропогенного и естественного происхождения на человека являются предметом изучения таких современных направлений, как экология биосферы, экология техносферы и учение о безопасности жизнедеятельности.

Кроме рассмотрения основных составляющих физических полей в пособии описаны методы и средства защиты от действия физических загрязнений, когда их уровень превышает допустимый.

Большое внимание уделено рассмотрению сущности различных энергетических полей и методов защиты от акустического загрязнения, включающего воздействие на окружающую среду и человека шума, инфра- и ультразвука, вредных механических колебаний в виде вибрации, электромагнитных полей различных диапазонов, включая радиочастотный и оптический. В отдельную группу выделены вопросы защиты от ионизирующих излучений.

Данное учебное пособие имеет целью привить будущим инженерам-экологам понимание физической сущности многих процессов, происходящих в среде обитания, и необходимости защиты от техногенных энергетических воздействий.

Глава 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Любое промышленное предприятие является источником техногенных загрязнений. На схеме (рис. 1.1) показано взаимодействие промышленного предприятия с окружающей природной средой, которая в общем виде отражает все ресурсы, поступающие на производство, и образованные в процессе производственной деятельности предприятия отходы различных видов.

Большую долю загрязнений занимают энергетические выбросы. Промышленные предприятия, объекты энергетики, связи и транспорт — основные источники энергетического загрязнения промышленных регионов, городской среды, жилищ и природных зон.

К энергетическим загрязнениям относятся вибрационные и акустические воздействия, электромагнитные поля и излучения, ионизирующее излучение радиоактивных веществ, тепловое излучение,



Рис. 1.1. Схема взаимодействия промышленного предприятия с окружающей природной средой



Рис. 1.2. Классификация энергетических загрязнений

ультрафиолетовое и видимое излучения, возникающие в результате антропогенной деятельности.

По своей природе энергетические загрязнения условно можно разделить на три группы (рис. 1.2): механические, электростатические (магнитостатические) и электромагнитные.

К первой группе относятся энергетические загрязнения, представляющие собой колебательно-волновое движение частиц упругой среды газовой, жидкой, твердых фаз: различные шумы, вибрации, инфра- и ультразвук.

Вторую и третью группы составляют техногенные загрязнения, представляющие собой постоянные и переменные электромагнитные поля различных длин волн: от промышленной частоты до электромагнитных колебаний очень высокой частоты, вплоть до рентгеновского и γ -диапазонов. В свою очередь, в каждой из этих групп в зависимости от различных свойств техногенных энергетических загрязнений может быть применена классификация по другим признакам.

Производственная среда — это часть техносферы, обладающая повышенной концентрацией негативных факторов, в том числе и физических. Основными носителями вредных физических факторов в производственной среде являются машины и другие технические устройства, источники энергии. Травмирующие и вредные энергетические факторы производственной среды включают повы-

шенные уровни шума и вибраций, электромагнитных и ионизирующих излучений, повышенный уровень статического электричества, повышенное значение напряжения в электрической цепи (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Источники вредных энергетических факторов

Вредные энергетические факторы	Источники и зоны действия факторов
Акустические колебания: шум	Зоны около технологического оборудования ударного действия, устройств для испытания газов, транспортных средств, энергетических машин
инфразвук	Зоны около виброплощадок, мощных двигателей внутреннего сгорания и других высокоэнергетических систем
ультразвук	Зоны около ультразвуковых генераторов, дефектоскопов, ванны для ультразвуковой обработки
Вибрации: общие	Виброплощадки, транспортные средства, строительные машины
локальные	Виброинструмент, рычаги управления транспортных машин
Статическое электричество	Зоны около электротехнического оборудования на постоянном токе, зоны окраски распылением, синтетические материалы
Электрический ток	Электрические сети, электроустановки, распределители, трансформаторы, оборудование с электроприводом и т. д.
Электромагнитные поля и излучения	Зоны около линий электропередач, установок ТВЧ и индукционной сушки, электроламповых генераторов, телеэкранов, дисплеев, антенн, магнитов
Инфракрасная радиация	Нагретые поверхности, расплавленные вещества, излучение пламени
Ультрафиолетовая радиация	Зоны сварки, плазменной обработки
Лазерное излучение	Лазеры, отраженное лазерное излучение
Ионизирующие излучения	Ядерное топливо, источники излучений, применяемые в приборах, дефектоскопах и при научных исследованиях

Вибрации, источником которых являются технологическое оборудование, рельсовый транспорт, строительные машины и тяжелый автотранспорт, распространяются по грунту. Протяженность зоны воздействия вибрации определяется величиной их затухания в грунте, которая составляет 1 дБ/м. Чаще всего на расстоянии 50...60 м от магистралей рельсового транспорта вибрации затухают. Зоны действия вибраций около кузнечно-прессовых цехов, оснащенных молотами с облегченными фундаментами, значительно больше и могут иметь радиус до 150...200 м.

Шум в городской среде и жилых зданиях создается транспортными средствами, промышленным оборудованием, санитарно-техническими устройствами и установками. На городских магистралях и в прилегающих к ним зонах уровни звука могут достигать 70...80 дБА, а в отдельных случаях — 90 дБА и более. В районе аэропортов уровни звука еще выше.

Источники инфразвука могут быть как естественного (обдувание ветром строительных сооружений и водной поверхности), так и антропогенного (подвижные механизмы с большими поверхностями — виброплощадки, виброгрохоты; ракетные двигатели, двигатели внутреннего сгорания большой мощности, газовые турбины, транспортные средства) происхождения. В отдельных случаях уровни звукового давления инфразвука могут достигать нормативных значений (90 дБ) и даже превышать их на значительных расстояниях от источника.

Основными источниками электромагнитных полей (ЭМП) радиочастот являются радиотехнические объекты (РТО), телевизионные и радиолокационные станции (РЛС), термические цехи и участки в зонах, примыкающих к предприятиям. Воздействие ЭМП промышленной частоты связано с высоковольтными линиями (ВЛ) электропередач, источниками постоянных магнитных полей, применяемыми на промышленных предприятиях. Зоны с повышенными уровнями ЭМП, источниками которых могут быть РТО и РЛС, имеют размеры до 100...150 м. При этом внутри зданий, расположенных в этих зонах, плотность потока энергии, как правило, превышает допустимые значения.

ЭМП промышленной частоты в основном поглощается почвой, поэтому на небольшом расстоянии (50...100 м) от линий электропередач электрическая напряженность поля падает с десятков тысяч вольт на метр до нормативных значений. Значительную опасность представляют магнитные поля, возникающие в зонах около линий электропередач (ЛЭП) токов промышленной частоты

ты и в зонах, прилегающих к электрифицированным железным дорогам. Магнитные поля высокой интенсивности обнаруживаются и в зданиях, расположенных в непосредственной близости от этих зон.

В быту источниками ЭМП и излучений являются телевизоры, дисплеи, печи СВЧ и другие устройства. Электростатические поля в условиях пониженной влажности (менее 70 %) создают одежда и бытовые принадлежности (ткани, паласы, накидки, занавески и т. д.). Микроволновые печи в промышленном исполнении не представляют опасности, однако неисправность их защитных экранов может существенно повысить утечку электромагнитного излучения. Экраны телевизоров и дисплеев как источники электромагнитного излучения в быту не представляют большой опасности даже при длительном воздействии на человека, если расстояния от экрана превышают 30 см.

Воздействие ионизирующего излучения на человека может происходить в результате внешнего и внутреннего облучения. Внешнее облучение вызывают источники рентгеновского и γ -излучения, потоки протонов и нейтронов, внутреннее облучение — α - и β -частицы, которые попадают в организм человека через органы дыхания и пищеварительный тракт.

Для человека, проживающего в промышленно развитых регионах, годовая суммарная эквивалентная доза облучения из-за высокой частоты рентгенодиагностических обследований достигает 3000...3500 мкЗв/год (средняя на Земле доза облучения равна 2400 мкЗв/год). Для сравнения — предельно допустимая доза для профессионалов (категория А) составляет 50 000 мкЗв/год.

Рассеивание в атмосфере радионуклидов, содержащихся в выбросах, приводит к формированию зон загрязнения около источника выбросов. Обычно зоны антропогенного облучения жителей, проживающих вокруг предприятий по переработке ядерного топлива на расстоянии до 200 км, колеблются от 0,1 до 65 % естественного фона излучения.

Миграция радионуклидов в водоемах и грунте значительно сложнее, чем в атмосфере. Это обусловлено не только параметрами процесса рассеивания, но и склонностью радионуклидов к концентрации в водных организмах, к накоплению в почве. Миграция радиоактивных веществ в почве определяется в основном ее гидрологическим режимом, химическим составом почвы и радионуклидов. Меньшей сорбционной емкостью обладает песчаная почва, большей — глинистая, суглинки и черноземы.

Уровень радиоактивности в жилом помещении зависит от строительных материалов: в кирпичном, железобетонном, шлакоблочном доме он в несколько раз выше, чем в деревянном. Газовая плита приносит в дом не только токсичные газы (окислы азота, оксид углерода и другие, включая канцерогены), но и радиоактивные газы. В помещении человек может подвергаться воздействию изотопов радона, которые поступают в помещение через фундамент, пол, из воды.

Из рассмотренных энергетических загрязнений в современных условиях наибольшее негативное воздействие на человека оказывают радиоактивное и акустическое загрязнения.

Глава 2

ЗАЩИТА ОТ АКУСТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

2.1. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Под *звуком* понимают волнообразно распространяющиеся колебания частиц упругой среды — твердого тела, жидкости, газа. Периодически и достаточно часто чередующиеся избыточные по сравнению с атмосферным давлением создают звуки. Звук имеет частоту колебаний, определяющую субъективное восприятие высоты, амплитуду колебаний, обуславливающую громкость тона, и ряд гармонических колебаний, сопутствующих основному тону, которые создают тембр или окраску звука. Кроме того, звук (или шум) характеризуется своей продолжительностью во времени.

Различают биологическое и физическое понятия 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 находится в диапазоне от 15...20 Гц до 20 кГц.

Физическое понятие о звуке 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 герца.

Колебания упругих сред с частотами более 20 кГц называют *ультразвуком*, который тоже не вызывает слуховых ощущений. Ультразвук широко применяют в современной технологии (дефектоскопии, ультразвуковой технологии обработки материалов и т. п.), медицине (диагностике, хирургии и т. п.), радиотехнике и других областях науки и техники.

В диапазоне частот $10^9...10^{13}$ Гц находятся колебания упругих сред, называемых *гиперзвуком*. Верхний предел частот гиперзвука в газах ограничен частотой 10^9 Гц, а в твердых телах и жидкости — $10^{12}...10^{13}$ Гц.

Звуковые колебания и волны (их возникновение, распространение и взаимодействие с веществом) изучаются специальным разделом физики — акустикой, являющейся учением о звуке. Многие разделы физики и различные технические приложения связаны с колебательными процессами, которые весьма разнообразны по своей физической природе, характеру и форме повторяемости, частоте изменений и механизму возникновения. Колебательным и волновым процессам присущи некоторые характерные закономерности, общие для колебаний различной физической природы.

На рис. 2.1 показаны виды колебаний, имеющих механическую, электрическую или другую природу (уплотнение газа, электрическое напряжение или ток, деформация твердого тела и т. п.).

В общем случае периодическое колебание (рис. 2.1, кривая 1) повторяется через одинаковые промежутки времени (период T) бесконечное число раз и может быть выражено формулой

$$s(t+T) = s(t), \quad (-\infty < t < \infty).$$

Число колебаний в единицу времени T характеризуется частотой $f = 1/T$, которая измеряется в герцах (один цикл в секунду равен 1 Гц).

Периодическое колебание может быть прямоугольным (рис. 2.1, кривая 2), пилообразным (рис. 2.1, кривая 3), синусоидальным (рис. 2.1, кривая 4) и т. д. При синусоидальных колебаниях величину s можно выразить в виде гармонической функции:

$$s(t) = A \cos(\omega t - \varphi),$$

где A , ω , φ — соответственно амплитуда, угловая частота и фаза.

Амплитуда определяет максимальное значение $s(t)$. Угловая (циклическая) частота

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Величина $(\omega t - \varphi)$ называется фазой колебания, а величина φ — начальной фазой (или просто фазой). Колебание, модулированное по амплитуде (рис. 2.1, кривая 7), можно выразить формулой

$$s(t) = A \cos(\omega t - \varphi),$$

а в случае модуляций еще и по фазе (рис. 2.1, кривая 9):

$$s(t) = A(t) \cos[\omega t - \varphi(t)].$$

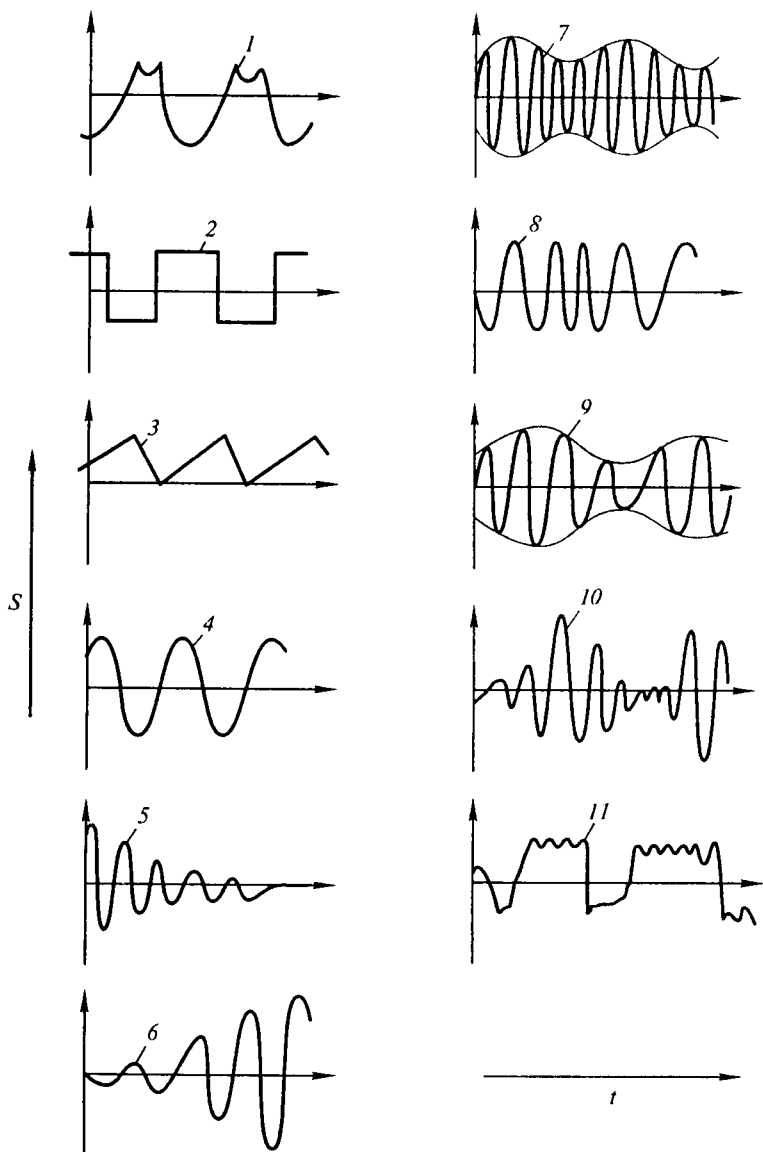


Рис. 2.1. Виды колебаний:

1 — периодическое произвольной формы; 2 — прямоугольное; 3 — пилообразное; 4 — синусоидальное; 5 — затухающее; 6 — возрастающее; 7 — амплитудно-модулированное; 8 — частотно-модулированное; 9 — колебание, модулированное по амплитуде и фазе; 10 — случайное; 11 — беспорядочное

При затухающем колебании (рис. 2.1, кривая 5) величина $s(t)$ имеет вид:

$$s(t) = A\chi^{-mt} \cos(\omega t - \varphi), \quad (2.1)$$

где $\chi > 0$ — коэффициент затухания.

В случае нарастающего колебания величину $s(t)$ тоже можно выразить формулой (2.1), но при этом $\chi < 0$.

В природе и в технике не существует строго периодических (гармонических, монохроматических) колебаний, однако с достаточным приближением большое число явлений можно описывать набором гармонических функций.

Источники звука можно разделить на следующие основные типы:

- колебательные или автоколебательные системы, в которых под действием локального источника энергии возникают либо собственные затухающие колебания, либо незатухающие автоколебания (все музыкальные инструменты, человеческий голос, паровые и пневматические свистки и т. п.);

- вращательные системы, в которых периодические изменения давления и скорости среды вызываются от вращающихся тел (винт самолета или корабля; ротор электромеханического устройства; турбины; сирены, создающие звук в результате периодических изменений скорости газовой струи, и т. п.);

- электроакустические преобразователи (телефоны, громкоговорители, эталонные источники звука — термофоны и т. п.).

Для описания колебательных процессов упругой среды в акустике приняты следующие объективные характеристики и понятия. В случае периодических колебаний скорость распространения звука v в упругой среде связана с длиной волны λ , частотой f и периодом T соотношением $v = \lambda f = \lambda/T$.

Звуковая энергия $W_{зв}$, Дж, состоит из кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации.

Плотность звуковой энергии $w_{зв}$, Дж/м³, определяет звуковую энергию, отнесенную к единице объема упругой среды.

Поток звуковой энергии (звуковая мощность) $\Phi_{зв}$, Вт, определяет энергию, переносимую в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения.

Звуковое давление p_a , Па, в упругой среде при наличии звуковых колебаний складывается из давления в невозмущенной среде и переменного дополнительного давления, возникающего в каждой точке среды в данный момент времени. При этом звуковое давление в течение периода колебаний изменяет свою величину и знак между положительными и отрицательными амплитудными значениями.

Объемная скорость V , м³/с, определяется как произведение колебательной скорости v и площади, которую за единицу времени пересекают все частицы из объема vS , т. е. $V = vS$.

Интенсивность звука (сила звука) J , Вт/м², определяется средней по времени энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения волны:

$$J = W_{\text{зв}}/(tS).$$

Сила звука — одна из основных энергетических характеристик. В случае плоской синусоидальной волны малой амплитуды в неподвижной и изотропной среде интенсивность (сила) звука J связана с максимальными по времени амплитудами звукового давления p_a и колебательной скорости $\tilde{v}$ соотношением

$$J = \frac{1}{2} p_a \tilde{v} = \frac{1}{2} \tilde{v}^2 \rho v = \frac{1}{2} \frac{p_a^2}{\rho v},$$

где ρ — плотность среды.

Мгновенное значение скорости $\tilde{v}$ волн в газовой и жидкой средах определяется соотношением

$$\tilde{v} = p_a/(\rho v). \quad (2.2)$$

Умножив обе части соотношения (2.2) на площадь S , получим

$$\tilde{v} S = \frac{p_a S}{\rho v} = \frac{p_a}{R_a} = V.$$

Величину $R_a = \rho v/S$ принято называть акустическим сопротивлением. Объемная скорость колебаний V в общем случае может не совпадать по фазе с переменным звуковым давлением p_a , поэтому вводят понятие удельного акустического сопротивления η_a (акустического импеданса), которое является акустическим сопротивлением: $\eta_a = \rho v$, т. е. удельное акустическое сопротивление равно произведению плотности частиц на скорость распространения колебаний. Величина η_a определяет амплитуду звукового давления в среде при заданной амплитуде колебательной скорости частиц. Чем больше величина η_a , тем больше степень сжатия и разрежения среды при распространении звуковой волны с заданной амплитудой.

Усредненная по времени плотность звуковой энергии $w_{\text{зв}}$ определяется следующими соотношениями:

$$w_{\text{зв}} = \frac{J}{v}; \quad w_{\text{зв}} = \frac{1}{2} \rho \tilde{v}^2; \quad w_{\text{зв}} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho v^2}.$$

В акустике введено также понятие механического сопротивления, определяемого отношением периодической силы к скорости:

$$R_m = \frac{p_a S}{\dot{v}}.$$

Помимо указанных выше характеристик акустических величин пользуются относительными параметрами, т. е. отношениями измеряемых величин к некоторым пороговым значениям, поэтому введены понятия относительных уровней звукового давления и интенсивности. Разность двух уровней интенсивности звука J_1, J_2 определяется соотношением $L_J = \lg(J_2/J_1)$.

Единицей измерения разности уровней является бел (Б), определяемый как логарифм отношения интенсивностей звука при $J_2/J_1 = 10$. При этом десятичный логарифм равен 1.

Применяется также другая единица — децибел (дБ), равная 0,1 Б. Таким образом, при разности уровней, равной 1 дБ, отношение $J_2/J_1 = 10^{0,1} \approx 1,26$. При этом разность уровней J_2, J_1 определяется соотношением

$$L_J = 10 \lg(J_2/J_1).$$

Используя соотношение $J = p_a^2/\rho v$, определяют разность уровней силы звука:

$$\lg(J_2/J_1) = 2 \lg(p_2/p_1).$$

При измерении уровней звукового давления в децибелах имеем:

$$L_p = 20 \lg(p_2/p_1). \quad (2.3)$$

На практике иногда разности уровней J и p_a измеряют в неперах (Нп). При этом применяют натуральные логарифмы, а соотношения между белом, децибелом и непером соответственно равны: 1 Б = 2,303 Нп; 1 дБ = 0,2303/2 Нп = 0,1151 Нп. Условным порогом звукового давления считается величина, равная $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Чувствительность человеческого уха различна к звукам разных частот. Поэтому восприятие звука хотя и зависит от интенсивности, но эта зависимость имеет сложный характер и не является однозначной. Слуховой аппарат человека реагирует на высоту звука, его интенсивность, тембр, который зависит от относительной интенсивности дополнительных колебаний более высокого порядка, чем основная частота, определяющая высоту звука. Субъективное восприятие звука определяется величинами, сопоставимыми в той или иной степени с объективными акустическими характеристиками, рассмотренными выше.

Качественная характеристика звука определяется его частотой. Основным интервалом в музыке и технической акустике является октава. Величина этого интервала определяется граничными частотами, отношение которых равно двум. Разные звуки воспринимаются человеческим ухом как равноотстоящие по высоте, если отношения их частот равны.

Для характеристики уровня громкости иногда пользуются специальной единицей — *фон*. Эта единица определяется как разность уровней громкости двух звуков данной частоты, равногромкие которым звуки с частотой 1000 Гц отличаются по интенсивности на 10 дБ. Предел слышимости принимается за нулевой уровень.

В газе и жидкости звуковые волны являются продольными, потому что эти среды обладают только объемной упругостью. Скорость звука в них не зависит от частоты в слышимом и инфразвуковом диапазонах. В многоатомных газах и жидкостях со сложным строением молекул зависимость скорости звука от частоты (дисперсия звука) наблюдается в области достаточно высоких ультразвуковых частот.

Твердые тела помимо объемной упругости обладают упругостью формы, поэтому в твердых телах распространяются как продольные, так и поперечные волны. Волновые фронты распространения в твердых телах зависят от свойств вещества, формы тела, направления.

Упругая волна представляет собой две независимо распространяющиеся волны. В продольной волне смещение в среде совпадает с направлением распространения колебаний со скоростью v_1 , в поперечной — смещение перпендикулярно направлению распространения звука. Скорость распространения продольных волн всегда больше скорости поперечных.

При распространении звуковых колебаний в сплошной среде возникает звуковое поле, которое можно рассматривать как совокупность пространственно-временных распределений звукового давления p , колебательной скорости v частиц, относительного сжатия $\delta\rho/\rho$ (ρ — плотность), адиабатического изменения температуры δT и т. п.

При отсутствии скачков давления p_a и скорости v в случае непрерывности среды выражение для звукового давления можно описать в общем виде волновым уравнением

$$\Delta p_a - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} = 0.$$

По мере распространения звуковая волна затухает. Как любой волновой процесс в неограниченной среде, энергия звуковой волны

распределяется по поверхности, возрастающей с квадратом расстояния. В результате распространения звуковой волны часть ее энергии превращается в тепловую энергию частиц среды за счет вязкости и теплопроводности.

Значительно большее поглощение энергии звуковой волны происходит при молекулярном поглощении, когда часть звуковой энергии переходит в энергию внутримолекулярного движения. Кроме того, *экстинкция* (ослабление) звуковой волны может происходить при наличии неоднородности среды (турбулентность, наличие пузырьков воздуха в жидкости, капелек жидкости в газах и т. п.) за счет процессов рассеяния, поглощения и т. д.

При распространении звуковых колебаний большой интенсивности происходят различные нелинейные процессы дополнительного поглощения из-за взаимодействия звукового поля с веществом. В общем виде зависимость силы звука от расстояния в изотропной неограниченной жидкой или газообразной среде можно выразить соотношением

$$J = J_0 \frac{e^{\chi r}}{r^2},$$

где J_0 — сила звука на расстоянии $r = 1$; χ — величина, определяющая расстояние ($r_e = 1/\chi$), на котором происходит уменьшение силы звука J в e раз ($e \sim 2,72$).

Звуковые колебания, как и всякое волновое движение, подчиняются законам интерференции и дифракции. Процесс наложения друг на друга нескольких звуковых волн называется *интерференцией*. Если два колебания одинаковой частоты и амплитуды складываются в одной фазе, то наблюдается усиление колебаний. Если фазы противоположны, то колебания аннигилируются, т. е. прекращаются. На рис. 2.2 показана интерференция волн, в результате которой амплитуда смещения увеличивается (рис. 2.2, а) и уменьшается (рис. 2.2, б).

Явление *дифракции* заключается в том, что звуковые волны огибают преграды, линейные размеры которых меньше длины волны. Короткие волны отражаются от таких препятствий, образуя за ними

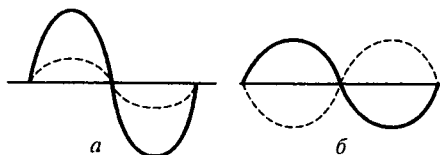
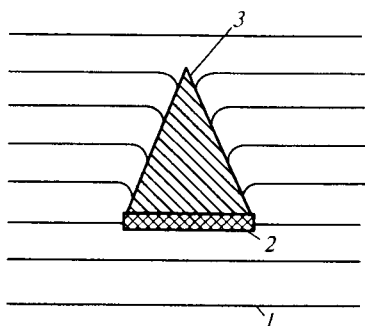


Рис. 2.2. Наложение (интерференция) звуковых волн

Рис. 2.3. Дифракция звуковых волн вокруг препятствия, линейные размеры которого больше длины волны:

1 — фронт волны; 2 — экран; 3 — область звуковой тени



звуковую тень (рис. 2.3). На этом принципе основывается применение шумозащитных экранов, геометрические размеры которых определяются частотой звука, а также расстоянием до источника шума. Кроме того, благодаря дифракции звуковые волны легко проникают в малые по сравнению с длиной волны отверстия, что сильно снижает звукоизоляцию ограждений.

Когда размер неоднородностей и препятствий в среде распространения значительно превосходит длину волны звука, наблюдаются явления преломления и отражения звуковой волны.

Непрерывная упругая поверхность, все точки которой находятся одновременно в одинаковой фазе колебательной скорости, называется *фронтом волны*. В зависимости от вида фронта различают сферические (шаровые), цилиндрические и плоские волны. Следует отметить, что все виды волн по мере удаления от источника приближаются к плоским.

По мере удаления от источника звук затухает в пространстве, причем в результате расширения площади фронта волны S (м^2) звуковое давление сферической волны изменяется обратно пропорционально расстоянию r :

$$p_a = f(1/S) = f(1/\Omega r^2),$$

где Ω — пространственный угол излучения звука ($\Omega = 4\pi$ при излучении в пространство, $\Omega = 2\pi$ при излучении в полупространство) (рис. 2.4).

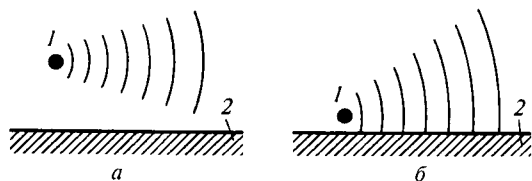


Рис. 2.4. Излучение звука в пространство (а) и полупространство (б):

1 — источник шума; 2 — поверхность

Пространство, в котором звуковые волны свободно распространяются, не встречая отражающих поверхностей, называется *свободным акустическим полем*. Если источником звука является пульсирующая сфера или полусфера, то интенсивность звука в свободном поле убывает пропорционально квадрату расстояния от источника. При цилиндрических (или полуцилиндрических) волнах интенсивность звука уменьшается пропорционально первой степени расстояния. Примером этого случая является прохождение звука через щель.

2.2. ПОНЯТИЕ О ШУМАХ

Шум — случайное сочетание звуков различной интенсивности и частоты; мешающий, нежелательный звук. Слышимые звуковые непериодические колебания с непрерывным спектром воспринимаются как шумы. Источником шума являются колеблющиеся твердые, жидкие и газообразные тела. Энергия этих звуковых колебаний распределена в более или менее широкой области частот. Беспорядочное сочетание звуков, различных по силе и частоте в диапазоне от 16 до 20 000 Гц, называют статистическим шумом. Различают источники шума естественного и техногенного 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 ультра- и гиперзвука: шумы морского прибоя, горного обвала, грозового разряда, извержения вулкана, шум ветра в лесу, пение птиц, голоса животных, шум низвергающегося водопада.

К источникам шума техногенного происхождения относятся все применяемые в современной технике механизмы, оборудование и транспорт, создающие значительное шумовое загрязнение окружающей среды. Техногенный шумовой фон создается источниками, находящимися в постройках, сооружениях, зданиях и на территории между ними.

Источниками 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.

Чтобы представить, в какой области слухового восприятия находятся окружающие человека звуки, рассмотрим табл. 2.1. При этом

следует помнить, что снижение (увеличение) уровня звука (УЗ) на 5 дБА означает снижение (увеличение) воспринимаемой слухом субъективной громкости в 1,5 раза, на 10 дБА — в 2 раза, 15 дБА — в 3 раза, 20 дБА — в 4 раза и т. д.

Таблица 2.1. Шумы, которые нас окружают

Источник шума, его расположение	УЗ, дБА	Расстояние, на котором находится источник от точки измерения, м
Шелест листвы при полном безветрии	20	—
Тихая сельская местность	25...30	—
Шепот	40	0,3
Обычный разговор в комнате	60	1,0
Салон комфортабельного автомобиля	65	—
Легковой малошумный автомобиль	70	7,5
Скоростной поезд	75	100
Звонок будильника	70...80	1,0
Оживленная магистраль	80...85	7,5
Механический цех	85...90	—
Отбойный молоток	100	1,0
Симфонический оркестр	110	10
Обитаемое отделение танка	110...115	—
Взлет реактивного самолета	120...125	100
Взлет ракеты	160...170	100

В зависимости от среды, в которой распространяется звук, условно различают структурные (корпусные) и воздушные шумы. Структурные шумы возникают при непосредственном контакте колеблющегося тела с частями машин, их корпусом, трубопроводами, фундаментами, строительными конструкциями и т. д. Колебательная энергия, сообщаемая источником шума жестко связанным с ним предметам (в зависимости от формы связи и их линейных разме-

ров), распространяется по ним в виде продольных или поперечных волн (или тех и других одновременно). Колеблющиеся поверхности, приводя в колебание прилегающие к ним частицы воздуха, образуют звуковые волны. Если источник не связан с какими-либо конструкциями, то шум, излучаемый им в воздух, называется воздушным.

Характер шума зависит от вида источника. Техногенные шумы по физической природе происхождения подразделяют на следующие группы:

- механические, возникающие при взаимодействии различных деталей в механизмах (одиночные или периодические удары, например при ковке, штамповке, клепке), в результате движения отдельных деталей и узлов машин или механизмов с неуравновешенными массами, особенно сильные в неисправных системах, а также при вибрациях поверхностей устройств, машин, оборудования и т. п.;

- электромагнитные, возникающие вследствие колебаний деталей и элементов электромеханических устройств под действием электромагнитных полей (дрессели, трансформаторы, статоры, роторы и т. п.);

- аэродинамические, возникающие в результате вихревых процессов в газах (адиабатическое расширение сжатого газа или пара из замкнутого объема в атмосферу; возмущения, возникающие при движении тел с большими скоростями в газовой среде, при вращении лопаток турбин и т. п.), при больших скоростях движения газобразных сред, например шумы газовых струй ракетных и реактивных двигателей, шумы, возникающие при всасывании воздуха компрессорными установками, и др.;

- гидродинамические, вызываемые различными процессами в жидкостях (например, возникновение гидравлического удара при быстром сокращении кавитационных пузырей, кавитация в ультразвуковом технологическом оборудовании, в жидкостных системах самолетов и т. п.);

- взрывной или импульсный, возникающий при работе двигателей внутреннего сгорания, дизелей и т. п.

Как сложный звук шум может быть разделен на простые составляющие его тона с указанием интенсивности и частоты. Графическое изображение состава шума называется спектром и является важнейшей его характеристикой.

Шумы подразделяются в зависимости от спектрального состава, временных характеристик и продолжительности действия.

Спектрально-временные характеристики шумов обладают большим многообразием.

По спектральному составу в зависимости от максимальных значений амплитуд звукового давления в спектре шума различают низкочастотные (ниже 300 Гц), среднечастотные (от 300 до 800 Гц), высокочастотные (выше 800 Гц) шумы.

По характеру спектра выделяют широкополосный шум с непрерывным спектром шириной более 1 октавы (в технике приняты октавные полосы со среднегеометрическими частотами, например, 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц) и тональный шум, в спектре которого имеются отдельные слышимые дискретные тона. Тональность шума определяют в процессе измерений уровня звукового давления L_p в третьоктавных полосах частот при превышении уровня в одной полосе над соседними более чем в 10 дБ. Рассчитывают L_p по формуле (2.3).

По временным характеристикам выделяют:

- постоянный шум, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день или за время измерения в помещениях жилых и общественных зданий, на территории жилой застройки изменяется во времени не более чем на 5 дБА;
- непостоянный шум, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день, рабочую смену или во время измерения в помещениях жилых и общественных зданий, на территории жилой застройки изменяется во времени более чем на 5 дБА.

Непостоянный шум подразделяют на:

- колеблющийся, уровень звука которого непрерывно изменяется во времени;
- импульсный, состоящий из одного или нескольких звуковых сигналов каждый длительностью менее 1 с, при этом уровни звука (L_p или L_f), в дБА1 и дБА, измеренные соответственно на временных характеристиках «импульс» и «медленно», отличаются не менее чем на 7 дБ;
- прерывистый, уровень звука которого ступенчато изменяется (на 5 дБА и более) несколько раз за время измерения, причем длительность интервалов, в течение которых уровень остается постоянным, составляет 1 с и более, и в момент действия импульса его амплитуда остается постоянной, превышающей фон.

Например, при работе турбореактивного двигателя (рис. 2.5, а) возникает шум с непрерывным спектром в широком диапазоне частот. При длительном испытании двигателя этот шум может быть постоянным во времени. На рис. 2.5, б показан тональный спектр в

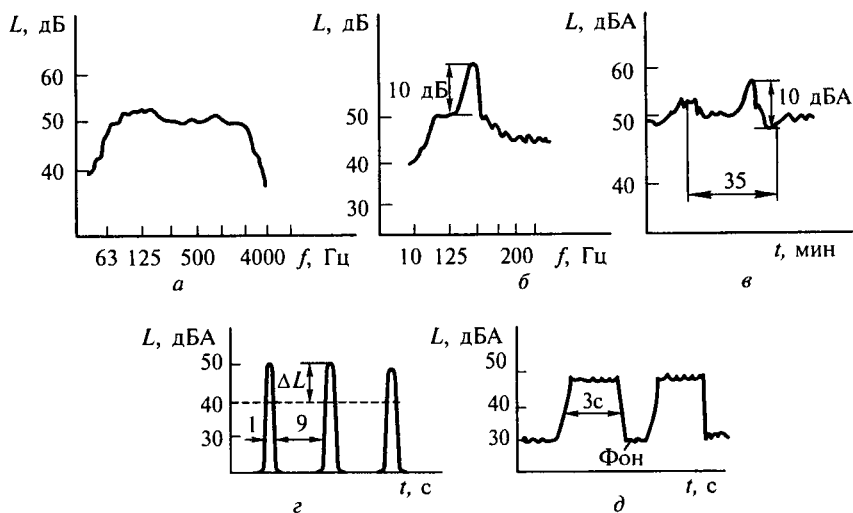


Рис. 2.5. Разновидности спектров реальных источников шумов:

а — непрерывный спектр (турбореактивный двигатель); *б* — тональный (осевой вентилятор); *в* — колеблющийся во времени (транспорт); *г* — импульсный спектр (удар молота); *д* — прерывистый (сбрасывание воздуха)

третьоктавной полосе на среднегеометрической частоте, равной 125 Гц, возникающий при работе осевого вентилятора. Уровень шума в третьоктавной полосе превышает соответствующий уровень на соседних частотах более чем на 10 дБ. Шум транспорта может быть примером непостоянного шума, колеблющимся во времени (рис. 2.5, *в*). На рис. 2.5, *г* показан спектр импульсного шума, возникающего при ударе молота, а на рис. 2.5, *д* — спектр прерывистого шума, возникающего при периодическом сбросе сжатого воздуха газодинамической установки.

При одновременном воздействии нескольких источников может возникнуть шумовое поле со сложным спектрально-временным распределением. Методом последовательного выключения источников шума, если это возможно в процессе эксплуатации различных установок, можно определить вклад каждого из них.

Техногенные шумы часто представляют собой смесь случайных и периодических колебаний. Для определения количественной оценки шумов и описания их источников применяют различные математические модели в соответствии с их временной, спектральной и пространственной структурой. При этом учитывают структуру шумов в источнике и свойства среды, в которой они распространяются.

Постоянные (стационарные) шумы характеризуются постоянством средних параметров: интенсивности или мощности, распределения интенсивности по спектру и т. п. Практически слышимый шум, возникающий в результате действия нескольких независимых источников (например, производственных установок, шум толпы или моря и т. д.), является квазипостоянным (квазистационарным).

Непостоянные (нестационарные) шумы характеризуются медленно меняющимися параметрами или длящимися короткие промежутки времени, меньшие, чем время усреднения в измерительном приборе. Временные характеристики таких шумов показаны на рис. 2.5, в, г, д (например, шум проходящего транспорта, удар молота или отдельные стуки в производственных условиях и т. п.).

Цель исследований акустических шумов — разработка методов снижения их вредного воздействия на человека и на различные системы. Шум может характеризоваться физическими и физиологическими параметрами. С физической стороны шум характеризуется звуковым давлением, интенсивностью (силой) звука, плотностью звуковой энергии, уровнем звукового давления, частотой и плотностью дискретных составляющих и другими параметрами. Шум как физиологическое явление характеризуется высотой, громкостью, областью возбужденных частот или тембром и продолжительностью действия.

Ухо человека способно воспринимать определенный диапазон звуковых давлений, например на средних звуковых частотах от 10^{-5} до 10^2 Па, т. е. различающихся примерно в 10^7 раз. Поэтому для удобства вычислений принято оценивать звуковое давление или соответственно интенсивность звука не в абсолютных, а в относительных единицах — беллах, децибеллах. Измеренные таким образом величины называются уровнями.

Так, уровень звукового давления, дБ,

$$L_p = 20 \lg \frac{p_a}{p_0}, \quad (2.4)$$

где p_a — измеренное звуковое давление, Па; p_0 — условный порог давления, равный $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Уровень интенсивности (силы) звука, дБ,

$$L_J = 10 \lg \frac{J}{J_0},$$

где J — интенсивность звука, Вт/м²; J_0 — интенсивность звука, принимаемая за нулевой уровень, равный 10^{-12} Вт/м².

В плоской звуковой волне свободного звукового поля звуковое давление и интенсивность численно совпадают.

Уровень акустической мощности, дБ, определяется аналогично уровню интенсивности:

$$L_{\Phi} = \lg \frac{\Phi}{\Phi_0},$$

где Φ_0 — условный порог акустической мощности, равный 10^{-12} Вт.

Уровень акустической мощности характеризует излучаемую источником акустическую мощность, приведенную к уровню. Это дает возможность сравнивать уровни мощности отдельных механизмов в любых акустических условиях.

Уровень шума, возникающий от нескольких некогерентных источников, работающих одновременно, подсчитывают на основании принципа энергетического суммирования излучений отдельных источников:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1 L_i}, \quad (2.5)$$

где L_i — уровень звуковой энергии i -го источника шума; n — количество источников шума.

Суммарный уровень шума от n одинаковых по интенсивности источников шума в равноудаленной от них точке рассчитывают по формуле $L_{\Sigma} = L_1 + 10 \lg n$, где L_1 — уровень шума одного источника, дБ.

При одновременном действии двух источников с разными уровнями суммарный уровень L_{Σ} определяют по формуле $L_{\Sigma} = L_1 + \Delta L$, где L_1 — наибольший из двух суммарных уровней шума, дБ; ΔL — добавка в функции разности уровней источников. Значения ΔL приведены ниже.

Разность уровней двух источников, дБ:

$L_1 - L_2$ (при $L_1 > L_2$)	0	1	2,5	4	6	10
ΔL , дБ	3	2,5	2	1,5	1	0,5

При большом числе источников шума суммирование уровней интенсивностей производится последовательно от наибольшего к наименьшему.

Если уровень шума одного источника превышает уровни шума других источников на 8...10 дБ, то будет превалировать шум более

интенсивного источника, так как добавка к суммарному уровню шума будет пренебрежимо малой. Следовательно, уровень менее громкого источника в этом случае можно не принимать во внимание.

Пример 2.1. Определить суммарный уровень шума L_{Σ} от пяти источников шума, имеющих: $L_1 = 92$; $L_2 = 85$; $L_3 = 74$; $L_4 = 86$; $L_5 = 72$ дБ.

В соответствии с формулой (2.5) получим:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg (10^{0,192} + 10^{0,185} + 10^{0,174} + 10^{0,186} + 10^{0,172}) = 97,26 \text{ дБ.}$$

Пример 2.2. Уровни шума двух источников составляют 50 и 56 дБ, разность уровней — 6 дБ; этой величине соответствует значение $\Delta L = 1$ дБ. Следовательно, уровень шума двух одновременно звучащих источников будет равен 57 дБ ($56 + 1 = 57$ дБ).

2.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ШУМА

Среди глобальных проблем современной экологии (парниковый эффект, разрушение озонового слоя, загрязнение воды и атмосферы, радиоактивные отходы и др.) акустическое загрязнение — одно из наиболее тревожных, поскольку не меньше влияет на людей, чем, например, разрушение озонового слоя или кислотные дожди. Неблагоприятное акустическое воздействие в той или иной мере, по-видимому, ощущает каждый второй человек на планете. Широкое внедрение в промышленность новых интенсивных технологий, рост мощности и быстроходности оборудования, широкое использование многочисленных средств наземного, воздушного и водного транспорта, повсеместное применение разнообразного электрифицированного бытового оборудования — все это привело к тому, что человек на работе, в быту, на отдыхе, при передвижении подвергается многократному воздействию вредного шума.

Основные источники акустического загрязнения окружающей среды — транспорт, строительство, промышленные предприятия. Удельный вклад этих источников варьируется в определенных пределах для различных городов и населенных пунктов, но основным остается автомобильный транспорт. Население большинства крупных городов (не менее 60 %) живет в условиях акустического загрязнения, параметры которого существенно превышают допустимые нормы.

Шумы, в особенности техногенного происхождения, вредно воздействуют на организм человека. Повышенный шум действует как на органы слуха (специфические изменения), так и на весь организм (неспецифические изменения). У человека, находящегося в

условиях повышенного шума, через 5 лет слух ухудшается, а через 10 лет может возникнуть заболевание, называемое невритом слуховых нервов, и глухота.

Неспецифическое воздействие шума проявляется в первую очередь в нарушениях нервной и сердечно-сосудистой деятельности. При длительном воздействии шума возрастает артериальное давление, появляются раздражительность, апатия, подавленное настроение. Возможно также ослабление памяти, замедление психических реакций, снижение темпа работы, ухудшение качества переработки информации и, как следствие, уменьшение производительности труда. Принято считать, что при увеличении шума на каждые 1...2 дБ (дБА) сверх нормативных значений производительность труда снижается на 1 %.

Степень вредного воздействия шума зависит от его интенсивности, спектрального состава, времени воздействия, местонахождения человека, характера выполняемой им работы и индивидуальных особенностей человека. Шум, уровень которого составляет 35...40 дБА, в ночное время является серьезным беспокоящим фактором при нахождении человека в квартире. Шум при уровне 50...60 дБА создает ощутимую нагрузку на нервную систему, особенно если человек занимается умственной деятельностью. Шум с уровнем выше 70 дБА вызывает физиологическое воздействие, а при 85...90 дБА может привести к ухудшению слуха.

Установлена прямая зависимость между числом нервных заболеваний и возрастающим уровнем городского шума. Вредное действие на человека оказывает инфразвук, который воспринимается слуховой и тактильной чувствительностью. При уровне звукового давления более 100 дБ на частотах 2...5 Гц происходит осязаемое движение барабанных перепонки, появляются головная боль, затрудненное глотание. При повышении уровня шума до 125...137 дБ на указанных частотах могут возникать вибрация грудной клетки, летаргия.

Установлено, что инфразвук с частотами 15...20 Гц вызывает чувство страха. Инфразвук неблагоприятно действует на вестибулярный аппарат и приводит к уменьшению слуховой чувствительности. Так как волны инфразвуковых колебаний имеют большую длину, отрицательное воздействие их на организм человека проявляется на значительных расстояниях от источника.

Производственный и бытовой шум вызывают усталость, раздражение, снижают трудоспособность, сосредоточенность, внимание и т. п.

При длительном воздействии техногенных шумов возникают бессонница, расстройство органов пищеварения, нарушение вкусовых ощущений и зрения, повышаются нервозность, раздражительность и т. п. При воздействии интенсивных шумов (взрыв, ударная волна и т. д.) с уровнем звука до 130 дБ возникает болевое ощущение, а при уровнях звука более 140 дБ происходит поражение слухового аппарата. Предел переносимости интенсивного шума определяется величиной 154 дБ. При этом появляются удушье, сильная головная боль, нарушение зрительных восприятий, тошнота и т. д.

В связи с тем что шум является вредным, а в ряде случаев и опасным производственным фактором, предельно допустимые уровни для шумов разных видов сравнивают с эквивалентными уровнями непрерывных шумов. Предельно допустимые дозы в зависимости от продолжительности воздействия приведены ниже.

Продолжительность воздействия, ч	8	4	2	1	0,5	0,25	0,12	0,02	0,01
---	---	---	---	---	-----	------	------	------	------

Предельно допустимые дозы (по шкале А), дБ	90	93	96	99	102	105	108	117	120
---	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Предельные уровни шума в некоторых частотных интервалах составляют:

Частота, Гц	1...7	8...11	12...20	20...100
Предельные уровни шума, дБ	150	145	140	135

2.4. НОРМИРОВАНИЕ ШУМА

Принятые в нашей стране нормы шума основываются на спектральной и интегральной оценках, хотя за рубежом применяются нормы, устанавливающие предельные уровни звука в акустических децибелах.

Для оценки степени шумового загрязнения окружающей природной среды необходимо знать как реальный шумовой фон, так и допустимый уровень шумов, установленных СН 2.2.4/2.1.8.562—96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». В соответствии с этими нормами суммарный, фактический шум, создаваемый различными техногенными источниками, не должен превышать допустимых уровней шума.

Применительно к производственной среде разработан ГОСТ 12.1.003—83 «Шум. Общие требования безопасности», который устанавливает классификацию шума, характеристики и допустимые уровни шума на рабочих местах, общие требования к защите от шума на рабочих местах, к шумовым характеристикам машин, механизмов, средств транспорта и другого оборудования (далее — машин) и измерениям шума. Стандартом установлены уровни звукового давления и эквивалентные уровни звука на рабочих местах производственных предприятий в зависимости от тяжести и напряженности труда в диапазоне частот 63...8000 Гц, а также максимальные уровни звукового давления в функции частоты, ниже которых воздействие шума можно считать безопасным. При этом исходят не из комфортных условий труда, а из условий, при которых вредное действие шума незначительно.

В соответствии с Санитарными нормами характеристикой постоянного шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в децибелах в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, определяемые по формуле, аналогичной (2.4):

$$L_p = 20 \lg p_a/p_0,$$

где p_a — среднеквадратичная величина звукового давления, Па; p_0 — исходное значение звукового давления в воздухе, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

В качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах допускается принимать уровень звука (в дБА), измеренный на временной характеристике «Медленно» шумомера:

$$L_A = 20 \lg p_A/p_0,$$

где p_A — среднеквадратичная величина звукового давления с учетом коррекции «А» шумомера, Па.

Характеристикой непостоянного шума на рабочих местах является эквивалентный (по энергии) уровень звука (в дБА). Под эквивалентным (по звуковой энергии) уровнем звука $L_{w_{\text{экв}}}$ непостоянного шума понимается уровень звука постоянного широкополосного шума, имеющего то же среднеквадратичное звуковое давление, что и данный непостоянный шум в течение определенного интервала времени.

За максимальный уровень интенсивности звука $L_{J_{\text{max}}}$ принят уровень интенсивности звука, соответствующий максимальному показанию шумомера в течение 1 % времени измерения.

Таблица 2.2. Допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, лабораторий для теоретических работ	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Помещения управления, рабочие комнаты	93	79	70	68	58	55	52	50	49	60
Кабины наблюдений и дистанционного управления:										
без речевой связи по телефону	103	94	87	82	78	75	73	71	70	80
с речевой связью по телефону	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
Помещения и участки точной сборки, машинописные бюро	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
Помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, для размещения шумных агрегатов, вычислительных машин	107	94	87	82	78	75	73	71	70	80
Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях и на территории предприятий	110	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Таблица 2.3. Нормы допустимых уровней звука в жилой застройке

Территории	Допустимые УЗД, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими значениями, Гц								Допустимые УЗ и эквивалентные УЗ, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Непосредственно прилегающие к зданиям больниц, санаториев	59	48	40	34	30	27	25	23	35
Непосредственно прилегающие к жилым домам (2 м от ограждающих конструкций), площадки отдыха	67	57	49	44	40	37	35	33	45
Жилые помещения	55	44	35	29	25	22	20	15	30

Примечание. Нормы приведены для ночного времени (с 23.00 до 07.00 ч), для дневного времени (с 7.00 до 23.00 ч) принята поправка +10дБ (дБА).

При измерениях уровни звука разбивают на поддиапазоны до 5 дБА. Каждый поддиапазон характеризуется средним значением L_j^i . Тогда $L_{j_{\text{экв}}}$ определяют по формуле

$$L_{j_{\text{экв}}} = 10 \lg \left(\frac{1}{100} \sum_{i=1}^n t_i 10^{0,1 L_j^i} \right),$$

где L_j^i — уровень звука поддиапазона i , дБА; n — число поддиапазонов; t_i — относительное время действия шума поддиапазона L_j^i (в процентах от времени измерения).

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах разработаны с учетом напряженности и тяжести трудовой деятельности (табл. 2.2). Шумы, создаваемые городским транспортом, нормируются ГОСТ 27436—87.

Предельные значения уровня звука (УЗ) различны для различных сред обитания человека. Нормируемыми параметрами постоянного шума в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки являются уровни звукового давления L_p , дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. Для ориентировочной оценки допускается использовать уровни звука L_A , дБА.

Нормируемыми параметрами непостоянного шума в жилой застройке являются эквивалентные (по энергии) уровни звука $L_{A_{\text{экв}}}$, дБА, и максимальные уровни звука $L_{A_{\text{max}}}$, дБА.

Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука проникающего шума в помещения жилых и общественных зданий и шума на территории жилой застройки приведены в табл. 2.3.

2.5. АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Необходимость проведения мероприятий по снижению шума, производимого эксплуатируемыми источниками, определяется на основании измерений соответствующих уровней L_p , $L_{A_{\text{экв}}}$, $L_{A_{\text{max}}}$ и сравнения их с допустимыми по нормам. Для проектируемых объектов необходимость таких мероприятий может быть определена только на основании акустического расчета, включающего:

- выявление источников шума и определение их шумовых характеристик;
- выбор расчетных точек (РТ) акустического расчета и определение для них допустимых уровней звукового давления (УЗД);

- определение ожидаемых УЗД в расчетных точках до осуществления мероприятий по снижению шума;
- определение требуемого снижения УЗД в расчетных точках;
- выбор мероприятий для обеспечения требуемого снижения УЗД;
- расчет и проектирование шумоглушащих, звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций (глушители, экраны, звукопоглощающие облицовки и т. п.).

При акустических расчетах для источников, излучающих шум в окружающую среду, РТ выбирают на расстоянии 2 м от плоскости окон ближайших жилых или общественных зданий. На территории жилых микрорайонов, больниц и санаториев, школ, детских садов РТ выбирают на расстоянии 2 м от границ территории на высоте 1,2 м от поверхности земли.

Практика шумозащиты зачастую требует определения УЗД в замкнутом объеме (помещении) и в свободном пространстве (отсутствуют отражающие поверхности).

До осуществления мероприятий по снижению шума для выбранных РТ при известных источниках шума (ИШ) и их шумовых характеристиках определение ожидаемых уровней звукового давления производится в зависимости от их взаимного расположения. Источники шума могут находиться в открытом пространстве на территории предприятия или городской застройки, в помещениях, каналах аэрогазодинамических установок, а расчетные точки — на территориях или помещениях жилых и общественных зданий.

При выполнении акустических расчетов допустимые уровни звукового давления $L_{p\text{доп}}$ в расчетных точках определяют по формуле

$$L_{p\text{доп}} = L_{p_n} + \sum_{i=1}^n \Delta_i,$$

где L_{p_n} — нормативный УЗД; $\sum_{i=1}^n \Delta_i$ — сумма поправок.

Для определения ожидаемых УЗД применяют энергетический метод расчета, при котором рассматривается распространение звуковой энергии от источника до РТ с определением в ней интенсивности звука и соответствующих уровней. Отметим, что уровень интенсивности звука L_J связан с уровнем звукового давления L_p зависимостью

$$L_J = L_p + 10 \lg \frac{\rho_0 c_0}{\rho c} = L_p + \Delta L_a,$$

где $\rho_0 c_0$ — удельное акустическое сопротивление воздуха, равное $410 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ при нормальных атмосферных условиях ($T = 293 \text{ К}$ и $p_{\text{ст}} = 1034 \text{ кПа}$); ρc — то же, при данных условиях (ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; c — скорость звука в нем, $\text{м}/\text{с}$); ΔL_a — поправка на атмосферные условия.

Если данные атмосферные условия соответствуют нормальным, то $L_f = L_p$. В расчетах, проводимых далее, поправкой ΔL_a можно пренебречь ввиду ее малости и считать, что это равенство выполняется.

Расчет шума в открытом пространстве. Сначала рассмотрим общий случай (рис. 2.6), когда в окружающую среду, где расположена расчетная точка, происходит излучение шума звуковой мощностью Φ , Вт. Интенсивность звука J в РТ будет равна:

$$J = \frac{\varphi \Phi}{kS}. \quad (2.6)$$

Здесь φ — фактор направленности излучения шума; k — коэффициент, в общем виде учитывающий уменьшение интенсивности звука на пути его распространения за счет затухания в воздухе и наличия каких-либо преград; S — площадь, на которую распределяется звуковая энергия, м^2 .

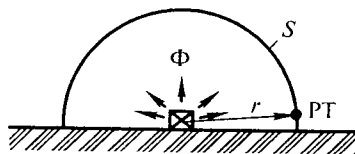
В общем случае $S = \Omega r^2$, где Ω — пространственный угол излучения звука, равный 4π для источников и мест излучения шума, расположенных в пространстве, 2π — на поверхности территории или ограждающих конструкций зданий и сооружений и π — в двугранном углу, образованном конструкциями зданий и поверхностью территории.

Разделив левую и правую части уравнения (2.6) на исходное значение интенсивности звука J_0 и прологарифмировав их, получим выражение для уровня интенсивности звука с учетом ожидаемого уровня звукового давления в РТ:

$$L_p = L_p^{\text{изл}} + 10 \lg \varphi - 10 \lg \Omega - 20 \lg r - \Delta L_p^{\text{оп}}, \quad (2.7)$$

где $L_p^{\text{изл}}$ — уровень звуковой мощности (УЗМ) шума, излучаемого в окружающую среду; $\Delta L_p^{\text{оп}}$ — снижение УЗМ на пути распространения шума в открытом пространстве.

По формуле (2.7) УЗД спадает (затухает) на 6 дБ при каждом удвоении расстояния из-за геометрического расширения области, в которой распространяется звук.



Р и с. 2.6. Расчет шума в открытом пространстве

При отсутствии препятствий и небольших (до 50 м) расстояниях $\Delta L_p^{\text{оп}}$ равно нулю. При больших расстояниях становится заметным затухание звука в воздухе, особенно на высоких частотах. В этих случаях $\Delta L_p^{\text{оп}} = \beta_a r / 1000$, где β_a — затухание звука в атмосфере, принимаемое по следующим данным:

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
β_a , дБ/км	0	0,7	1,5	3	6	12	24	48

Наличие ветра и растительности, характер рельефа земной поверхности и другие факторы влияют на значение $\Delta L_p^{\text{оп}}$, увеличивая его или уменьшая. Выражение (2.7) получено для условий свободного распространения звука, т. е. без влияния отражений от близко расположенных зданий и сооружений. В реальных условиях, особенно в городской застройке, спад уровня звукового давления происходит медленнее, чем по закону квадрата расстояния, поэтому при расположении РТ среди зданий нужно брать не 20, а $15 \lg r$.

Рассмотрим конкретные случаи расчета, наиболее часто встречающиеся на практике. Уровни звукового давления в РТ во всех случаях определяют по формуле (2.7) с подстановкой соответствующих значений $L_p^{\text{изл}}$ и ϕ .

1. Источник шума (один или несколько) установлен на поверхности земли на определенном расстоянии r от РТ. Шум от него излучается непосредственно в окружающую среду. В данном случае $L_p^{\text{изл}} = L_p$. Величина ϕ берется из паспортных характеристик машины, механизма. Для источников шума с равномерным излучением звука $\phi = 1$. Для осевых и центробежных вентиляторов, открытые всасывающие или выхлопные отверстия которых направлены в сторону РТ, $\phi = 2$.

2. Шум источника аэродинамического происхождения (вентилятор, компрессор и т. д.) распространяется по каналам (трубопроводам) и излучается в атмосферу через выходные (выхлопные или воздухозаборные) отверстия. В этом весьма распространенном случае $L_p^{\text{изл}} = L_p - \Delta L_{p_k}$ (L_p — УЗМ источника шума, излучаемого в сторону выходного отверстия; ΔL_{p_k} — снижение УЗМ при распространении звука по каналам от источника до выходного отверстия).

Необходимо различать понятия: требуемое снижение шума в РТ и требуемое снижение шума источника. Во всех случаях расчета или измерений требуемое снижение шума $\Delta L_{\text{тр}}$ в РТ определяют как раз-

ность между ожидаемыми УЗМ, рассчитанными по формуле (2.7), или измеренными L_p и допустимыми $L_{\text{доп}}$ уровнями, рассчитанными по формуле

$$\Delta L_{\text{тр}} = L_p - L_{\text{доп}}. \quad (2.8)$$

Значение требуемого снижения шума непосредственно в источнике или на пути его распространения зависит от числа источников шума и требуемого снижения шума в РТ. При действии одного источника его шум должен быть снижен на величину $\Delta L_{\text{тр}}$, определяемую по формуле (2.8), а шум одного из нескольких одинаковых источников, удаленных от РТ на примерно равные расстояния, по формуле

$$\Delta L_{\text{тр}} = L_i - L_{\text{доп}} + 10 \lg n,$$

где $L_i = L_p$.

На практике часто встречаются случаи попадания шума в РТ от разных источников, расположенных от нее на различных расстояниях. Применительно к действующим предприятиям и эксплуатируемому оборудованию требуемое снижение шума каждого источника может быть определено измерением УЗД, создаваемого при одиночной работе (остальные источники отключаются), сравнивая его с допустимыми уровнями. При таких измерениях выявляют наиболее шумные источники, шум которых нужно снижать в первую очередь.

Расчет шума в помещении. Шум в расчетной точке замкнутого объема (рис. 2.7) определяется свойствами пространства (распире-

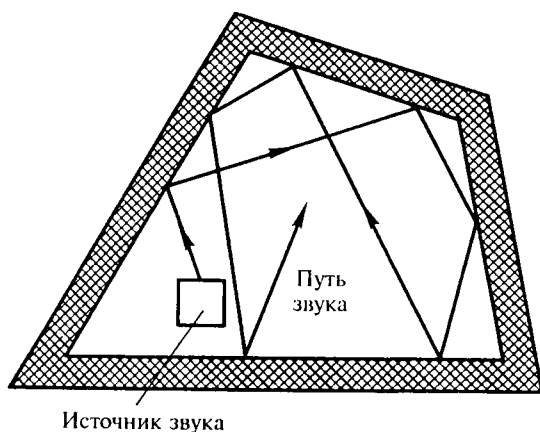


Рис. 2.7. Распространение шума в помещении

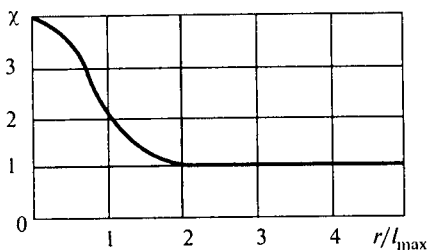


Рис. 2.8. Зависимость коэффициента χ от отношения расстояния r к максимальному линейному размеру источника $l_{\max}$

нием области распространения звука по мере удаления от источника) и помещения (отражением от ограждающих поверхностей).

Шум в замкнутом объеме в общем случае определяется по формуле

$$L_{\text{пом}} = L_p + 10 \lg \left(\frac{\chi \varphi}{\Omega r^2} + \frac{4\psi}{B_{\text{пом}}} \right),$$

где χ — коэффициент, учитывающий размеры источника шума (рис. 2.8); φ — фактор направленности источника звука (для ненаправленных источников $\varphi = 1$), определяемый экспериментально; ψ — коэффициент, учитывающий характер звукового поля в помещении (рис. 2.9); r — расстояние от источника шума до расчетной точки, м; $B_{\text{пом}}$ — акустическая постоянная помещения, м^2

$\left(B_{\text{пом}} = \frac{\bar{\alpha}_{\text{пом}} S_{\text{огр}}}{1 - \bar{\alpha}_{\text{пом}}} \right)$; $\bar{\alpha}_{\text{пом}}$ — средний коэффициент звукопоглощения в помещении $\left(\bar{\alpha}_{\text{пом}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{S_{\text{огр}}} \right)$; α_i — коэффициент звукопоглощения ограждающей поверхности помещения (берется по справочным данным) площадью S_i , м^2 ; $S_{\text{огр}}$ — суммарная площадь поверхностей, ограждающих помещение, м^2 .

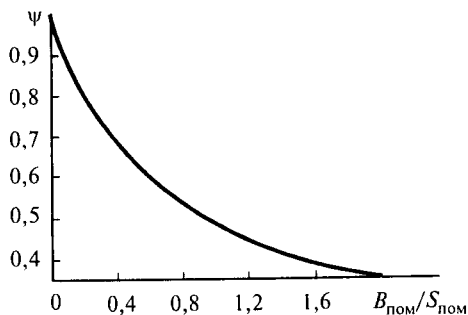


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента ψ от отношения акустической постоянной помещения $B_{\text{пом}}$ к его площади $S_{\text{пом}}$

Если шум проникает в помещение через ограждающую конструкцию (стена, перекрытие, окно и т. д.) или через открытый проем, то уровни звуковой мощности шума, прошедшего через преграду, определяются формулой

$$L_{p_{np}} = L_{огр} + 10 \lg S_{огр} - ЗИ - \delta,$$

где $L_{огр}$ — октавные уровни звукового давления у преграды на расстоянии 2 м от центра, дБ; $S_{огр}$ — площадь ограждения (преграды), м²; ЗИ — звукоизоляция ограждения, дБ (для проема ЗИ = 0); δ — поправка на характер падения звука ($\delta = 0$ при падении из атмосферы, $\delta = 6$ дБ при падении из помещения).

При распространении звука в больших помещениях, имеющих сравнительно высокий коэффициент звукопоглощения, уровень шума значительно снижается по мере удаления от источника (на 6 дБ при каждом удвоении расстояния от источника). Однако в обычных акустически не обработанных помещениях звук отражается от ограждающих поверхностей. Поэтому уже на некотором расстоянии от источника звука, за так называемой зоной прямого звука, общее количество звуковой энергии возрастает за счет энергии отраженных волн. Количество отраженной энергии определяется полным звукопоглощением помещения A . Звукопоглощение и площадь помещения определяет применяемый в практических расчетах средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ в интервале частот от 100 до 4000 Гц (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Коэффициент звукопоглощения для помещений

Помещения	$\bar{\alpha}$
Обычное производственное	0,05
Производственное, в котором присутствует много лиц из подсобного персонала	0,1
Насыщенное станками без специальных средств поглощения, но с большим количеством работающих	0,15
Слегка заглушенное	0,25
Хорошо заглушенное	0,4

С учетом одновременного воздействия прямого и отраженного звука интенсивность в исследуемой точке M помещения

$$J_M = \frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4\Phi}{A}(1 - \bar{\alpha}),$$

где r — расстояние от источника звука (вентиляционной решетки), м;
 A — полное звукопоглощение помещения.

Уровень интенсивности звука, дБ, в исследуемой точке

$$L_M = L_P + 10 \lg \left(\frac{1}{\Omega r^2} + \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{A} \right).$$

Эту формулу можно записать в следующем виде:

$$L_M = L_P + 10 \lg \left(\frac{1}{\Omega r^2} + \frac{4}{B_{\text{пом}}} \right). \quad (2.9)$$

Пример 2.3. Определить уровень шума, создаваемого в помещении при работе вентилятора, отсасывающего пыль от шлифовального станка. Пыль удаляется из-под кожуха над шлифовальным кругом. Полное звукопоглощение помещения, где установлен станок, составляет 10 м^2 . Средний коэффициент звукопоглощения помещения $\bar{\alpha} = 0,05$. Уровень звуковой мощности вентилятора 100 дБ. Затухание шума в каналах равно 20 дБ. В соответствии с выражением (2.9) и с учетом затухания шума в каналах уровень шума на расстоянии 1 м при излучении звуковой энергии в телесный угол π

$$L_M = 100 - 20 + 10 \lg \left(\frac{1}{3,14} + \frac{4}{10} \right) = 65 \text{ дБ}.$$

2.6. РАСЧЕТ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ИСТОЧНИКОВ

Для правильного выбора методов защиты от шумов различных промышленных установок необходимо знать их шумовые характеристики. Всякое неламинарное течение газа, как правило, сопровождается аэродинамическими шумами, являющимися основными составляющими общего шума компрессоров, газовых турбин, воздуходувок, вентиляторов, двигателей внутреннего сгорания и т. п.

Основная частота шумов, возникающих вследствие неоднородности потока газа, периодически выпускаемого в атмосферу (турбины, вентиляторы, ротационные воздуходувки, сирены и т. п.), обусловлена скоростью вращения ротора. Шумы, имеющие такую при-

роду возникновения, называются шумами вращения, их частота определяется по формуле $f_1 = nz/60$, где n — число оборотов диска в минуту; z — число отверстий в диске или лопаток на роторе.

Высшие гармоники f_i кратны частоте основного тона: $f_i = i f_1$, где $i = 2, 3, 4, \dots, n$.

Акустическая мощность такого шума $\Phi \approx k n^4 D^4 \psi \Omega \gamma$, где k — коэффициент, зависящий от типа излучателя; n — число оборотов в единицу времени; D — диаметр ротора; ψ — коэффициент, зависящий от свойств среды, в которую происходит излучение; Ω — телесный угол, в который происходит излучение; γ — коэффициент направленности источника.

Вентилятор. Нет ни одной отрасли промышленности, где не применялись бы вентиляторы для санитарно-гигиенических или технических нужд. Создаваемый ими шум, передаваясь по вентиляционным каналам, может явиться причиной нарушения нормальных условий труда.

Возникновение вихрей при обтекании воздушным потоком деталей вентилятора и периодический срыв их образует звуковые волны, которые создают вихревой шум. Кроме того, возникает так называемый шум от препятствия или неоднородности потока. Причиной этого рода шума могут стать местные неоднородности струи на входе и выходе из вентилятора, а также турбулентные пульсации воздуха, поступающего в вентилятор.

Кроме указанных причин шумообразования при работе вентиляторов образуется так называемый шум вращения, особенно сильный у осевых вентиляторов. При работе центробежных вентиляторов иногда возникает низкочастотный шум характерного тембра, называемый помпажным.

Следовательно, источниками шума в вентиляционных системах являются вентилятор, двигатель, воздухопроводы. Шум распространяется по воздуху, заключенному в воздухопроводах, по стенкам воздухопроводов и строительным конструкциям, где расположены элементы вентиляционной системы. Таким образом, шум проникает в различные помещения производственного здания, которые могут находиться довольно далеко от вентиляционной камеры.

Вентиляционная система может передавать звуковую энергию также из одного помещения в другое по воздухопроводам. При этом шум может попадать в помещение или через вентиляционные отверстия (приточные или вытяжные решетки), или просто через стенки каналов.

Шум, возникающий в вентиляторе, складывается из аэродинамического и механического шумов. Колебания конструкции вентилятора являются причиной возникновения механического шума, который обычно имеет ударный характер (удары шариков и роликов по обойме в подшипниках качения, стуки в зазорах, удары в редукторе, приводе и т. п.).

Наличие высокочастотных составляющих в механическом шуме при малых окружных скоростях приводит к увеличению субъективного ощущения механического шума по сравнению с аэродинамическим шумом той же интенсивности.

Шум, создаваемый центробежными и осевыми вентиляторами, при прочих неизменных условиях зависит от окружной скорости, причем с увеличением последней возрастает аэродинамическая составляющая шума. При этом звуковая мощность вентилятора пропорциональна шестой степени окружной скорости. Окружная скорость, м/с, вентилятора

$$u = \frac{\pi D n}{60},$$

где D — диаметр колеса вентилятора, м; n — число оборотов колеса в минуту.

Уровень шума аэродинамического вентилятора, дБ, определяют по формуле

$$L = \bar{L} + 60 \lg n + 80 \lg D - 83,$$

где $\bar{L}$ — отвлеченный уровень шума, зависящий от типа вентилятора и режима его работы, дБ.

Физически отвлеченный уровень шума равен уровню шума, который производит вентилятор данного типа при диаметре колеса 1 м и окружной скорости 1 м/с в заданной точке безразмерной аэродинамической характеристики.

Безразмерная характеристика вентилятора строится в координатах

$$\bar{H} = \frac{H}{\rho u^2} \quad \text{и} \quad \bar{Q} = \frac{Q}{(\pi D^2/4)u},$$

где H — давление, развиваемое вентилятором, Па; Q — производительность вентилятора, м³/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Чтобы сравнить уровни шума, создаваемые вентиляторами различных типов при работе их на одну и ту же вентиляционную систему, используют так называемый критерий шумности (в дБ):

$$\tilde{L} = \bar{L} - 25 \lg(9,81H) - 10 \lg \bar{Q}.$$

Уровень звуковой мощности вентилятора

$$L_p = \tilde{L} + 25 \lg(9,81H) + 10 \lg \bar{Q} + 24.$$

Минимальное значение критерия шумности обычно соответствует максимальному КПД.

Для приближенного расчета шумовой характеристики любого вентилятора применяют формулу

$$\bar{L} = B + 20 \lg(1 - \eta) \bar{N},$$

где $\bar{L}$ — отвлеченный уровень вихревого шума вентилятора; B — величина, зависящая от типа вентилятора, характеристики сети и числа оборотов, дБ; η — КПД вентилятора; $\bar{N}$ — коэффициент мощности вентилятора, равный $\bar{Q}H/\eta$.

Величина B незначительно зависит от характеристики сети, поэтому шумовую характеристику данного вентилятора можно приближенно рассчитать для всех режимов, приняв B величиной постоянной.

Механический шум в вентиляторах носит ударный характер вследствие ударов в редукторе, подшипниках, зазорах из-за неуравновешенности вращающихся масс, вызванных плохой балансировкой. Эти удары передаются станине и кожуху вентилятора, усиливая шум в воздуховоде и окружающем пространстве.

Для определения уровня шума вентилятора, дБ, работающего на притоке или вытяжке, используют формулу

$$L_p = 50 + 25 \lg(9,81H) + 10 \lg Q, \quad (2.10)$$

где H — напор вентилятора, Па; Q — производительность вентилятора, м³/с.

Уровень звуковой мощности L_p , дБ, в октавной полосе шума, создаваемого вентиляторной установкой в воздуховоде, вычисляют по формуле

$$L_p = \tilde{L} + 20 \lg p_b + 10 \lg Q - \Delta L_1 + \Delta L_2 + \delta - 20,$$

где $\tilde{L}$ — критерий шумности, определяемый в зависимости от типа установки; p_b — полное давление, Па; Q — объемный расход воз-

духа в вентиляторе; m^3/c ; ΔL_1 — поправка для учета распределения звуковой мощности вентилятора по октавным полосам частот, дБ; ΔL_2 — поправка для учета акустического влияния присоединения воздуховода к вентилятору, дБ; δ — поправка, учитывающая режим работы вентилятора (от 0 до 4 дБ).

Акустическая мощность вентилятора энергетически складывается из целого ряда шумов: шум вращения, вихревой шум и шум пограничного слоя. Расчет уровня акустической мощности L_p вентилятора, дБ, производят по формуле

$$L_p = \bar{L} + 60 \lg u + 20 \lg D + \delta_1,$$

где $\bar{L}$ — отвлеченный уровень шума, зависящий от типа вентилятора и режима его работы, дБ; u — окружная скорость колеса вентилятора, подсчитанная по ее внешнему диаметру, м/с; D — диаметр колеса, м; δ_1 — постоянная, зависящая от атмосферных условий проведения исследований, дБ.

Компрессор. Компрессорные и вентиляторные установки являются самыми распространенными источниками шума. Шум, создаваемый компрессорными установками, — один из наиболее интенсивных в промышленности (достигает 105 дБ и выше). При работе стационарного компрессора распространение шума происходит в окружающую среду через всасывающие и выхлопные отверстия воздухопроводов. При наличии передвижных компрессорных станций с несколькими источниками для оценки уровня шумов используют значение уровня звука на расстоянии 1...7 м от станции.

Частотную характеристику уровней акустической мощности, дБ, излучаемой компрессорами, без учета потерь в воздуховодах определяют по эмпирической формуле

$$L_p = 90 \lg \frac{n}{60} + 10 \lg N + 10 \lg z, \quad (2.11)$$

где n — число оборотов вала в минуту; N — мощность на валу, кВт; z — количество цилиндров.

Для получения частотной характеристики уровня излучаемой компрессором акустической мощности следует к полученному значению L_p прибавить поправки Δ :

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Δ , дБ	0	-7	-8	-13	-15	-20	-25

Пример 2.4. Определить уровень акустической мощности на всасывании компрессора при $n = 500$ об/мин; $N = 100$ кВт; $z = 3$.

Решение. Подставляя данные в формулу (2.11), получим

$$L_p = 90 \lg \frac{500}{60} + 10 \lg 100 + 10 \lg 3 = 108 \text{ дБ.}$$

Далее находим уровень акустической мощности в функции частоты:

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень акустической мощности, дБ	108	101	100	95	93	88	83

Ниже приведены измеренные значения уровней акустической мощности компрессора у заборной шахты на стандартных звуковых частотах:

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровень акустической мощности, дБ	105	98	96	94	92	85	81

Некоторое расхождение результатов измерений и расчета можно объяснить затуханием акустической мощности в воздуховодах, которое не учитывается предлагаемой эмпирической формулой (2.11).

Для инженерных расчетов используют формулу, приближенно определяющую общий уровень акустической мощности, дБ, для газотурбинных компрессоров:

$$L_p = H + 10 \lg N, \quad (2.12)$$

где N — номинальная мощность газотурбинной установки, Вт. Для агрегатов газотурбинных установок, покрытых теплоизоляционным слоем, $H = 105$ дБ, а для агрегатов, свободных от теплозащитного слоя, $H = 113$ дБ.

Наиболее заметными в низкой области звукового диапазона являются роторные частоты, которые определяются как $n/60$, где n — количество оборотов в минуту. В высокочастотной области звукового диапазона преобладает так называемая лопаточная частота, которая определяется выражением $zn/60$, где z — количество лопаток на роторе.

Пример 2.5. Количество оборотов ротора центробежного компрессора равно 12 000, номинальная мощность — 10^5 Вт. Определить общий уровень акустической мощности компрессора, роторные и лопаточные частоты.

Решение. По формуле (2.12) общий уровень акустической мощности компрессора, покрытого теплозащитным слоем, $L_p = 105 + 10 \lg 10^5 = 155$ дБ.

Пиковые значения при наличии на колесе 50 лопаток будут: на верхней дискретной частоте $(12\,000 \cdot 50)/60 = 10\,000$ Гц; на нижней дискретной частоте $12\,000/60 = 200$ Гц.

Акустическая мощность тонального и вихревого шумов пропорциональна шестой степени скорости потока на входе в рабочее колесо. Акустическая мощность вихревого шума при постоянной скорости и безотрывном обтекании мало зависит от режима работы ступени центробежного компрессора.

Газовая струя. Турбулентный характер имеют шумы реактивного двигателя, возникающие при перемешивании газовых потоков, которые движутся с разными скоростями. Акустическую мощность свободной струи определяют по формуле

$$\Phi = k \frac{\rho_c^2 v^8}{\rho_0 c_0^5} D^2 \frac{1}{[(T_0/T_c) 0,6 + 0,4]^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный $2 \cdot 10^{-4}$; ρ_c — плотность потока свободной струи, кг/м³; ρ_0 — плотность неподвижной среды (воздуха), кг/м³; v — скорость потока, м/с; c_0 — скорость звука в неподвижном воздухе, м/с; D — диаметр сопла, м; T_0 — абсолютная температура окружающего воздуха, К; T_c — абсолютная температура струи, К.

Частоту вихревого шума определяют по формуле

$$f_v = \frac{Sh v}{d},$$

где Sh — число Струхала (критерий подобия); в случае обтекания газом плохо обтекаемых удлиненных тел $Sh = 0,14 \dots 0,24$; v — средняя скорость потока газа, м/с; d — диаметр трубопровода или сопла, м.

При сбросе сжатого воздуха на стендовых испытаниях турбореактивных двигателей (ТРД) возникает интенсивный шум, источником которого является высокоскоростная струя воздуха. Общий уровень звуковой мощности, дБ, в широком диапазоне частот оценивают по формуле:

$$L_p = 80 \lg v_c + 20 \lg \rho_c + 10 \lg S - K,$$

где v_c — скорость истечения газа из сопла, м/с; ρ_c — плотность струи в выходном сечении сопла, кг/м³; S — площадь поперечного сечения сопла, м²; K — величина, зависящая от температуры струи (для холодных струй $K = 57$ дБ, для ТРД $K = 44$ дБ).

Октавные уровни звуковой мощности, дБ,

$$L_p^f = L_p - \Delta L_p,$$

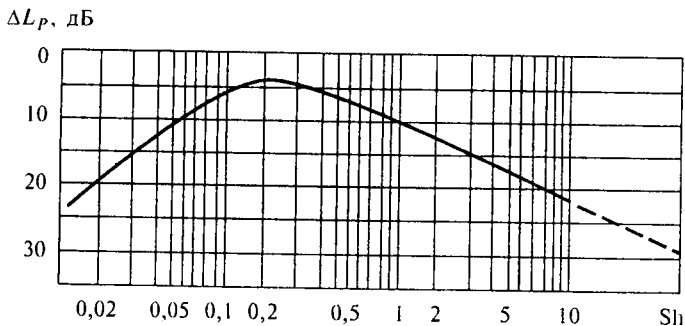


Рис. 2.10. Относительный спектр струи

где ΔL_p — отрицательная добавка к общему уровню, определяемая по графику, приведенному на рис. 2.10, в зависимости от числа Струхаля:

$$Sh = f_{cp} d_c / v_c,$$

где f_{cp} — среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц (63, 125...8000); d_c — диаметр сопла, м.

Газотурбинная установка (ГТУ). Интенсивный шум при работе ГТУ создается за счет всасывания и сброса воздуха через противопомпажные клапаны. При этом возникает тональный шум осевого компрессора с максимумом излучения в высокочастотной области спектра, дискретные составляющие которого вычисляют по формуле

$$f_i = \frac{izn}{60},$$

где i — номер гармоники ($i = 1, 2, 3...$); z — число лопаток рабочего колеса первой ступени компрессора; n — частота вращения ротора, об/мин.

Общая звуковая мощность $\Phi_{зв}$ шума, возникающего при всасывании дозвукового многоступенчатого осевого компрессора, определяется соотношением

$$\Phi_{зв} = 0,5 \left(\frac{1 - \eta_{ад}}{\eta_{ад}} \right)^2 \frac{m_i H_{ад}^2}{\rho v^3 D^2},$$

где $\eta_{ад}$ — адиабатический КПД первой ступени компрессора; m_i — массовый расход воздуха через компрессор, кг/с; $H_{ад}$ — адиабатический напор, Дж/кг; ρ — плотность воздуха на входе в компрессор, кг/м³; D — диаметр первой ступени компрессора, м; $v = 20,1\sqrt{T}$ — скорость звука в воздухе, м/с; T — температура воздуха, К.

2.7. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА

2.7.1. Основные направления защиты от шума

При разработке или выборе методов защиты окружающей среды от шумов принимается целый комплекс мероприятий, включающий:

- проведение необходимых акустических расчетов и измерений, их сравнение с нормированными и реальными шумовыми характеристиками;

- выбор соответствующего оборудования и оптимальных режимов работы;

- замену шумных источников и технологий на малозумные;

- изменение направленности излучения шума источником;

- снижение шума по пути распространения от источника до защищаемого от шума места;

- комплекс средств защиты от шума в шумном агрегате, транспортном средстве;

- архитектурно-планировочные меры в жилой застройке;

- организационные мероприятия;

- улучшение качества воспринимаемого звука;

- новые акустические технологии.

Перечисленные мероприятия (рис. 2.11) относятся к коллективным средствам защиты от шума, широко применяемым на промышленных предприятиях. Использование в той или иной степени этого комплекса мероприятий зависит от каждого конкретного случая.

Борьба с шумом на производстве и в окружающей среде — это комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий,



Рис. 2.11. Схема коллективной защиты от шума

систематически претворяемых в жизнь. Важное значение имеет планирование методов борьбы с шумом. Планированию должен предшествовать анализ условий с целью выявления наиболее вредных условий и источников возникновения шума.

Организационно-техническими мероприятиями, позволяющими существенно снизить уровень шума на производстве, являются: замена шумного оборудования менее шумным; размещение машин и агрегатов, производящих большой шум, в отдельных помещениях или в отдельных частях цеха со специальным ограждением; планирование времени работы шумного оборудования таким образом, чтобы в это время работало меньше людей; озеленение территории предприятия и прилегающей к ней местности.

Инженерные методы борьбы с шумом и вибрациями на промышленных предприятиях сводятся к следующему: уменьшение шума и вибрации в источниках их возникновения; применение звукоизолирующих конструкций и звукопоглощающих материалов или локализация шумного оборудования в специально выделенных и огражденных местах; использование виброизолирующих устройств и вибропоглощающих материалов, различного рода глушителей струйных шумов и др.

Выявление источников и причин возникновения шума должно быть совмещено с регистрацией и изучением его спектра. Только опираясь на исследования амплитудно-частотных характеристик, можно наметить и провести в жизнь технические мероприятия, направленные на устранение причин возникновения шума.

Снижение шума в источнике его возникновения. Замена шумных источников на малошумные едва ли не самая кардинальная мера борьбы с шумом. Причинами высоких уровней шума машин и агрегатов могут быть:

- конструктивные особенности машины, в результате которых возникают удары и трения узлов и деталей: например, удары толкателей о штоки клапанов, работа кривошипно-шатунных механизмов и зубчатых колес;
- технологические недостатки, появившиеся в процессе изготовления оборудования, к которым могут быть отнесены: плохая динамическая балансировка вращающихся деталей и узлов, неточное выполнение шага зацепления и формы профиля зуба зубчатых колес (даже ничтожно малые отклонения в размерах деталей машин отражаются на уровне шума);
- некачественный монтаж оборудования на производственных площадях, который приводит к перекосам и эксцентриситету работающих деталей и узлов машин;

- нарушение правил технической эксплуатации машин и агрегатов — неправильный режим работы оборудования, т. е. режим, отличающийся от номинального (паспортного), плохой уход за станочным парком и др.;

- несвоевременное и некачественное проведение планово-предупредительного ремонта, которое приводит не только к ухудшению качества работы механизмов, но и способствует увеличению производственного шума; своевременный и качественный ремонт, замена износившихся деталей оборудования препятствуют увеличению перекосов и люфтов в движущихся частях механизмов, а следовательно, повышению уровня шума на рабочих местах;

- несовершенные в отношении шумового режима отдельные технологические процессы, например сбрасывание металлических деталей, которое должно быть заменено спуском их по направляющим, выполненным из материала, не производящего шума, замена пневматической клепки гидравлической или сваркой и т. п.

Снижение шума в источнике его возникновения заключается в качественном монтаже машин и агрегатов, правильной эксплуатации оборудования, станочных приспособлений и инструмента, могущих создавать шум в процессе работы, и т. п. Например, замена двигателя внутреннего сгорания на электродвигатель существенно снижает внешний шум автомобилей, строительных машин и др. Электромобиль на 15...20 дБА менее шумен, чем автомобиль с дизельным двигателем. Примером удачного использования малозумной технологии можно считать погружение свай бурением, что позволяет снизить шум по сравнению с вибропогружением или ударным погружением на 30...40 дБА. Шум, генерируемый шинами автомобиля при движении, может быть снижен на 3...4 дБА при замене асфальтового покрытия на специальные покрытия с содержанием резины. Шум при качении колеса по рельсам можно ослабить на 8...10 дБА, снизив волнообразный износ рельсов путем их шлифования.

В общем случае ослабление шума обеспечивается уменьшением силового воздействия в источнике или звукоизлучающей способности элементов источника шума. Если борьба с шумом в его источнике не приносит ощутимых результатов, необходимо проводить специальную модернизацию оборудования, заключающуюся в ликвидации замеченных дефектов машины, служащих источниками вибраций с целью устранения генерации шума.

Все способы модернизации оборудования, уменьшающие уровни шума, указать невозможно, их очень много. Они определяются

типом оборудования, требованиями к величине допускаемого уровня шума на рабочих участках, производственными возможностями и т. п. В частности, сюда могут быть отнесены:

- изменение упругости или массы отдельных конструктивных элементов машин с целью изменения собственных частот колебаний, что даст возможность вывода их из состояния резонанса;

- обеспечение плотного прилегания в местах связи сопрягаемых деталей путем использования амортизирующих материалов (резина, асбест, картон, пробка и т. п.) или пружинных амортизаторов, а также применения рациональных способов крепления отдельных элементов к корпусу машины;

- замена металлов материалами типа пластмассы, текстолита, фибролита и т. п., хромирование, а также покрытие поверхности деталей различного рода лаками и красками;

Модернизация оборудования, как правило, увеличивает срок службы машин и улучшает их технико-эксплуатационные данные.

Изменение технологического процесса с целью уменьшения уровня шума на рабочем участке должно рассматриваться как один из возможных путей создания нормальных производственных условий.

Снижение шума на пути его распространения. Для снижения шума на пути распространения используют два принципа: защита расстоянием, которое обеспечивает затухание звука в пространстве, и установка на пути распространения сооружений, которые отражают звук. В частности, при удвоении расстояния от точечного источника звука, например, со 100 до 200 м или с 500 до 1000 м, шум уменьшается на 6 дБА. Если источник шума протяженный, линейный, то на расстояниях, сравнимых с его длиной, действует закон снижения шума на 3 дБА при удвоении расстояния.

Основными конструкциями, снижающими шум на пути от источника до защищаемого объекта (жилого района), являются акустические экраны (АЭ) или иные сооружения, которые могут дать экранирующий эффект, например дома, стенки, выемки, зеленые насаждения (рис. 2.12, а—г).

Принцип работы акустического экрана основан на создании зоны звуковой тени за ним в результате частичного отражения звука от его поверхности. Эффективность АЭ или экранирующего сооружения ухудшается из-за огибания (дифракции звуковых волн) препятствия между источником звука и защищаемым от шума объектом. Дифракция возрастает с увеличением длины звуковой волны и снижается при увеличении размеров АЭ. Эффективность экранирующих сооружений ориентировочно составляет (в зависимости от разме-

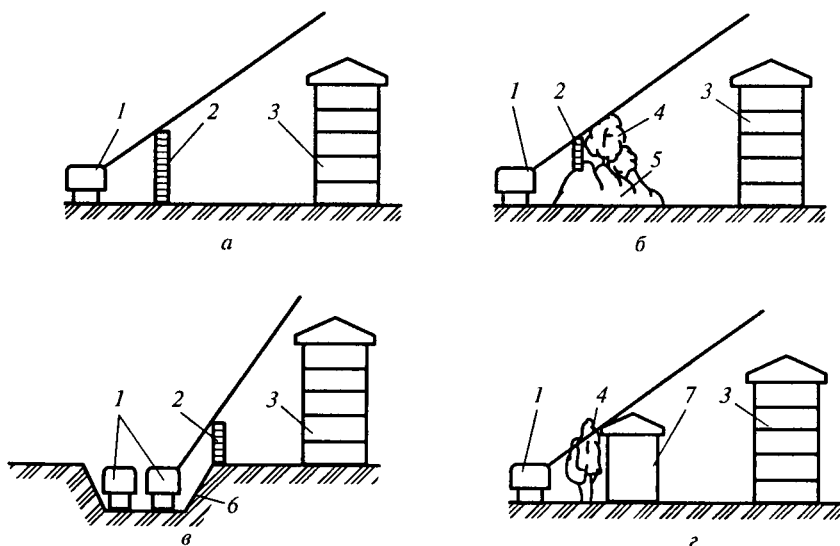


Рис. 2.12. Экранирующие сооружения для защиты от шума на пути его распространения:

- 1 — источник шума; 2 — акустический экран; 3 — защищаемое здание;
 4 — зеленые насаждения; 5 — насыпь; 6 — выемка;
 7 — вспомогательное здание-экран

ров и других особенностей): АЭ и насыпи — 5...15 дБА; зеленых насаждений — 3...8; выемки — до 25...30; зданий-экранов — 15...20 дБА.

Акустические экраны устанавливают вдоль автодорог, железнодорожных магистралей, вблизи аэропортов. Длина АЭ, установленных в США, Германии, Японии, Швейцарии, Италии, Франции и других странах, достигает десятков тысяч километров. Их изготавливают из бетона, стекла, древесины, металла, пластика, старых покрышек и других материалов высотой (в зависимости от назначения и места установки) от 2...4 м (автодороги) до 20...25 м (аэропорты).

Шумовиброзащитные конструкции. Все средства шумозащиты от работы источников механического, аэродинамического, электромагнитного, ударного, гидродинамического шума можно свести к трем основным принципам действия: отражение, поглощение звука (вибрации) или комбинированные. По принципу действия средств шумозащиты выделяют:

звукоизоляцию — основана на отражении звуковых волн от плоской массивной протяженной преграды. Этот метод уменьшения шума предполагает изоляцию источника и сооружение вок-

руг него ограждений с высокой звукоизоляцией. Источником шума может быть как отдельная машина, так и шумный производственный участок. Основные звукоизолирующие конструкции — звукоизолирующие капоты (кожухи), перегородки, кабины;

звукопоглощение — основано на поглощении звуковых волн при их падении на плоскую, мягкую, пористую или волокнистую поверхность. Этот метод основывается на свойствах материалов и конструкций трансформировать звуковую энергию в тепловую.

Уменьшить интенсивность шума на рабочих местах можно установкой звукопоглощающих конструкций близ источника шума или рабочего места. Основная конструкция — звукопоглощающая облицовка в замкнутых объемах (помещениях, капотах и т. д.).

Глушители шума также основаны или на отражении звуковой энергии (реактивные), или на поглощении (абсорбционные), или на их комбинации (комбинированные).

Архитектурно-планировочные меры защиты от шума. В современном градостроительстве накоплен целый комплекс архитектурно-планировочных методов снижения шума в жилой застройке. К их числу следует отнести приемы, способствующие как снижению шума, так и повышению звукоизолирующей способности ограждающих конструкций зданий и сооружений. Для реализации первого направления наряду с уже упомянутыми акустическими экранами, зелеными насаждениями, расположением транспортных потоков в выемках используют шумозащитные дома, в которых приняты меры по уменьшению воздействия шума от транспортного потока (на транспортную магистраль выходят окна нежилых помещений), а сам дом располагается по отношению к шумной магистрали так, чтобы за ним образовывалась зона акустической тени. Такие дома позволяют снизить шум на 15...20 дБА.

Еще в стадии проектирования производств необходимо обеспечить условия, затрудняющие распространение шума как на территории предприятия, так и в окружающей его местности.

Между жилыми массивами и шумным производством должны располагаться санитарно-защитные зоны (СЗЗ) с кустарниками, насаждаемыми близ предприятия, и деревьями — у жилого массива. Минимальные расстояния шумных производств от жилой застройки указаны в Санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200—03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»).

Территория санитарно-защитной зоны предназначена для снижения уровня воздействия до требуемых гигиенических нормативов по всем факторам воздействия за ее пределами; создания санитарно-защитного барьера между территорией предприятия (группы предприятий) и территорией жилой застройки; организации дополнительных озелененных площадей, обеспечивающих экранирование, ассимиляцию и фильтрацию загрязнителей атмосферного воздуха и повышение комфортности микроклимата.

Ширину санитарно-защитной зоны устанавливают с учетом санитарной классификации, результатов расчетов ожидаемого загрязнения атмосферного воздуха и уровней физических воздействий, а для действующих предприятий — и натурных исследований

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200—03 для предприятий, производств, объектов, их отдельных зданий и сооружений с технологическими процессами, являющимися источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека, в зависимости от мощности, условий эксплуатации, характера и количества выделяемых в окружающую среду загрязняющих веществ, создаваемого шума, вибрации и других вредных физических факторов, а также с учетом предусматриваемых мер по уменьшению неблагоприятного влияния их на среду обитания и здоровье человека устанавливаются следующие размеры санитарно-защитных зон: для предприятий I класса — 1000 м; II класса — 500; III класса — 300; IV класса — 100; V класса — 50 м.

Для автомагистралей, линий железнодорожного транспорта и метрополитена устанавливаются санитарные разрывы, определяемые минимальным расстоянием от источника вредного воздействия до границы жилой застройки, ландшафтно-рекреационной зоны, зоны отдыха, курорта. Санитарный разрыв имеет режим СЗЗ, но не требует разработки проекта его организации. Величину разрыва устанавливают в каждом конкретном случае на основании расчетов рассеивания загрязнений атмосферного воздуха и физических факторов (шума, вибрации, ЭМП и др.).

Для групп промышленных предприятий или промышленного узла устанавливается единая санитарно-защитная зона с учетом суммарных выбросов и физического воздействия всех источников, а также результатов годичного цикла натурных наблюдений для действующих предприятий.

Санитарно-защитная зона для предприятий IV, V классов должна составлять не менее 60 % площади; для предприятий II и III класса — не менее 50 %; для предприятий, имеющих санитарно-защит-

ную зону 1000 м и более, — не менее 40 % ее территории с обязательной организацией полосы древесно-кустарниковых насаждений со стороны жилой застройки.

Доминирующее направление ветров, особенно в летнее время, должно быть от жилого массива к промышленной территории, а не наоборот. Борьба с шумом должна вестись и на территории предприятия.

Расстановка оборудования в производственных участках должна производиться не только с учетом технологического процесса, удобства монтажа, ремонта, но и с учетом требований обеспечения здоровых условий труда. Шумное оборудование следует группировать

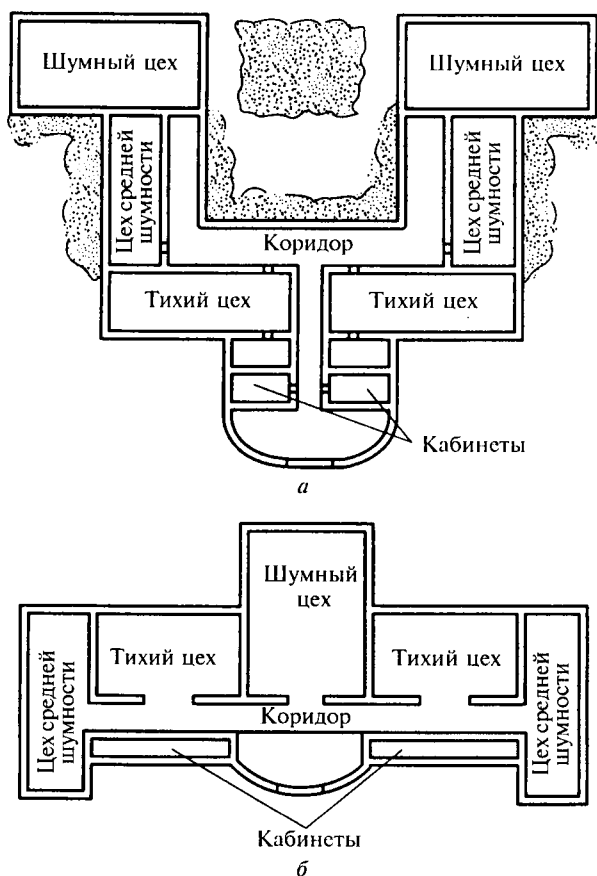


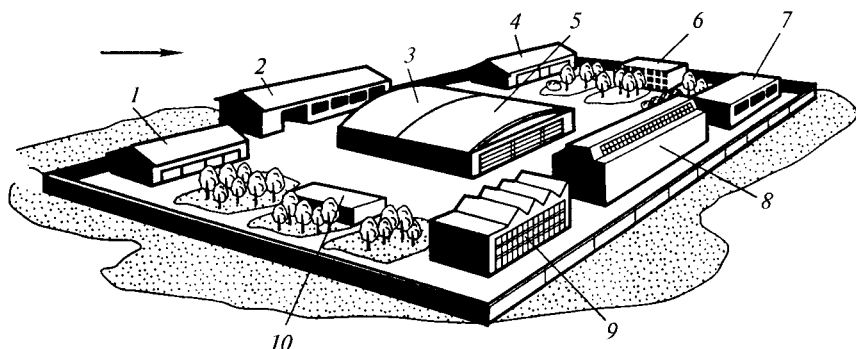
Рис. 2.13. Рациональная (а) и нерациональная (б) схемы размещения цехов с точки зрения борьбы с шумом

отдельно и устанавливать или в изолированном помещении, или в его отдельной части со звукоизолирующими или экранирующими перегородками.

Чтобы шум не распространялся в малоз шумные помещения производственного здания, оно должно иметь рациональную планировку. На рис. 2.13, *а* показан пример правильного размещения помещений в здании, где тихие и шумные цехи отделены друг от друга. Если позволяет технологический процесс, все наиболее шумные цехи целесообразно расположить с наветренной стороны участка территории предприятия.

Примерная схема планировки территории предприятия с учетом направления господствующих в данном районе ветров показана на рис. 2.14. Для каждого цеха указан средний общий уровень шума. Ближе всего к зданию заводоуправления и конструкторского бюро размещены относительно тихие цехи с общими уровнями шума в них 70...85 дБ, за которыми следуют шумные производства с уровнями шума до 120 дБ, расположенные в зеленой зоне. Производственные помещения размещены по возрастающей шумности в сторону господствующего направления ветра.

При внутренней планировке производственного здания следует придерживаться принципа объединения шумных производственных участков, станков и машин. Группы машин, производящие наибольший шум, полезно располагать дальше от помещений, в которых выполняется работа, требующая умственного напряжения, или помещений, отведенных для отдыха.

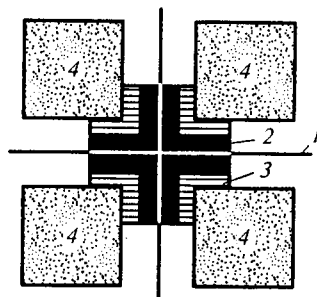


Р и с. 2.14. Генеральный план предприятия, построенного с учетом доминирующего направления ветров от тихих помещений к шумным:

1 — склад сырья; 2 — заводоуправление, КБ; 3 — сборочный цех (80...85 дБ); 4 — склад утиля; 5 — механический цех (70...80 дБ); 6 — цех стендовых испытаний (120 дБ); 7 — прессовый цех (110 дБ); 8 — литейный цех (100 дБ); 9 — кузнечный цех (100 дБ); 10 — опытный цех (100 дБ)

Рис. 2.15. Шумозащитное зонирование города:

1 — транспортные магистрали; 2 — промышленная зона; 3 — торговые предприятия; 4 — жилые районы



Машины, создающие на рабочем месте шум, превышающий предельно допустимый, следует сконцентрировать в возможно меньшем количестве мест.

Как правило, архитектурная планировка в городах, обеспечивающая акустический комфорт, включает комплекс мер по защите от шума (районирование жилых массивов, расположение шумных магистралей на значительном удалении от них, зеленые насаждения, применение шумозащитных домов и пр.). Шумозащитное зонирование территории города предполагает отделение транспортных магистралей промышленной зоной и торговыми предприятиями от жилого района (рис. 2.15).

Особое внимание обращено на звукоизоляцию окон. Звукоизолирующая способность акустически обработанного остекления достигает 45...50 дБА, что близко к звукоизоляции стен и обеспечивает акустический комфорт в помещениях.

Организационные и прочие мероприятия по снижению шума в окружающей среде. К организационным мероприятиям по снижению шума в окружающей среде можно отнести:

запрещение звуковых сигналов (это позволило повсеместно снизить шум в городах до 10 дБА);

контроль за шумностью в городах;

ограничение времени и места движения грузовых автомобилей и мотоциклов;

вынесение шумных предприятий из спальных зон;

рациональную организацию движения транспортных потоков;

запрещение работы шумных источников (например, громкоговорящей связи на сортировочных и грузовых станциях);

регламентацию работы шумных источников (например, запрещение включать громкую музыку после 23.00 ч).

Помимо этого, внедряется еще одно направление улучшения качества воспринимаемого звука — изменение его спектра на более приятный, маскировка неприятных звуковых сигналов и пр. Это предмет изучения бурно развивающейся науки, которая называется *психоакустикой*.

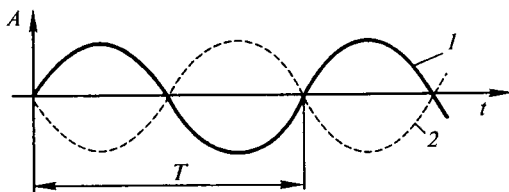


Рис. 2.16. Схема наложения звуковых волн (1 и 2) в противофазе

Активная шумозащита. В заключение рассмотрим новые технологии снижения шума. В зависимости от дополнительного источника шума все многообразные средства защиты от шума можно разделить на две большие группы: пассивные и активные. К пассивным средствам относятся те, в которых не используется дополнительный источник энергии. В активных средствах задействован дополнительный источник энергии, а принцип такой защиты от шума называется активной шумозащитой.

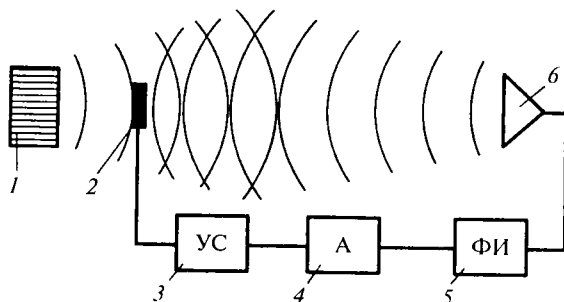
Активная шумозащита основана на хорошо известном явлении наложения звуковых волн с одинаковой частотой и амплитудой A в противофазе (рис. 2.16). Такое явление, называемое *интерференцией*, приводит к ослаблению амплитуды результирующей волны. Это легко понять из следующего примера. Пусть складываются волны одинаковой частоты при совпадении направления колебаний. Если колебания происходят по синусоидальному закону, то амплитуда результирующей волны

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \varphi},$$

где A_1 и A_2 — амплитуды складывающихся волн; φ — разность фаз между ними в рассматриваемой точке. $A = 0$ при $A_1 = A_2$ и $\varphi = 180^\circ$.

Из схемы активного шумоглушения (рис. 2.17) можно понять, что звуковая волна излучается динамиком (вторичным источником) в противофазе к первичному источнику звука. При наложении звуковых волн от первичного и вторичного источников в пространстве наблюдается зона снижения шума.

В последние годы устройства активной шумозащиты начали выпускаться серийно и нашли широкое применение для снижения шума ряда транспортных средств (самолетов, автомобилей), систем вентиляции, различных агрегатов. Анализ данных, приведенных в табл. 2.5, показывает, что активная шумозащита особенно эффективна на низких и средних частотах (до 500 Гц), где УЗД снижается на 10...15 дБ.



Р и с. 2.17. Схема устройства для активной шумозащиты:
 1 — источник шума; 2 — микрофон; 3 — усилитель; 4 — анализатор;
 5 — фазоинвертор; 6 — динамик

Таблица 2.5. Эффективность активной шумозащиты

Установка, транспортное средство, устройству	Снижение УЗД, дБ	Частотный диапазон глушения, Гц
Салон автомобиля	8...15	50...200
Кабина самолета	10...14	До 500
Вентилятор	16	ОЧВ*
Турбомашина	15	ОЧВ
Выпуск ДВС	15	До 400
Выпуск компрессора	10	До 400
АЭ, основанный на активной шумозащите	5...12	До 400

* Основная частота вращения.

Высокая эффективность на низких частотах — большое преимущество активных методов шумозащиты, поскольку именно на этих частотах звукоизоляция, звукопоглощение и другие методы сравнительно мало результативны. В то же время большой недостаток активной шумозащиты — малая эффективность на высоких частотах.

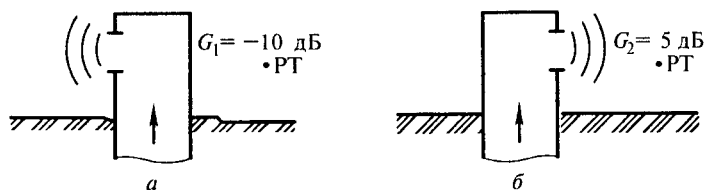
Выбор мероприятий по снижению шума. Уровни звукового давления в РТ зависят от уровня звуковой мощности (УЗМ) излучаемого

шума $L_p^{\text{изл}}$, показателя направленности излучения шума Ω , расстояния от источника шума до расчетной точки (РТ), постоянной шумного помещения B , звукоизоляции ограждений R и снижения уровня звуковой мощности $\Delta L_p^{\text{оп}}$ на пути распространения шума в открытом пространстве. Исходя из этого для снижения шума могут быть проведены соответствующие мероприятия.

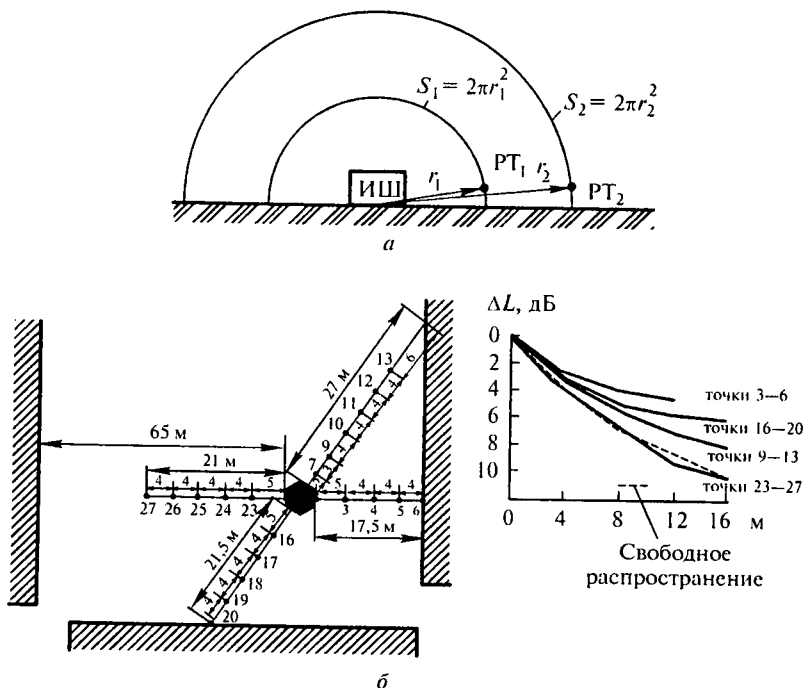
А. Уменьшение УЗМ источника шума L_p , что в условиях эксплуатации достигается заменой шумного, устаревшего оборудования, а при проектировании — выбором оборудования с лучшими шумовыми характеристиками, правильным расчетом режима его работы и т. д. Например, при подборе вентилятора необходимо стремиться к тому, чтобы его КПД был максимальным; сброс сжатого воздуха, газа или пара должен быть растянут во времени (если позволяют условия эксплуатации оборудования) и т. п.

Б. Правильная ориентация источника шума или места излучения шума по отношению к РТ для снижения показателя направленности Ω . С этой целью устройства для забора и выброса воздуха и газозвдушной смеси аэродинамических установок следует устанавливать так, чтобы излучение шума шло в противоположную сторону от жилых и общественных зданий. Снижение шума за счет правильной ориентации может быть определено как $\Delta L = G_1 - G_2$, где G_1 и G_2 — показатели направленности излучения шума (рис. 2.18) соответственно воздухозаборным или выхлопным устройствами при их неправильной и правильной ориентации в сторону РТ. Например, для установки воздухозаборной шахты снижение УЗД составит $\Delta L = 5 + 10 = 15$ дБ.

В. Размещение источника шума на возможно удаленном от РТ расстоянии или, наоборот, жилой застройки от предприятия, т. е. за счет проведения комплекса архитектурно-планировочных мероприятий. Например, на расстояниях r_1 и r_2 от источника шума в открытом



Р и с. 2.18. Правильная (а) и неправильная (б) ориентация воздухозаборной шахты



Р и с. 2.19. К определению шума в открытом пространстве (а) и в жилой застройке (б)

пространстве находятся расчетные точки PT_1 и PT_2 (рис. 2.19, а). Разность УЗД между точками определяют как

$$\Delta L = 10 \lg \frac{J_1}{J_2} = 10 \lg \frac{\Phi/S_1}{\Phi/S_2} = 10 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{r_2}{r_1},$$

где Φ — звуковая мощность источника шума, Вт; J_1, J_2 — интенсивности звука в РТ, Вт/м².

При удвоении расстояния ($r_2 = 2r_1$) $\Delta L = 6$ дБ. При распространении шума в жилой застройке спад УЗД несколько замедляется (рис. 2.19, б) из-за отражения звука от стен зданий, в таких случаях $\Delta L = 15 \lg (r_2/r_1)$. Данное мероприятие по снижению шума может быть реализовано лишь при проектировании объектов.

Г. Использование средств звукопоглощения при выполнении акустической обработки шумных помещений, через окна которых шум излучается в атмосферу (для увеличения постоянной B этих помещений).

Д. Уменьшение шума на пути его распространения от источника до РТ. Это мероприятие связано с увеличением ΔL_p и включает:

- использование средств звукоизоляции путем применения таких материалов и конструкций для наружных стен, окон, ворот, дверей, трубопроводов и коммуникаций, проходящих через ограждающие конструкции зданий, которые могут обеспечить требуемую звукоизоляцию; устройство специальных боксов и звукоизолирующих кожухов при размещении шумного оборудования; применение экранов, препятствующих распространению звука от оборудования, размещенного на территории промышленного предприятия;
- использование средств виброизоляции и вибродемпфирования;
- установку глушителей шума в воздуховодах, каналах и газодинамических трактах, испытательных боксов, компрессоров, вентиляторов и т. д.

Е. Организационно-технические мероприятия, связанные с проведением своевременного ремонта, смазки машин и оборудования и т. п.; ограничением и полным запрещением проведения шумных работ и эксплуатацию наиболее интенсивных источников шума в ночное время.

2.7.2. Звукопоглощение

Звукопоглощением называется процесс перехода части энергии звуковой волны в тепловую энергию среды, в которой распространяется звук. Звукопоглощение в непрерывных средах характеризуется уменьшением амплитуды распространяющихся звуковых волн в зависимости от расстояния. Его применяют для снижения отраженной звуковой энергии в замкнутых помещениях и объемах, снижения внутреннего шума, излучаемого ограждающими конструкциями в окружающую среду.

Звукопоглощающие материалы и конструкции служат для поглощения звука как в помещении самого источника шума, так и в изолируемых от шума помещениях. В последнем случае методы звукопоглощения и звукоизоляции используются совместно.

Этот метод борьбы с шумом предполагает использование звукопоглощающей способности материалов и конструкций. Отбирая акустическую энергию падающих на них звуковых волн, звукопоглощающие материалы трансформируют ее в тепловую.

Наряду с непосредственным переходом части звуковой энергии в тепловую звуковая волна ослабляется за счет ее частичного прониновения через ограждения, щели, окна и т. д.

Звукопоглощение обладает дисперсией, т. е. достаточно сильно зависит от частоты звука. При ее увеличении звукопоглощение увеличивается.

Кроме частотной характеристики звукопоглощение зависит от угла падения плоских звуковых волн на границу раздела. На практике используют диффузный коэффициент звукопоглощения, который является усредненной величиной коэффициентов поглощения для разных направлений падения на поверхность материала. Применение звукопоглощения позволяет уменьшить уровень шума от источников, расположенных в этом или другом помещении.

Рассмотрим в общем виде процесс взаимодействия звуковой волны при ее нормальном падении на границу раздела двух сред с разными акустическими сопротивлениями (рис. 2.20). Часть падающей энергии звуковой волны отражается, часть энергии поглощается средой, а часть энергии проходит преграду толщиной d .

Способность материалов и конструкций поглощать звуки оценивается коэффициентом звукопоглощения α , который представляет собой отношение интенсивности волны, поглощенной средой (материалом) J_n , к интенсивности падающей волны J_0 :

$$\alpha = J_n/J_0.$$

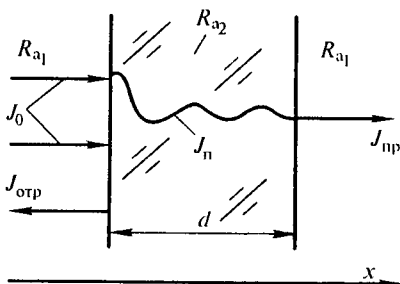
Коэффициенты звукопоглощения различных материалов определяются опытным путем, а их значение зависит от частоты падающего на них звука и угла падения звуковых волн.

Отношение интенсивности отраженной волны $J_{\text{отр}}$ от поверхности материала к интенсивности падающей волны J_0 называется коэффициентом отражения звука:

$$\beta = J_{\text{отр}}/J_0.$$

Вместо интенсивности можно выбрать отношение соответствующих звуковых энергий (падающей и отраженной).

Рис. 2.20. Распределение интенсивности звука при падении (J_0), отражении ($J_{\text{отр}}$), поглощении (J_n) и прохождении ($J_{\text{пр}}$) звуковой волны через раздел двух сред с разными акустическими сопротивлениями (R_{a1} , R_{a2}). Поверхность раздела бесконечна, толщина среды с акустическим сопротивлением R_{a2} составляет d



За коэффициент прохождения (звукопроницаемости) принимаем отношение интенсивности волны, прошедшей сквозь преграду $J_{\text{пр}}$, к падающей интенсивности: $\tau = J_{\text{пр}}/J_0$. Поскольку $J_{\text{пр}} = J_0 - (J_{\text{отр}} + J_{\text{п}})$, то

$$\tau = \frac{J_0 - (J_{\text{отр}} + J_{\text{п}})}{J_0} = 1 - (\beta + \alpha).$$

Аналогично для коэффициента поглощения α имеем:

$$\alpha = \frac{J_0 - (J_{\text{отр}} + J_{\text{пр}})}{J_0} = 1 - (\beta + \tau).$$

Таким образом, по закону сохранения энергии $\beta + \alpha + \tau = 1$.

Учитывая акустические сопротивления R_{a1} , R_{a2} границы раздела, для коэффициента прохождения можно написать:

$$\tau = 1 - \left| \frac{R_{a2} - R_{a1}}{R_{a2} + R_{a1}} \right|^2.$$

При $R_{a2} \gg R_{a1}$ коэффициент τ стремится к нулю, а коэффициент β — к единице.

Акустическая проницаемость среды конечной толщины определяется процессами поглощения звуковой волны, многократными отражениями от границ раздела и последующей интерференцией.

В строительных конструкциях энергия прошедшего через преграду звука ослабляется в тысячи раз, т. е. $\tau \ll 0,001$, тогда как коэффициенты α и β выражаются десятичными долями. Поэтому при рассмотрении явлений поглощения и отражения звука внутри помещения с точностью, вполне приемлемой для практики, можно не учитывать доли энергии, прошедшей через ограждение, считая приближенно: $\alpha + \beta = 1$.

При значительной толщине d (см. рис. 2.20), когда отражением от задней стенки среды можно пренебречь, амплитуда A и интенсивность волны J , проходящей на некотором расстоянии от границы слоя, можно определить выражением $A = A_0 \exp(-\chi x)$ или $J = J_0 \exp(-2\chi x)$, где χ — коэффициент *экстинкции* (ослабления), см^{-1} , м^{-1} .

В волновых процессах $J \sim A^2$. В акустике для характеристики поглощающей способности отдельных объектов введено понятие общего звукового поглощения тела, которое определяется произведением площади тела на его коэффициент поглощения. За единицу общего

поглощения принимают квадратный метр открытого окна, так как оно практически не отражает звука. Эту величину называют *сэбин*.

К звукопоглощающим материалам относятся такие материалы, у которых $\alpha > 0,3$. В зависимости от механизма звукопоглощения материалы делятся на несколько видов.

К первому виду относятся материалы, в которых поглощение осуществляется за счет вязкого трения воздуха в порах (волокнистые пористые материалы типа ультратонкого стеклянного и базальтового волокна), в результате чего кинетическая энергия падающей звуковой волны переходит в тепловую энергию материала. Это типичный пример диссипативной структуры.

Ко второму виду звукопоглощающих материалов относятся материалы, в которых помимо вязкого трения в порах происходят релаксационные потери, связанные с деформацией нежесткого скелета (войлок, древесноволокнистые материалы, минеральная вата и т. п.).

Третий вид — панельные материалы, звукопоглощение которых обусловлено деформацией всей поверхности или некоторых ее участков (фанерные щиты, плотные шторы и т. п.). Этот вид звукопоглощающих материалов имеет максимальное затухание на низких частотах.

Волокнисто-пористые поглотители: войлок, вата, фетр, акустическая штукатурка, фибролит, стекловспененные плиты и др. Падающие на звукопоглощающий материал звуковые волны вызывают колебания воздуха в узких порах — каналах волокнисто-пористого материала. В капиллярных воздушных трубках возникает трение и, как следствие его, — необратимые термодинамические потери. Поры таких материалов имеют вид узких каналов, допускающих сквозное продувание воздушным потоком. Форма каналов может быть самой различной.

Толщину h волокнисто-пористого материала выбирают из следующего условия. Амплитуда звукового давления в звуковой волне, отраженной от жесткой задней поверхности, при выходе из слоя не должна превышать 6 % от амплитуды падающей волны. Для соблюдения этого условия толщина слоя, m , должна быть не менее двух следующих значений при условии, что средняя пористость будет порядка 0,8, а нижняя граничная частота 100 Гц:

$$h = 28,5/\sqrt{r}; \quad (2.13)$$

$$h = (2,6 \cdot 10^3)/r, \quad (2.14)$$

где r — сопротивление продуванию на всю толщину материала, $H \cdot c/m^4$.

При $r > 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$ следует пользоваться формулой (2.14), а при $r < 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$ — формулой (2.13).

Пример 2.6. Имеются маты из минеральной ваты толщиной 5 см. Определить толщину звукопоглощающего слоя.

Решение. Допустим, что для мата толщиной 0,01 м (1 см) удельное сопротивление будет равно $10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$. Тогда полное сопротивление слоя толщиной 0,05 м (5 см) составит $5 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$. Используя формулу (2.14), определим оптимальную толщину слоя:

$$h = \frac{2,6 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^4} = 0,052 \text{ м} = 52 \text{ мм}.$$

Следовательно, требующаяся нам толщина звукопоглощающего слоя не должна превышать 50 мм. Увеличивать толщину волокнисто-пористого слоя не имеет смысла, так как прирост звукопоглощения будет практически ничтожным.

Волокнисто-пористый материал, расположенный на жесткой отражающей поверхности, хорошо работает главным образом на высоких частотах. Наибольшее звукопоглощение при этом будет в районе частоты f_1 :

$$f_1 = \frac{c}{5,28 h}, \quad (2.15)$$

где c — скорость звука в воздухе, см/с; h — толщина материала, см.

Для частот ниже f_1 наблюдается спад звукопоглощения; на частотах выше f_1 поглощение звука приблизительно постоянно. Значение частоты f_1 обратно пропорционально толщине пористого слоя. Следовательно, частоту, соответствующую началу спада звукопоглощения, можно несколько сместить, увеличив толщину пористого материала. Однако при этом необходимо соблюдать условия зависимостей (2.13)—(2.15). Подставляя данные нашего примера в формулу (2.15), получим значение максимального поглощения на частоте 1150 Гц.

Для увеличения поглощения пористых материалов на низких частотах либо увеличивают их толщину, либо используют воздушный промежуток (относ) между материалом и ограждением (рис. 2.21).

Звуковые волны, падающие на жесткую отражающую поверхность, совместно с отраженными волнами образуют систему стоячих волн. Максимум поглощения наблюдается тогда, когда воздушный зазор (относ) 2 между поверхностями конструкции 1 и материала 3 равен половине длины волны падающего звукового колебания 4. При этом будет максимальное увеличение потерь по трению, так как звуко-

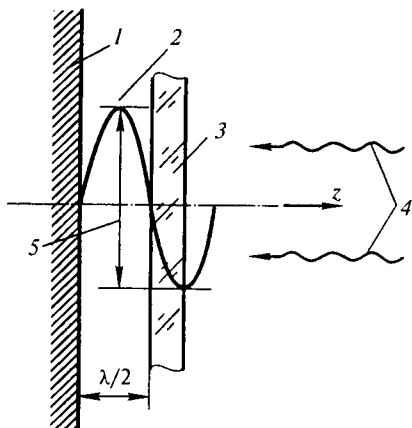


Рис. 2.21. Схема расположения звукопоглощающего материала

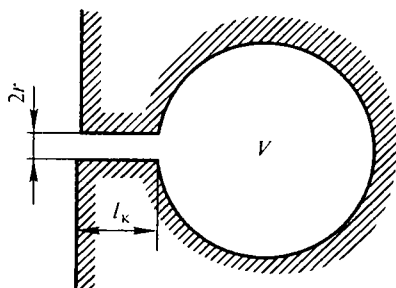


Рис. 2.22. Схема резонатора Гельмгольца

поглощающий материал располагается в области 5 наибольшего колебательного движения.

Поглощающие материалы с воздушным зазором (относом) не дают необходимого поглощения на всех частотах звукового диапазона, поэтому применяют звукопоглощающие конструкции нескольких типов: мембранные, резонансные, слоистые, пирамидальные.

Мембранные поглотители. Мембранные поглотители представляют собой раму, на которой укреплены тонкие листы фанеры, металла, клеенки и других материалов. Под действием падающих звуковых волн гибкие элементы колеблются, и за счет внутреннего трения в них происходит превращение кинетической энергии их колебаний в тепловую. Примером данного вида поглотителя могут служить застекленные оконные переплеты, которые особенно эффективно поглощают низкочастотные звуки.

Резонансные поглотители. В конструкциях этого типа используются резонансные свойства отдельных резонаторов интенсивно поглощать энергию звуковой волны на определенных частотах. Резонансные поглотители представляют собой специальные конструкции, основанные на акустических свойствах резонатора Гельмгольца.

Резонатор Гельмгольца (рис. 2.22) состоит из воздушной полости, соединенной суженной горловиной с окружающим воздухом. Если размеры резонатора малы по сравнению с длиной падающей на него звуковой волны, то его можно рассматривать как колебательную систему с одной степенью свободы. В этой системе массой

является масса воздуха, заключенная в горловине резонатора вместе с соколеблющейся массой наружного воздуха, находящейся около отверстия горловины, а упругостью является воздух, заключенный внутри расширенной полости резонатора.

Для расчета собственной частоты резонатора используют формулу

$$f_0 = \frac{5,4 \cdot 10^3}{\sqrt{(l_k V)/S}}, \quad (2.16)$$

где V — объем расширенной части резонатора, см^3 ; S — площадь сечения горловины, см^2 ; l_k — приведенная длина шейки горловины резонатора с учетом влияния присоединенной массы: $l_k = l + 1,57r$. Здесь l — измеренная длина шейки горловины, см ; r — радиус сечения горловины, см .

Трансформация колебательной энергии звуковых волн, падающих на резонатор, в тепловую происходит в результате трения воздуха в горловине.

Максимальное звукопоглощение резонатора достигается в узком диапазоне частот, лежащих вокруг его собственной частоты, определяемой выражением (2.16). Вследствие этого резонаторы применяют для поглощения шумов, имеющих ярко выраженные дискретные составляющие.

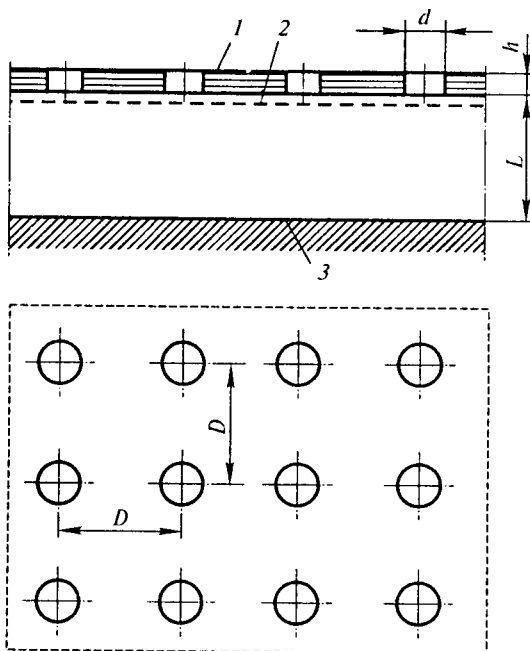
Звукопоглощение штучного резонатора будет эквивалентно некоторому количеству квадратных метров поверхности, поглощающей 100 % падающей на нее звуковой энергии. Его можно приблизительно оценить, пользуясь формулой

$$A = \frac{1}{6,28} \left(\frac{c}{f_0} \right)^2.$$

На практике вместо штучных резонаторов применяют резонансные панели — перфорированные экраны (рис. 2.23). Располагая один за другим несколько таких листов на различных расстояниях и варьируя диаметром и числом отверстий, можно получать значительное звукопоглощение в определенных диапазонах частот, в том числе и широком диапазоне.

Коэффициент звукопоглощения резонансной панели для плоской волны, падающей под углом θ к перфорированному экрану, определяют по формуле

$$\alpha_\theta = \frac{4 R \cos \theta}{(\bar{R} \cos \theta + 1)^2 + [\rho c \bar{m} \cos \theta - \operatorname{ctg}(kL \cos \theta)]^2},$$



Р и с. 2.23. Схема резонансного звукопоглотителя с перфорированным экраном:

1 — перфорированный экран; 2 — ткань; 3 — жесткая поверхность

где k — волновое число ($k = \omega/c$); L — толщина воздушного промежутка, м; $\bar{R} = R/\rho c$.

Активная составляющая сквозного сопротивления экрана

$$R = r_1 \frac{S}{S_1}.$$

Здесь r_1 — полное сопротивление продуванию ткани, наклеиваемой так, чтобы она закрывала отверстия перфорации; S — площадь экрана, приходящаяся на одно отверстие; S_1 — площадь одного отверстия.

Эффективная масса экрана

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho c}.$$

При отверстиях, расположенных в вершинах квадратов со стороной D и диаметрами отверстий перфорации d с учетом присоеди-

ненной массы воздуха, указанная величина может быть подсчитана с некоторым приближением по формуле

$$\bar{m} = \rho \left[D \left(1,13 \frac{D}{d} - 1,21 \right) + 1,27 h \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right],$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Диффузный коэффициент звукопоглощения подсчитывают по формуле

$$\alpha = \int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \sin 2\theta d\theta,$$

где α_θ — коэффициент звукопоглощения плоской звуковой волны; θ — угол между направлением падения плоской звуковой волны и нормалью к поверхности конструкции.

Комбинированные слоистые поглотители. Этот тип конструкции выполняется в виде определенного числа слоев из звукопроницаемых материалов (тканей, металлических сеток, перфорированных листов, фанеры и т. п.), отделенных друг от друга воздушными промежутками.

Конструкции включают описанные выше поглотители с целью увеличения эффективности звукопоглощения и расширения частотного диапазона их работы.

Примером конструкций этого типа может служить звукопоглощающая конструкция (рис. 2.24), состоящая из волокнисто-пористого слоя 2, расположенного на твердой отражающей поверхности 3 и покрытого перфорированным экраном 1. Наличие воздушного зазора 4 между экраном и слоем волокнисто-пористого материала обеспечивает равномерное распределение звуковых волн по поверхности материала.

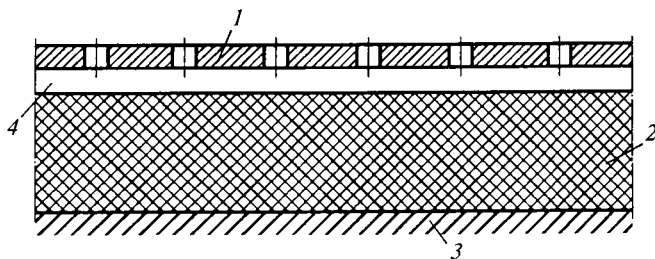


Рис. 2.24. Схема комбинированного поглотителя

Различные комбинации проклеенных воздухонепроницаемых тканей и металлических сеток позволяют получать звукопоглощение по энергии падающей звуковой волны до 99 %. Толщина таких поглотителей должна составлять примерно половину наибольшей длины волны звукового поля.

Пирамидальные конструкции.

Этот тип звукопоглотителей представляет собой пирамидальные каркасы с вершинами, направленными внутрь помещений (рис. 2.25). Решетчатые каркасы 3 заполняются пористым поглощающим материалом 1 (например, минеральной ватой), обернутым защитной стеклотканью 2, предохраняющей поглощающий материал от выдувания. Пирамидальные конструкции крепятся на стене 5. Коэффициент отражения звуковой волны 4 в данном случае ничтожно мал ($\leq 3\%$), а общее поглощение таких конструкций может быть большим в широком частотном диапазоне.

Применение звукопоглощающих материалов и пирамидальных конструкций особенно полезно при разработке звукомерных камер, в которых коэффициент отражения звуковой волны от стен должен быть ничтожно мал.

Выбор поглотителя, его толщины, а также конструктивное выполнение определяются в первую очередь частотами, на которых нужно уменьшить интенсивность шума, и рядом технологических и противопожарных требований.

Звукопоглощающие материалы должны обладать следующими свойствами: высоким звукопоглощением в требуемом диапазоне частот; небольшой плотностью; негорючестью и неагрессивностью в отношении коррозии конструкционных материалов; безвредностью; биостойкостью; малой гигроскопичностью; долговечностью; экономичностью.

Средства и методы звукопоглощения выбирают для каждого конкретного случая. Звукопоглощающие материалы и конструкции при-

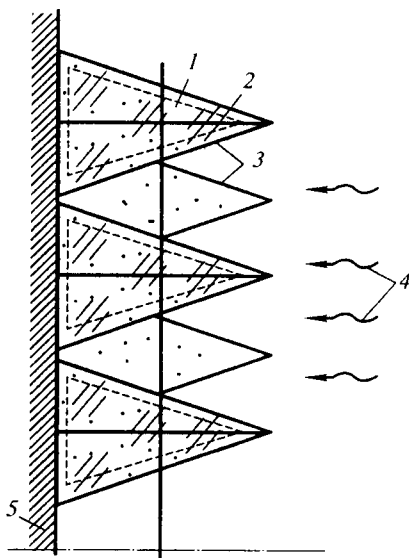


Рис. 2.25. Принципиальная конструкция пирамидальных поглотителей

меняют как в помещении, в котором находится сам источник шума, так и в смежных или изолированных помещениях.

Основная цель акустической обработки помещений — снижение уровня шумов отраженных звуковых волн. Акустическая обработка позволяет снизить уровень шумов как в производственном помещении и тем самым улучшить условия труда, так и в жилых застройках, расположенных рядом с производственными помещениями.

При акустической обработке с целью звукопоглощения облицовывают стены, потолки как по всей поверхности, так и частично. Наряду с применением облицовочных материалов используют также штучные звукопоглотители.

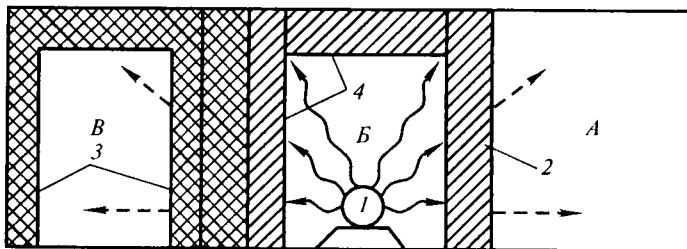
Выбор звукопоглощающих материалов производится не только с целью получения максимального эффекта поглощения в требуемом частотном диапазоне, но и с учетом опасных и вредных производственных факторов конкретного производства. Таким образом, не каждый звукопоглощающий материал будет обладать необходимыми эффективностью и сроком службы в определенных производственных условиях. При выборе средств звукопоглощения учитывается также и геометрия помещения.

При небольших высотах помещения (3...5 м) наиболее эффективна облицовка потолка, так как в данном случае эта поверхность вносит основной вклад в эффект отражения. При наличии высокого потолка (высота больше ширины помещения) и в вытянутых помещениях наиболее целесообразна облицовка стен. В помещениях, размеры которых по трем измерениям примерно одинаковые, эффективна облицовка и стен, и потолка.

2.7.3. Звукоизоляция

Под *звукоизоляцией* понимается процесс снижения уровня шума, проникающего через ограждение в помещение (рис. 2.26). Как показано на рисунке, помещение *А* изолировано ограждением от помещения *Б*, в котором находится источник шума. Акустический эффект при звукоизоляции обеспечивается процессом отражения звуковой волны от ограждения (препятствия). Как правило, звукоизоляция часто применяется совместно со звукопоглощением (помещение *В*). Для изоляции источников шума на практике применяются звукоизолирующие кожухи.

Для уменьшения шума в изолируемых помещениях метод звукоизоляции более эффективен, чем метод звукопоглощения. С помо-



Р и с. 2.26. Принципиальная схема звукоизоляции и звукопоглощения:

1 — источник шума; *2* — звукоизоляционное ограждение; *3* — звукопоглощающий материал; *4* — звукоизолирующий кожух; *А, Б, В* — помещения

щью звукоизолирующих конструкций можно снизить шум на 20...50 дБ в зависимости от типа конструкции и частоты звука. При установке в этих помещениях звукопоглощающих облицовок стен и потолков шум снижается всего лишь на 5...8 дБ. Для эффективной защиты от шума часто требуется использовать оба метода совместно.

Звукоизолирующие конструкции предназначены для уменьшения проникновения шума в изолируемое помещение или на территорию жилой застройки от источника, расположенного в соседнем помещении или на открытом пространстве. Акустический эффект таких конструкций в основном обусловлен отражением звука от их поверхностей, изготовленных из плотных твердых материалов (бетон, кирпич, сталь и т. п.).

К средствам звукоизоляции относятся ограждения, звукоизолирующие кожухи и акустические экраны.

По назначению звукоизолирующие конструкции условно можно разделить на легкие и тяжелые. Легкие конструкции изготавливают из стали, пластика, древесины. Они предназначены для ограждающих конструкций транспортных средств, строительных машин, установок, а также внутренних ограждений в зданиях. Тяжелые конструкции изготавливают из кирпича, бетона и используют для сооружения зданий. Расчет каждого из перечисленных видов конструкций имеет свои особенности.

Звуковые волны, падая на ограждение, приводят его в колебание. Ограждение любого вида, являясь системой с распределенными параметрами, т. е. системой, имеющей бесконечный ряд собственных частот со всевозрастающей плотностью, приходит в состояние вынужденных колебаний. В тех областях, где частота вынужденных колебаний близка к частоте собственных колебаний ограждения, наступают резонансные явления, и ограждение работает менее эф-

фективно, т. е. звукоизоляция его понижается. Звуковая энергия в соседнем (тихом) помещении возникает и передается в воздух от колебаний поверхности, на которую со стороны источника действует переменная периодическая сила звуковых волн, падающих во всех направлениях на ограждение.

Средняя интенсивность $\bar{J}$ звуковой энергии, падающей нормально на единицу поверхности, связана со средней плотностью звуковой энергии $\bar{w}_0$ соотношением $\bar{J} = \bar{w}_0 c$, где c — скорость распространения звука, м/с.

Плотность звуковой энергии, равномерно распределенной в телесном угле 4π ,

$$\bar{w}_0 = \frac{4\pi\bar{J}}{c} \quad \text{или} \quad \bar{J} = \frac{\bar{w}_0 c}{4\pi}.$$

Интенсивность бесконечно тонкого звукового луча в телесном угле $\Omega = 4\pi$ в диффузном звуковом поле можно представить следующим образом:

$$d\bar{J} = \frac{\bar{w}_0 c}{4\pi} d\Omega.$$

Вводя угловые координаты (рис. 2.27) для элемента телесного угла Ω получим $d\Omega = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$.

Мощность потока падающей энергии равна

$$\Phi_{\text{пад}} = \frac{\bar{w}_0 c}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi.$$

После интегрирования получаем

$$\Phi_{\text{пад}} = \frac{\bar{w}_0 c}{4} = \frac{\bar{J}}{4},$$

откуда

$$\bar{w}_0 = \frac{4\Phi_{\text{пад}}}{c} = \frac{\bar{J}}{c}. \quad (2.17)$$

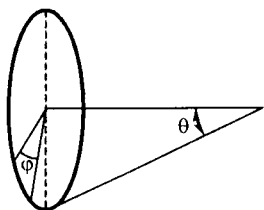


Рис. 2.27. Схема построения звуковых лучей в телесном угле

Формула (2.17) является одной из основных в акустике. В любом помещении ограждение, на которое падает звук извне, будет источником шума. Рассмотрим, чему будет равна мощность звукового потока, падающего на

поверхность с коэффициентом поглощения α . Звуковая мощность, потерянная за счет звукопоглощения на единицу поверхности,

$$\Phi_{\text{полг}} = \Phi_{\text{пад}} \alpha = \frac{\alpha \bar{w}_0 c}{4}.$$

В помещении имеется ряд поверхностей, поглощающих звуковую энергию, поэтому суммарная поглощенная мощность

$$\Phi_{\Sigma \text{ полг}} = \frac{A \bar{w}_0 c}{4}, \quad (2.18)$$

где

$$A = \sum_{i=1}^n (\alpha_i S_i).$$

Здесь S_i — поглощающая поверхность, м^2 .

Если источник шума или звука непрерывно работает в помещении, в последнем устанавливается так называемое динамическое равновесие, т. е. приток энергии от источника равен энергетическим потерям на границах помещения. Следовательно, в этих условиях будет иметь место следующая зависимость (при $\alpha = 1$): $\Phi_{\text{изл}} = \Phi_{\Sigma \text{ полг}}$, где $\Phi_{\text{изл}}$ — излучаемая источником акустическая мощность, Вт.

Выражение (2.18) можно представить в виде

$$\Phi_{\text{изл}} = \frac{\bar{w}_0 c A}{4}.$$

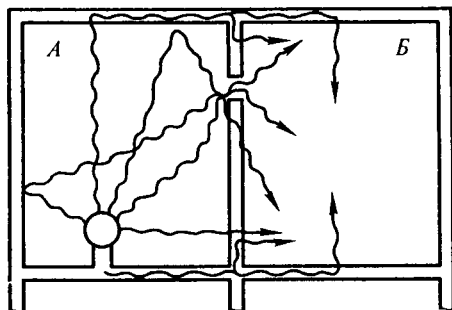
Выражение для плотности звуковой энергии будет

$$\bar{w}_0 = \frac{4\Phi_{\text{изл}}}{Ac}. \quad (2.19)$$

Формула (2.19) выражает плотность диффузной звуковой энергии в помещении при установившемся динамическом равновесии.

На рис. 2.28 показаны пути распространения звука из помещения A в помещение B . Чтобы проникающий в производственное помещение шум не был замечен, он должен быть на 8...10 дБ ниже собственного шума помещения при условии, что оба эти шума сходны по своему спектральному составу. Если собственный и проникающий шумы различны по спектру, необходима большая разность уровней.

Низкочастотный шум маскирует более высокочастотный, т. е. на фоне низкочастотного шума как бы исчезает равногромкий вы-



Р и с. 2.28. Схема распространения звука из шумного помещения *А* в тихое помещение *Б*

сокочастотный. Колебательная энергия ослабляется из-за инерциального сопротивления ограждения, а также затухает из-за внутренних вязких потерь, возникающих в материале конструкции при ее колебании.

Звукоизоляционные ограждения. В звукоизолированном помещении звуковая энергия зависит не только от коэффициента проницаемости τ , но и звукопоглощения ($\sum \alpha S_i$). Звукоизолирующая способность $S_{\text{и}}$ ограждения с учетом звукопоглощения может быть записана для изолируемого помещения в виде

$$S_{\text{и}} = 10 \lg \frac{1}{\tau} + 10 \lg \frac{S}{\sum \alpha S_i}, \quad (2.20)$$

где S — площадь ограждения, м^2 ; остальные обозначения соответствуют ранее принятым.

Звукоизоляцию характеризуют средними величинами по всему частотному диапазону либо величиной звукоизоляции на некоторых средних частотах. Ограждающие конструкции должны обладать такой звукоизоляцией, при которой уровень громкости проникающего через них шума не превышал бы допустимого (нормированного) шума.

Звукоизоляция ограждающей конструкции не зависит от физической структуры материала, если составляющие элементы обладают примерно одинаковой плотностью и модулем упругости. В этом случае звукоизоляция определяется в основном массой на единицу площади. На собственных частотах звукоизоляция массивных ограждений резко уменьшается. Для увеличения звукоизоляции применяют слоистые ограждающие конструкции. В них жесткие эле-

менты, имеющие большую массу, чередуются с гибкими слоями (воздушные зазоры, упругие прокладки и т. п.).

Для увеличения звукоизолирующих свойств сплошного ограждения от импульсного шума, возникающего от непосредственных ударов по ограждению, его выполняют из чередующихся модулей, резко отличающихся по объемному весу и модулю упругости. При этом также используют звукопоглощающие слои.

Для увеличения звукоизоляции в области низких частот следует применять прокладки из материалов с меньшим модулем упругости и большей толщиной. Для звукового диапазона наиболее используемыми прокладками являются древесноволокнистые, минераловатные плиты толщиной 2...4 см, плотностью 200...400 кг/м³, а также резиновые прокладки.

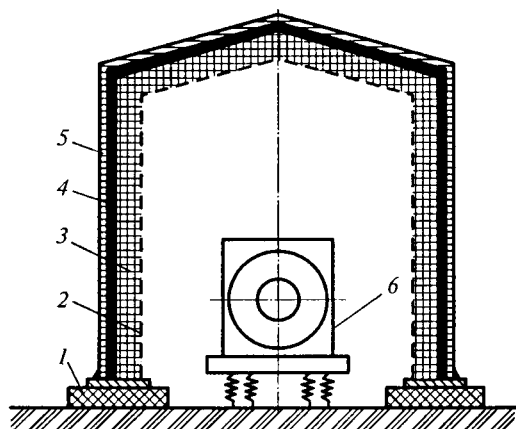
При разработке звукоизолирующих ограждений, имеющих окна, двери и другие неплотности, через которые легко проникает шум, учитывают среднюю звукоизоляцию такого ограждения и считают ее больше требуемой величины.

Звукоизолирующие кожухи. В том случае, когда не удастся существенно уменьшить шум описанными выше методами, необходимо изолировать шумный агрегат, заключая всю шумную машину или ее части, различные устройства и оборудование в кожух (капот) или устанавливая машину в изолированном помещении — боксе.

Звукоизолирующие кожухи полностью закрывают источники шума, не давая распространяться звуковым колебаниям в свободном пространстве или в производственных помещениях. Их изготавливают из металла, древесины, пластмассы, стекла и других материалов в зависимости от степени пожарной опасности производства, технологических и производственных возможностей. Чаще их выполняют из металла.

Конструкции кожухов отличаются большим многообразием в соответствии с типом механизма: они могут быть стационарными, разборными, съемными, иметь смотровые окна, двери и т. п.

Конструктивно звукоизолирующие кожухи делают полностью замкнутыми (рис. 2.29) и с технологическим проемом (проемами). Наличие щелей, отверстий, проемов ухудшает эффективность капотов, поэтому для ее увеличения на проемы внутри капотов устанавливают акустические экраны, снижающие интенсивность излучения звука капотом, но обеспечивающие технологические функции (например, теплообмен).



Р и с. 2.29. Схема звукоизолирующего кожуха:

1 — упругая прокладка; 2 — перфорированный лист; 3 — звукопоглощающий материал; 4 — металлический кожух; 5 — вибропоглощающий слой; 6 — машина

Для увеличения эффективности кожух внутри обклеивают или обивают слоем звукопоглощающего материала, выбранного и рассчитанного в соответствии со спектром шума, излучаемого данной машиной, и с учетом технологических и противопожарных требований к материалу поглотителя.

Для уменьшения передачи колебаний от машины к кожуху между ними не должно быть жестких связей. Сам кожух следует ставить на виброизолирующие прокладки из упругого материала, предназначенные для ослабления колебаний, возникающих на фундаменте машины при ее работе. Звукоизолирующий кожух должен герметично закрывать машину. Трубопроводы и систему дистанционного управления машиной виброизолируют от элементов кожуха, не нарушая его герметичности.

В случаях когда конструкция машины не позволяет закрыть ее общим кожухом, изолируют отдельные узлы, закрывая наиболее сильно вибрирующие части. Однако эффект снижения шума при этом будет ниже, чем при закрытии кожухом всей машины.

Использование одновременно методов звукоизоляции и звукопоглощения, а также виброизоляции и вибропоглощения дает возможность в большинстве случаев снизить шум машин до предельно допустимых значений. Звукоизолирующие кожухи применяют совместно с поглощающими материалами и глушителями шума. Эффективность кожуха, изображенного на рис. 2.29, показана в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Эффективность применения кожуха

Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	Звуко-изоляция, дБ	Разность уровней	Вибро-поглощение, дБ	Эффект от применения кожуха, дБ
62	14	3	0	3
125	20	10	0	10
250	26	19	0	19
500	32	27	1	28
1000	38	36	8	44
2000	44	42	10	52
4000	50	50	12	62

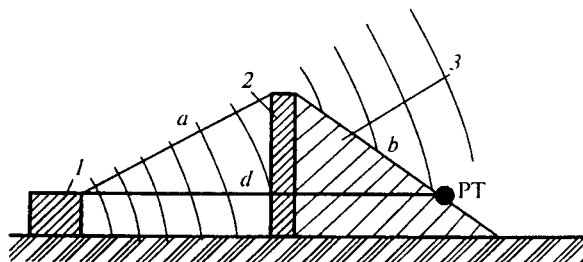
Акустические экраны. Звукоизолирующие конструкции в виде акустических экранов применяют для снижения уровня шумов в окружающей среде, создаваемых открыто установленными или движущимися источниками шума. Использовать акустические экраны целесообразно в том случае, если уровень шума источника превышает более чем на 10 дБ уровень шумов, создаваемых другими источниками в рассматриваемой зоне.

Акустический экран (АЭ) представляет собой преграду между источником шума и точкой наблюдения (расчетной точкой, жилым массивом). Только в отличие, например, от звукоизолирующей перегородки, одна или несколько граней АЭ открыта (открыты) так, что через нее звук дифрагирует в РТ. В то же время за экраном создается зона звуковой тени, т. е. ослабления звука (рис. 2.30).

Конструктивно АЭ представляет собой плоскость, за которой создается зона звуковой тени. Конструкция акустических экранов

Рис. 2.30. Схема образования звуковой тени за АЭ:

- 1 — источник шума;
- 2 — акустический экран;
- 3 — зона звуковой тени



может быть самой различной формы, стационарного исполнения либо передвижная.

Эффективность акустического экрана рассчитывают с учетом размеров и формы конструкции экрана, свойств применяемых материалов, особенностей звукового поля в зоне акустической тени из-за дифракционных явлений и т. п. Эффективность необлицованных АЭ зависит в первом приближении от длины звуковой волны источника звука и размеров АЭ. Чем меньше длина звуковой волны, т. е. больше частота звука, тем больше эффективность АЭ, она возрастает при увеличении размеров АЭ.

Звукоизолирующие поверхности экранов изготавливают из металла, бетона, пластмассы и т. д. Поверхность со стороны падающего звукового поля облицовывают звукопоглощающим материалом. Для увеличения зоны акустической тени размеры экранов (ширина и высота) должны более чем в 3 раза превышать размеры установки, производящей шум. При низких частотах размеры экранов тоже должны увеличиваться для получения требуемого уровня снижения, поэтому акустические экраны целесообразнее использовать на средних и высоких частотах, а в области низких частот применять комплексные меры подавления шумов (глушители, звукоизолирующие кожухи, звукопоглощение, оптимальные режимы работы источника шума и т. п.).

Для увеличения эффективности АЭ для низкочастотного шума помимо увеличения его размеров и облицовывания звукопоглощающим материалом следует располагать источник шума как можно ближе к АЭ или (и) к точке наблюдения. Изготовление АЭ сложной формы, например Г- или П-образных, также увеличивает их эффективность. Наличие щелей, отверстий и проемов в АЭ снижает его эффективность.

В качестве средств защиты, работающих от непосредственного воздействия шума, также используют экраны, представляющие собой преграду для прямого звука между работающим и источником.

Защитой от шума может быть плоская преграда, линейные размеры которой больше половины длины волны наименьшей составляющей шума, от которого надлежит защититься. Человек защищается экраном только от прямого звука, отраженные же волны проникают за любой тип экранов, кроме экранов в форме колпака. Для того чтобы снизить влияние отраженной звуковой энергии, а также энергии, проникающей за экран благодаря дифракции звуковых волн, внутренние поверхности, обращенные в сторону работающего, покрывают звукопоглотителем. Частотную характеристику звукопо-

глощения последнего выбирают так, чтобы она имела форму, аналогичную форме спектра шума, от которого надлежит защититься. Наличие поглотителя значительно повышает эффективность экрана, особенно в области высоких частот.

Наиболее слабой защитой от шума является плоский экран; более эффективной — экран-колпак. Снижение уровней шума, наблюдавшееся при применении экранов в виде колпаков, показано ниже.

Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
--	-----	-----	-----	------	------	------	------

Снижение уровня шума экранирующим колпаком без поглотителя, дБ	—	1	8	9	11	9	9
--	---	---	---	---	----	---	---

Снижение уровня шума тем же колпаком с поглотителем внутри и по краям, дБ	1	2	13	14	22	22	27
---	---	---	----	----	----	----	----

Исследования показывают, что сферическая форма экрана эффективней П-образной. В области высоких частот (от 1000 Гц) сферический экран снижает уровень шума на 5...8 дБ больше, чем П-образный. Ниже приведены результаты исследования снижения уровней шума при применении полусферического экрана:

Частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
-------------------	----	-----	-----	-----	------	------	------	------

Снижение уровня шума, дБ	7	8	12	15	15	21	22	25
--------------------------------	---	---	----	----	----	----	----	----

В производственных помещениях снижение уровней шума менее значительно, потому что в область тени, кроме отраженной энергии, попадает также звуковая энергия других источников, находящихся в цехе. При применении метода экранирования следует учитывать, что длина экрана должна быть больше длины волны низшей звуковой частоты диапазона, в котором надлежит создать звуковую тень. Высота экрана определяется высотой источника, который должен находиться ниже верхней кромки экрана. Проекция источника шума на экран должна быть ниже его верхней кромки не менее чем на 1 м.

Наиболее глубокую звуковую тень дает выпуклый экран, обращенный выпуклостью в сторону источника шума. В цехах экраны следует располагать так, чтобы в защищаемое пространство не попадала звуковая энергия от близлежащих источников шума.

2.7.4. Глушители шума

Эти устройства предназначены для снижения уровня шумов источников аэродинамической природы: газотурбинные установки, газодинамические системы сброса сжатого воздуха, испытательные стенды различных авиационных двигателей, компрессоры, вентиляционные камеры и т. д.

Всякое неламинарное течение газа, как правило, сопровождается аэродинамическими шумами. Борьба с шумом в источнике его возникновения представляет большие трудности, поэтому уменьшение уровня шума достигается на пути его распространения с помощью различных глушителей. Применение глушителей — эффективный метод снижения уровня аэродинамического (струйного) шума.

Глушители шума по принципу действия делят на активные (абсорбционные), реактивные (камерные), резонансные и комбинированные (камерные со звукопоглощающей облицовкой, экранные).

В зависимости от назначения различают глушители звука и шума газовых потоков. Основное отличие этих систем — отсутствие или наличие газового потока, проходящего через глушитель. В первом случае, как правило, применяют абсорбционные глушители, во втором — реактивные, реактивные с резонансными элементами и комбинированные.

Абсорбционные глушители (глушители активного типа). Принцип действия абсорбционных глушителей основан на поглощении звуковой волны в звукопоглощающих материалах. Большую часть глушителей такого типа применяют для гашения широкополосного шума. Глушители активного типа представляют собой канал, облицованный звукопоглощающим материалом. Конструктивно их выполняют круглого или квадратного сечения в виде отдельных агрегатов, которые соединяются с газопроводом фланцами. Глушителем может служить один облицованный канал или семейство каналов, имеющее сотовую форму.

Глушители абсорбционного типа (рис. 2.31) нашли широкое применение в аэродинамических установках из-за их эффективности в широком диапазоне частот при относительно небольшом газодинамическом сопротивлении.

Трубчатые глушители (рис. 2.31, а, б) отличаются сравнительной простотой; каналы 1 выполнены из перфорированного листового материала, круглого, прямоугольного или квадратного сечений. С внешней стороны каналы покрыты слоем 2 звукопогло-

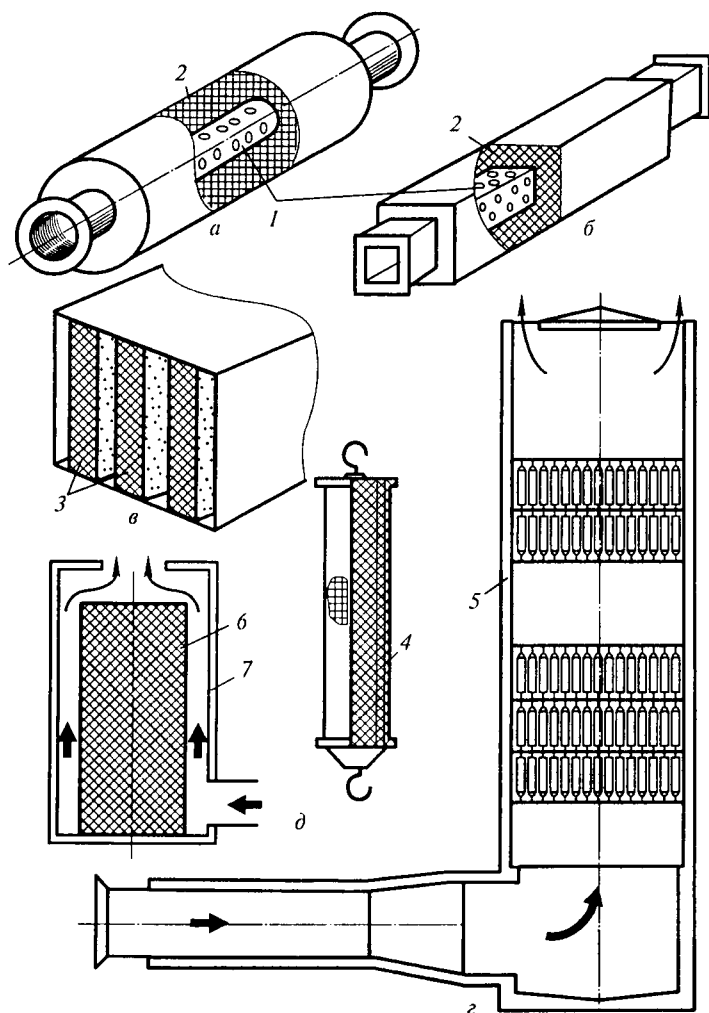


Рис. 2.31. Глушители абсорбционного типа

щающего материала (например, супертонким стеклянным или базальтовым волокном плотностью 25 кг/м^3 , минераловатными плитами плотностью 100 кг/м^3) и защитной стеклотканью, которая предохраняет звукопоглощающий материал от выдувания. Трубчатые глушители применяют в каналах с поперечными размерами до $500...600 \text{ мм}$. При больших размерах канала длина трубчатого глушителя увеличивается и он становится неэффективным.

Снижение шума $\Delta L_{\text{гл}}$ абсорбционным глушителем определяют по формуле

$$\Delta L_{\text{гл}} \cong l\alpha\Pi/\Delta S,$$

где l — длина глушителя, м; α — коэффициент звукопоглощения; Π — периметр облицовки поперечного сечения глушителя, м; ΔS — площадь поперечного сечения, м².

При требуемом снижении уровня звукового давления на 20 дБ в октавной полосе с частотой 500 Гц в каналах диаметрами 150 и 3000 мм длина трубчатого глушителя изменяется от 0,6 м до 12 м. Отсюда видно, что для сохранения прежней эффективности трубчатый глушитель становится неприемлемым из-за большой длины.

Для увеличения затухания звуковой волны на единицу длины в широком канале ставят пластинчатые глушители (рис. 2.31, в). В этом случае во внутреннем канале устанавливают параллельные пластины 3, выполненные из различных звукопоглощающих материалов. Общее звукопоглощение при установке пластинчатых глушителей определяется как толщиной, так и расстояниями между пластинами. При этом следует учитывать дисперсионные характеристики поглощения, т. е. зависимость затухания волны от частоты. При низких частотах толщина пластин должна быть больше. На практике для низких и средних частот шума выбирают толщину поглощающих пластин от 200 до 600 мм, для высокочастотного шума — от 50 до 100 мм.

Цилиндрические глушители чаще применяют при защите от широкополосного шума небольших аэродинамических труб при снижении уровня на 25...30 дБ.

В глушителях с цилиндрическими звукопоглотителями поглощающими элементами 5 (рис. 2.31, г) могут быть наборы из отдельных цилиндров 4 (диаметром 0,2 и длиной 1 м), выполненные из перфорированного металла или сетки и заполненные керамзитовой крошкой. Этот вид глушителей применяют в боксах для испытаний турбореактивных двигателей.

В глушителях, изображенных на рис. 2.31, д, звукопоглощение достигается за счет затухания шума в общем цилиндре 6 (диаметром 1,5...2, высотой 6...8 м), заполненном керамзитовым гравием и расположенным в железобетонном корпусе 7.

Для систем кондиционирования и вентиляции разработаны цилиндрические глушители (рис. 2.32, а), корпус которых с торцевыми звуконепроницаемыми крышами изготавливают из тонколистовой перфорированной стали. Внутри корпуса помещают звукопоглоща-

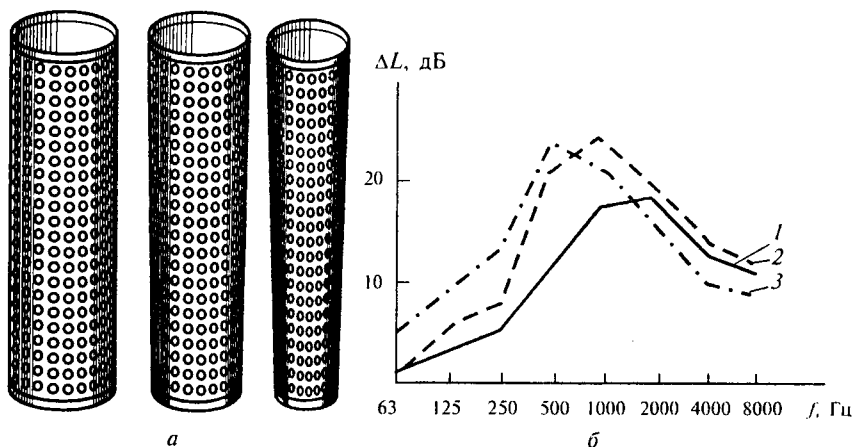


Рис. 2.32. Глушители цилиндрического типа:

a — общий вид; *б* — снижение шума глушителями диаметрами 140 (1), 250 (2) и 560 (3) мм

ющий волокнистый материал, обернутый защитной стеклотканью. По длине глушитель в зависимости от конкретного назначения может состоять из одной или нескольких секций, каждая из которых равна примерно 1 м. Диаметры глушителей составляют от 140 до 560 мм.

Снижение уровня шумов $\Delta L_{\text{гл}}$ глушителями разных диаметров показано на рис. 2.32, б. Величина $\Delta L_{\text{гл}}$ зависит также от соотношения диаметров глушителя и воздуховода.

Для эффективного подавления аэродинамического шума очень важно правильно выбрать звукопоглощающий материал. Материал облицовки выбирают в зависимости от частотного состава шума. Его частотная характеристика звукопоглощения должна отвечать форме спектра шума. Практически толщину слоя облицовки стенок канала выбирают равной 2,5...3 см, для улучшения поглощения на низких частотах — 8...10 см.

При выборе абсорбента необходимо руководствоваться как спектром шума, так и физическими свойствами материала: высоким звукопоглощением в требуемом диапазоне частот, соответствующим по форме спектральной характеристике шума; негорючестью и неагрессивностью конструктивных материалов; небольшой плотностью; малой гигроскопичностью и биостойкостью; безвредностью для здоровья обслуживающего персонала; долговечностью в эксплуатации; экономичностью и т. д.

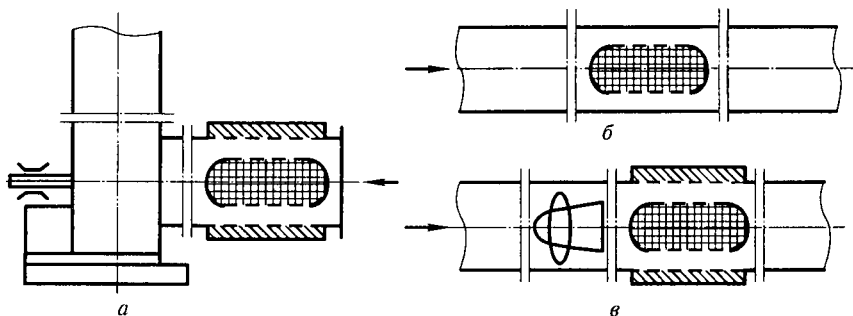


Рис. 2.33. Схемы размещения глушителей:

а — для снижения шума радиальных вентиляторов (в сочетании с трубчатыми);
б — в магистральных воздуховодах; *в* — для осевых вентиляторов

Пока еще нет звукопоглощающих материалов, одновременно удовлетворяющих всем перечисленным требованиям. Однако на основе практических данных для использования в активных глушителях шума можно рекомендовать следующие материалы:

антисептированную и антипирированную хлопчатобумажную вату, если газ не содержит капельной влаги и агрессивных веществ;

капроновое волокно в случае, если газ влажный или с примесью некоторых агрессивных компонентов;

стеклянное волокно и шлаковую вату для газа с повышенной температурой;

строительный или керамзитовый гравий для использования в условиях высоких температур и больших скоростей газа.

В звукопоглощающем материале и воздушном зазоре глушителя устанавливают перегородки для предотвращения распространения звуковых волн, направленных по продольной и поперечной осям, что влияет на эффективность поглощения.

Глушители размещают как в корпусе трубчатых глушителей, так и в воздуховодах (рис. 2.33). Эффективность абсорбционного глушителя возрастает с увеличением его длины и коэффициента α звукопоглощающего материала.

Реактивные глушители. В глушителях этого типа поглощение звука происходит вследствие образования «волновой пробки», затрудняющей прохождение звука на некоторых частотах из-за инертности массы воздуха в трубках или отверстиях, соединяющих ячейки глушителя. Этот вид глушителей применяют для подавления шума с ярко выраженными дискретными составляющими.

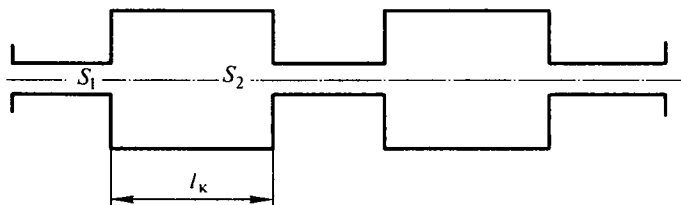


Рис. 2.34. Реактивный глушитель:

S_1 — площадь сечения канала; S_2 — площадь сечения расширительной камеры;
 l_k — длина камеры

Реактивный глушитель (рис. 2.34) выполняют в виде камер расширения, связанных с воздуховодами. Работает глушитель на принципе акустического фильтра, способен пропускать без заметного ослабления одни частоты и подавлять другие. Он может состоять из одной камеры или нескольких камер, соединенных внешней или внутренней трубой. Чем больше количество камер, тем более эффективен глушитель в заданном диапазоне частот. Частотная характеристика снижения уровня шума такого глушителя имеет ряд чередующихся максимумов, величины которых определяются параметром m , а частота — длиной камеры расширения l_k . Увеличение длины этой камеры сдвигает частоту первого максимума в область низких частот.

Резонансные (резонаторные) глушители. Если звук при распространении встречает систему, способную колебаться, то при воздействии на нее звуковых волн, особенно с частотой, близкой к ее собственным частотам, она приходит в соколебания с возбуждающей частотой. При совпадении собственной и возбуждающей звуковых частот без учета трения сопротивление системы—резонатора равно нулю. В этом случае объемная скорость в отверстии резонатора теоретически достигает бесконечности. При резонансном совпадении собственной и возбуждающей частот амплитуда скорости колебаний воздуха в горле резонатора резко возрастает, вызывая значительные (при наличии трения) потери энергии падающей волны. Резонаторами можно значительно снизить уровень дискретных компонентов шума.

В резонаторных глушителях используют явление отражения звуковой волны обратно к источнику шума с применением отражателей и объемных резонаторов (по аналогии с полыми резонаторами, применяемыми в технике СВЧ); их используют для подавления дискретных составляющих шума (поршневые компрессоры, двигатели внутреннего сгорания и т. д.).

Глушители этого вида устанавливают непосредственно в трубопроводах, поперечные размеры которых меньше длины волны заглушаемого звукового колебания. Резонаторные глушители представляют собой газовые полости, сообщаемые с трубопроводом с помощью отверстия. Конструктивно они могут быть выполнены в виде одиночного резонатора или группы резонаторов.

Резонансные глушители шума в виде камер расширения, линейные размеры которых больше половины длины звуковой волны, называются камерными (рис. 2.35). Они представляют собой расширение канала, переходящее в параллелепипедообразную или цилиндрическую камеру, линейные размеры которой соизмеримы или больше половины длин звуковых волн, попадающих в нее.

Камерный глушитель представляет собой объемный резонатор, поперечное сечение S_2 которого больше поперечного сечения S_1 трубопровода. Максимум затухания наблюдается при длине резонатора $l = (\lambda/4)n$ (где $n = 1, 3, 5...$).

Глушитель с боковым резонатором (рис. 2.36) имеет резонансную частоту f_p , равную основной частоте заглушаемого колебания:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{V}},$$

где $K = S_0/(l + 0,8d)$ — проводимость отверстия (горловины); d — диаметр отверстия; l — длина горловины; S_0 — площадь поперечного сечения горловины, м^2 ; V — объем резонатора, м^3 .

Снижение уровня шума в случае одного резонатора определяется параметром $\sqrt{KV/2S}$, где S — поперечное сечение трубопровода.

При наличии в спектре источника шума с несколькими резонансными частотами применяют многокамерные концентричные системы (рис. 2.37). Каждый резонатор настраивают на определен-

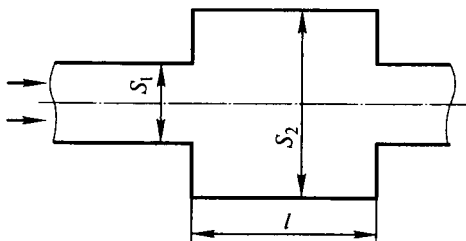


Рис. 2.35. Камерный глушитель

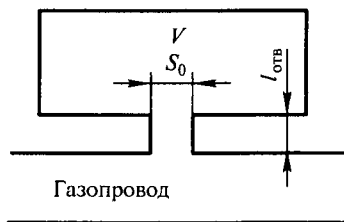


Рис. 2.36. Схема глушителя с боковым резонатором

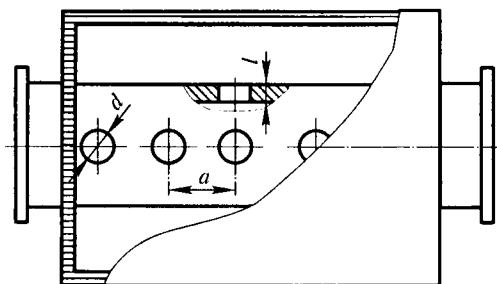


Рис. 2.37. Схема многокамерного концентричного резонатора

ную частоту. При расчетах резонансных глушителей могут быть использованы в некоторой степени методики расчетов полых резонаторов, применяемых в технике СВЧ, поскольку и в том, и в другом случае наблюдаются волновые процессы. При этом следует учитывать отличия, обусловленные природой звуковых волн и электромагнитных колебаний.

К глушителям, настроенным на дискретные частоты, можно отнести и резонаторные трубки, с одного конца закрытые, а другим введенные в воздуховод. В такой трубке активные колебания начнутся в том случае, когда учетверенная ее длина будет равна длине падающей на ее входное отверстие звуковой волны.

Применяя набор трубок или ячеек, можно организовать широкополосное заглушение. Однако необходимо учитывать, чтобы диаметры трубок были значительно меньше длины полуволны заглушаемой частоты. На рис. 2.38 дана схема резонаторного глушителя ячеистого типа. Собственную частоту этого глушителя определяют по формуле

$$f_0 = \frac{c}{4h_1} = \frac{c}{\lambda},$$

где h_1 — длина трубки (с учетом присоединенной массы воздуха); $h_1 = h + 0,4d$ (здесь d — диаметр трубки); λ — длина звуковой волны.

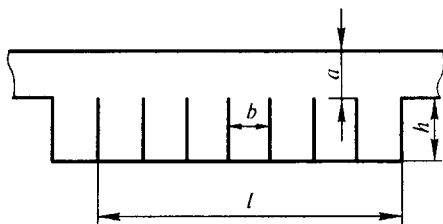


Рис. 2.38. Схема резонаторного глушителя ячеистого типа:

l — длина резонаторов; b — длина одного резонатора; a — высота канала; h — глубина резонатора

При длине канала, большей $\lambda/4$, звуковая волна данной частоты беспрепятственно проходит по каналу — полосы заглушения чередуются с полосами пропускания. Поэтому для заглушения всех компонентов, входящих в спектр шума агрегата, длина резонаторных трубок делается переменной, чтобы полосы заглушения одних совпадали с полосами пропускания других.

Комбинированные глушители. В комбинированных глушителях используются явления как поглощения, так и отражения звука, поскольку в реальном глушителе одновременно наблюдается и поглощение, и отражение звука. Этот вид глушителей паразитных шумов представляет собой комбинацию абсорбционных и резонансных глушителей (рис. 2.39).

Экранные глушители применяют на выходе из трубопровода в атмосферу для подавления высоких частот и в тех случаях, когда использование глушителей других типов оказывается недостаточным. От диаметра экрана и зазора между ним и трубопроводом существенным образом зависит эффективность глушения. Диаметр экрана выбирают примерно в 2 раза больше диаметра канала трубопровода, зазор — из соображений эффективности шумоглушения. Чем меньше зазор, тем больше затухание. Однако при слишком малом зазоре резко возрастает гидравлическое сопротивление. Поэтому при разработке и применении экранного глушителя зазор выбирают оптимальной величины.

Для повышения звукопоглощения глушитель со стороны, обращенной к трубопроводу, облицовывают звукопоглощающим материалом. Теоретические методы расчета глушителей данного типа пока еще не разработаны. Однако экспериментальным путем получены

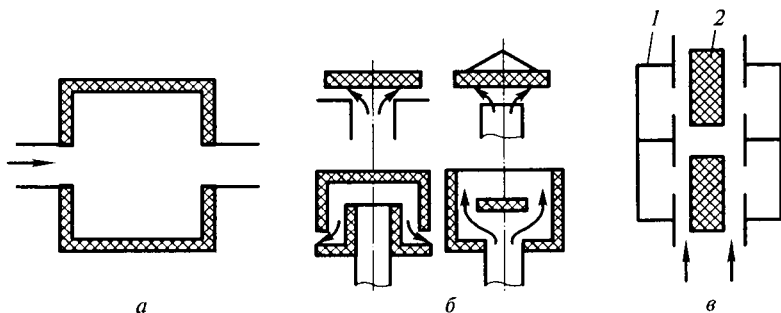


Рис. 2.39. Схемы комбинированных глушителей:

a — камерные глушители со звукопоглощающей облицовкой; *б* — экранные глушители; *в* — глушитель для стенда испытаний дизелей; 1 — резонаторы; 2 — цилиндрические глушители

данные, позволяющие сделать некоторые выводы об условиях работы экранных глушителей:

эффективность глушителя возрастает с увеличением частоты. По отношению к шумам низкой частоты действие его невелико;

максимальное снижение уровня шума наблюдается не на оси глушителя, а сдвинуто от нее на 15° ;

чем меньше расстояние от глушителя до трубопровода, тем больше снижение уровня шума;

увеличение размера глушителя приводит к снижению уровня шума, излучаемого источником со спектром, преобладающим по интенсивности в области низких частот;

применение экранных глушителей со звукопоглощающей облицовкой приводит к снижению уровня шума в области средних и высоких частот. Максимальное звукопоглощение наблюдается, начиная с частот

$$f \geq \frac{c_n}{4h};$$

экранные глушители в виде дефлекторов с цилиндрическими облицованными участками (рис. 2.40) более эффективны, чем без них. Эффект тем больше, чем больше цилиндрический участок. Глушители этого типа применяют в качестве зонтов над шахтами вентиляционных систем, систем всасывания компрессорных установок и др.

Шум, создаваемый вентилятором, имеет сплошной спектр на высоких частотах (вихревой шум) и линейчатый спектр на низких частотах (шум из-за неоднородности потока). Для ослабления такого шума можно применять комбинированные глушители, состоящие из пластинчатого глушителя для поглощения высокочастотной части спектра, и резонаторные глушители с непрерывным изменением глубины резонаторов — для поглощения низкочастотной части спектра.

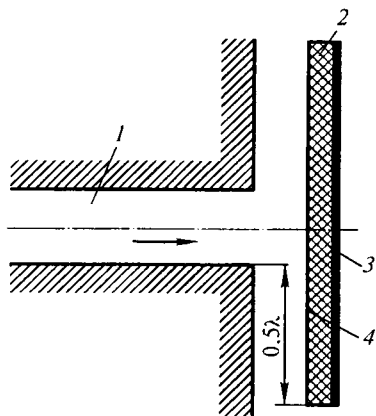


Рис. 2.40. Схема экранного глушителя:
1 — воздуховод; 2 — звукопоглощающий материал; 3 — корпус экрана; 4 — перфорированный лист или сетка

Конструкции реактивных и комбинированных глушителей разнообразны, их эффективность возрастает с увеличением объема глушителя, числа его камер, поворотов газового потока в глушителе, элементов с перфорацией. В некоторых конструкциях она достигает 40 дБА.

2.8. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМОВ

2.8.1. Расчет звукопоглощения в помещении

Ориентировочный расчет звукопоглощения (дБ) в помещении выполняют по формулам:

$$\Delta L_{\text{зн}} = 10 \lg (A_2 / A_1); \quad A_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} S_{i1}; \quad A_2 = \sum_{i=1}^m \alpha_{i2} S_{i2},$$

где A_1 и A_2 — эквивалентные площади звукопоглощения в помещении до и после применения звукопоглощающей облицовки соответственно, м²; α_{i1} и α_{i2} — коэффициент звукопоглощения i -й ограждающей поверхности до и после акустической обработки соответственно; S_{i1} и S_{i2} — площадь i -й ограждающей поверхности до и после акустической обработки, м². Для удобства выполнения расчетов в табл. 2.7 приведены данные об акустических свойствах некоторых материалов.

Таблица 2.7. Коэффициенты звукопоглощения материалов α

Звукопоглощающий материал или поверхность	Толщина, мм	Октавные полосы частот, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Плиты ПАО минераловатные, акустические	20	0,02	0,03	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45	0,20
Сталь	—	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Маты из супертонкого базальтового полотна	50	0,1	0,25	0,7	0,98	1,0	1,0	1,0	0,95
Маты из отходов капронового волокна	50	0,02	0,15	0,46	0,82	0,92	0,93	0,93	0,93

Эффективность звукопоглощения зависит от двух основных факторов: площади звукопоглощающих конструкций и эффективности звукопоглощающего материала. Звукопоглощение особенно эффективно на высоких частотах и тем больше, чем больше площадь помещения, облицованная звукопоглощающим материалом, и ближе коэффициент звукопоглощения последнего к единице.

Снижение шума в помещении при рассматриваемом способе рассчитывают следующим образом. Шум, излучаемый источником, в помещении распространяется иначе, чем на открытом воздухе. В неогражденном пространстве звуковая энергия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния и зависит от телесного угла, в который происходит излучение направленного источника.

Поле, создаваемое источником в свободном пространстве, называется свободным звуковым полем, а волны, распространяющиеся в пространстве, называются бегущими. Убывание плотности звуковой энергии на расстоянии r в этом случае определяется формулой

$$w_0 = \frac{\Phi_0 \varphi}{\Omega r^2 c}, \quad (2.21)$$

где Φ_0 — излучаемая звуковая мощность источника, Вт; Ω — телесный угол, в который происходит излучение, ст. рад; c — скорость распространения звука, м/с; φ — коэффициент направленности источника.

Иное происходит в закрытом помещении. Бегущие звуковые волны доходят до ограждений помещения. Поверхности, линейные размеры которых соизмеримы или больше длин падающих на них волн рассчитываемых частот, будут поглощать и отражать звуковую энергию. Полное поглощение этими поверхностями

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i S_i, \quad (2.22)$$

где S_i — i -я поверхность, поглощающая звук, м².

Источник звука мощностью Φ , равномерно излучающий энергию во все стороны (ненаправленный), создает в помещении плотность рассеянной энергии

$$w_0 = \frac{4\Phi}{cA}. \quad (2.23)$$

Формула (2.23) будет справедлива для определения плотности звуковой энергии в помещениях, имеющих вид параллелепипеда.

После прекращения звучания источника плотность энергии в помещении будет убывать по закону

$$w_{0(t)} = w_{01} e^{-cAt/4V}, \quad (2.24)$$

где w_{01} — плотность звуковой энергии при установившемся в помещении динамическом равновесии, Дж/м³; e — основание натуральных логарифмов; V — объем помещения, м³; t — время, с.

Время реверберации T_p — процесс постепенного затухания звуковой энергии в закрытых помещениях после прекращения работы звукового (шумового) источника — является одним из основных акустических критериев.

Стандартное время реверберации подразумевает, что плотность энергии в процессе затухания уменьшается в миллион раз. Отношение 10^6 выбрано потому, что нормальная речь в помещении среднего размера воспринимается как звук с интенсивностью, превышающей порог слышимости на 60 дБ. Следовательно, $w_{01}/w_0 = 10^6$, откуда после логарифмирования получаем

$$T_p = \frac{4V}{cA} 2,3 \lg \frac{w_0}{w_t},$$

или

$$T_p = \frac{4V}{340A} 2,3 \cdot 6 = 0,162 \frac{V}{A}. \quad (2.25)$$

Время реверберации определяет качество акустического помещения. С увеличением объема помещения время реверберации увеличивается в соответствии с формулой (2.25). Напротив, при увеличении поглощения на ограничивающих поверхностях время реверберации уменьшается.

Оптимальные значения для времени реверберации лежат в пределах от нескольких десятых долей секунды до 1...3 с. Если время реверберации меньше этих значений, то звуки получаются глухими. При времени реверберации более 3 с собственные колебания накладываются друг на друга и речь становится неразборчивой.

Более точно время реверберации определяют по формуле

$$T_p = \frac{0,162V}{S \ln[1/(1 - \bar{\alpha})]}, \quad (2.26)$$

где V — объем помещения, м³; S — площадь ограждающих поверхностей, м²; $\bar{\alpha}$ — коэффициент поглощения поверхности, на которую упал звук.

Определив время реверберации в помещении по формулам (2.25) и (2.26), легко найти его полное внутреннее звукопоглощение.

Звукопоглощение акустически не обработанных помещений приближенно может быть определено по формуле $A = 0,35 V^{2/3}$ или $A = 17 \lg V$, где V — объем помещения, м³.

В помещении при работе источника присутствуют прямые и отраженные звуковые волны. Звуковое поле бегущих волн описывается формулой (2.21). Диффузное звуковое поле или поле отраженных волн близко к зависимости, приведенной в формуле (2.23). Перепишем эти формулы для определения интенсивности звука:

интенсивность прямого звука

$$J_{\text{п}} = \frac{\Phi}{\Omega r^2}; \quad (2.27)$$

интенсивность диффузного звука

$$J_{\text{диф}} = \frac{4\Phi}{A};$$

интенсивность отраженного звука

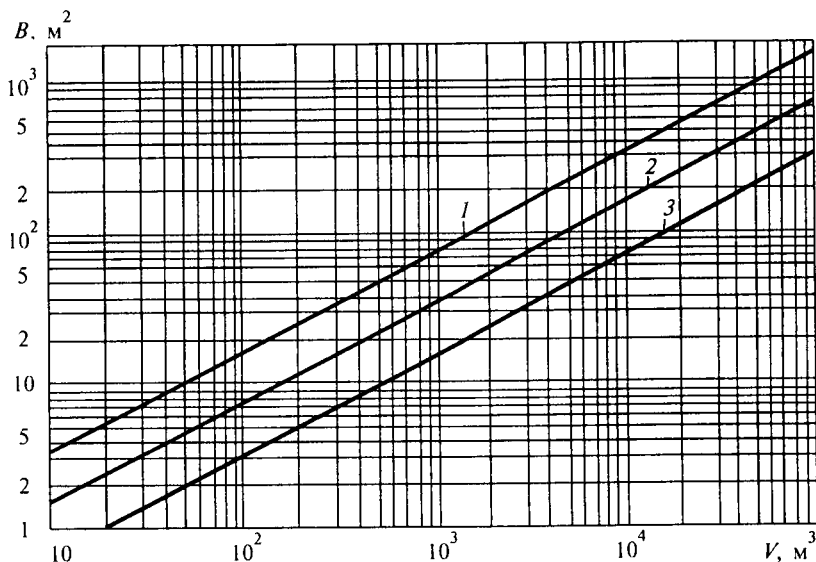
$$J_{\text{отр}} = \frac{4\Phi(1 - \bar{\alpha})}{A}. \quad (2.28)$$

Вблизи от источника на расстояниях, меньших значения граничного радиуса, превалирует энергия прямого звука. Энергия отраженного звука равна прямому звуку на поверхности сферы, определяемой граничным радиусом. Его значение легко получить из сопоставления формул (2.27) и (2.28). Уровень акустической мощности на расстоянии r от источника

$$L_p(r) = 10 \lg \frac{\Phi}{\Phi_0} + 10 \lg \left(\frac{1}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right). \quad (2.29)$$

Зная уровень акустической мощности источника звука Φ , телесный угол Ω , в который происходит излучение, и постоянную помещения B , можно определить уровень шума на расстоянии r от источника.

В тех случаях, когда в помещении невозможно измерить время реверберации, однако требуется определить уровень акустической мощности машины при известном телесном угле излучения энергии, используют вспомогательный график (рис. 2.41), на котором по оси абсцисс отложены объемы помещений, а по оси ординат — постоянная помещения, соответствующая заданному объему и внутреннему



Р и с. 2.41. Постоянная помещения в функции объема:

1 — помещения с большим количеством оборудования и людей; 2 — помещения с небольшим количеством оборудования и людей; 3 — помещения без оборудования и людей

оборудованию. При определении постоянной помещения наиболее подходящей является постоянная, обозначенная прямой 2.

Пример 2.7. Среднее по частотам время реверберации T_p в производственном помещении объемом $V = 2700 \text{ м}^3$ равно 2,5 с, суммарная площадь внутренних отражающих поверхностей (стены, пол, потолок) $\sum S_i = 1200 \text{ м}^2$. Определить акустическую постоянную помещения B .

Решение. Среднее звукопоглощение помещения с оборудованием определим по формуле (2.25):

$$A = 0,162 \frac{V}{T_p} = 0,162 \frac{2700}{2,5} = 175 \text{ м}^2.$$

Средний коэффициент звукопоглощения определим по формуле (2.22):

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum S_i} = \frac{175}{1200} = 0,146,$$

тогда $1 - \bar{\alpha} = 1 - 0,146 = 0,854$.

Постоянная помещения выразится величиной

$$B = \frac{A}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{175}{0,854} = 205 \text{ м}^2.$$

На рис. 2.41 (прямая L) постоянная помещения B для объема 2700 м^3 равна 210 м^2 . Как явствует из примера, разница несущественна (210 и 205 м^2), что позволяет рекомендовать график для практических расчетов.

Для сравнения шумности разного рода агрегатов необходимо определить уровень излучаемой ими акустической мощности.

Пример 2.8. Согласно рассмотренному выше примеру постоянная помещения $B = 205 \text{ м}^2$, уровень мощности источника $L_p = 100 \text{ дБ}$. Определить уровень акустической мощности на расстоянии $r = 10 \text{ м}$ от источника шума после размещения в помещении дополнительного средства звукопоглощения в количестве $A_{\text{доп}} = 100 \text{ м}^2$ при телесном угле направленности излучения $\Omega = 2\pi$.

Решение. Сначала определим по формуле (2.29) уровень акустической мощности на заданном расстоянии $r = 10 \text{ м}$ без учета дополнительного средства звукопоглощения:

$$L_p(r) = 100 + 10 \lg \left(\frac{1}{6,28 \cdot 100} + \frac{4}{205} \right) = 83,5 \text{ дБ}.$$

Средний коэффициент звукопоглощения после размещения дополнительного средства составит:

$$\bar{\alpha} = \frac{A + A_{\text{доп}}}{\sum S_i} = \frac{175 + 100}{1200} = 0,23 \quad \text{и} \quad 1 - \bar{\alpha} = 0,77,$$

откуда постоянная помещения

$$B = \frac{A + A_{\text{доп}}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{275}{0,77} = 357 \text{ м}^2.$$

Определим по формуле (2.29) уровень мощности шума на том же расстоянии с учетом дополнительного средства звукопоглощения:

$$L_p(r) = 100 + 10 \lg \left(\frac{1}{6,28 \cdot 100} + \frac{4}{357} \right) = 81,1 \text{ дБ}.$$

Таким образом, уровень интенсивности шума на расстоянии 10 м от источника при внесении дополнительного звукопоглощения понизился на $\Delta L_p(r) = 83,5 - 81,1 = 2,4 \text{ дБ}$.

Существует видоизмененная методика для расчета акустических характеристик помещения. Постоянную помещения B акустически не обработанного помещения определяют по формуле $B = B_{1000} \mu$, где B_{1000} — постоянная помещения на среднегеометрической частоте 1000 Гц , определяемая в зависимости от объема помещения V , м^3 (табл. 2.8); μ — частотный множитель (табл. 2.9).

Таблица 2.8. Значения постоянной помещения B_{1000}

Помещение	$B_{1000}, \text{ м}^2$
С небольшим количеством людей: цеха заводов ЖБИ, металлообработки, вентиляционной камеры и т. д.	$V/20$
С жесткой мебелью и большим количеством людей или небольшим количеством людей и мягкой мебелью: лабораторий, ткацкие, деревообрабатывающие цеха, кабинеты и т. д.	$V/10$
С большим числом людей и мягкой мебелью: комнаты управлений, залы конструкторских бюро, учебные аудитории, залы ресторанов, магазинов, вокзалов, игральные залы, жилые помещения	$V/6$
Помещения со звукоизолирующей облицовкой потолка и части стен	$V/1,5$

Таблица 2.9. Значения частотного множителя μ для помещений различных объемов

Объем помещения, м^3	Частотный множитель μ на среднегеометрических частотах октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
< 200	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
200...1000	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
> 1000	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

По найденной постоянной помещения B для каждой октавной полосы вычисляют эквивалентную площадь звукопоглощения, м^2 :

$$A = \frac{B}{(B/S) + 1},$$

где S — общая суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения, м^2 .

Применение звукопоглощающих облицовок целесообразно, когда в расчетных точках в зоне отраженного звука требуется снизить уровень звука не более чем на 8...10 дБ, а в зоне прямого звука — на 3...4 дБ.

Зона отраженного звука определяется величиной предельного радиуса $r_{\text{пр}}$, т. е. расстоянием от источника шума, на котором уровень звукового давления отраженного звука равен уровню давления прямого звука, излучаемого данным источником.

Когда в помещении находится n одинаковых источников шума,

$$r_{\text{пр}} = 0,2\sqrt{B_{8000}/n},$$

где B_{8000} — постоянная помещения на частоте 8000 Гц ($B_{8000} = B_{1000}\mu_{8000}$).

Максимальное снижение уровня звукового давления ΔL , дБ, в каждой октавной полосе при применении звукопоглощающих покрытий в расчетной точке, расположенной в зоне отраженного звука, определяют по формуле $\Delta L = 10 \lg (B'/B)$, где B' — постоянная помещения после установки в нем звукопоглощающих конструкций, м^2 .

Постоянная помещения в акустически обработанном помещении $B' = (A_1 + \Delta A)/(1 - \alpha_1)$, где $A_1 = \alpha(S - S_{\text{обл}})$ — эквивалентная площадь звукопоглощения поверхностями, не занятыми звукопоглощающей облицовкой, м^2 ; α — средний коэффициент звукопоглощения до его акустической обработки: $\alpha = B/(B + S)$; α_1 — средний коэффициент акустически обработанного помещения: $\alpha_1 = (A_1 + \Delta A)/S$; S — общая суммарная площадь ограждающих поверхностей, м^2 ; ΔA — величина суммарного добавочного поглощения, вносимого конструкцией звукопоглощающей облицовки или штучными поглотителями, м^2 : $\Delta A = \alpha_{\text{обл}}S_{\text{обл}} + A_{\text{шт}}n$.

Здесь $\alpha_{\text{обл}}$ — реверберационный коэффициент звукопоглощения конструкции облицовки; $S_{\text{обл}}$ — площадь облицовочных поверхностей, м^2 ; $A_{\text{шт}}$ — эквивалентная площадь звукопоглощения одного штучного звукопоглотителя, м^2 ; n — число штучных поглотителей.

Пример 2.9. Определить эффективность применения акустической обработки помещения цеха точечной сварки арматурных каркасов.

Размеры цеха $4,5 \times 12 \times 72$ м, объем цеха $V = 3880 \text{ м}^3$; площади ограждающих поверхностей: потолка 864, стен 420, пола 864, общая площадь 2148 м^2 . В цехе установлено 18 многоточечных сварочных аппаратов для сборки арматуры сеток. Расчетная точка удалена от ближайшего станка на $r = 2$ м.

Решение. Определяем предельный радиус:

$$r_{\text{пр}} = 0,2\sqrt{B_{8000}/n} = 0,2\sqrt{1164/18} = 1,6 \text{ м},$$

где n — число источников шума;

$$B_{8000} = B_{1000}\mu_{8000} = (V/20)6 = (3880/20)6 = 1164 \text{ м}^2.$$

Расчетная точка находится на расстоянии $r > r_{\text{пр}}$ от ближайшего станка, т. е. в зоне отраженного звука. По результатам натурных измерений имеем уровни звукового давления в расчетной точке на рабочем месте оператора сварочного автомата:

Среднегеометрические частоты, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления в арматурном цехе, дБ	74	76	88	88	87	82	78	75
Допустимые уровни звукового давления, дБ (СН 224/218-562—96)	99	92	86	83	80	78	76	74
Требуемое снижение уровня шума, дБ	—	—	2	5	7	4	2	1

Анализ спектра уровней звукового давления на рабочем месте показал, что звукопоглощающая конструкция должна иметь высокий коэффициент звукопоглощения на частотах 1000...8000 Гц.

Для акустической обработки арматурного цеха выбираем плиты марки ПА/С минераловатные, акустические, размером 500 × 500 мм с отделкой «набрызгом». Реверберационный коэффициент звукопоглощения $\alpha_{\text{обл}}$ в октавных полосах составляет:

Среднегеометрические частоты, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha_{\text{обл}}$	0,02	0,05	0,21	0,66	0,91	0,95	0,89	0,7

Находим постоянную B помещения объемом 3880 м³ на частотах спектра по формуле $B = B_{1000}\mu$. Значение частотного коэффициента μ на частотах спектра берем из табл. 2.9 в зависимости от объема помещения, величину B_{1000} — из табл. 2.8 в зависимости от характеристики помещения.

Определяем величину ожидаемого снижения уровней звукового давления в октавных полосах ΔL . Для этого параметры ΔA , A_1 , α_1 , B_1 , ΔL рассчитываем по форме, представленной в табл. 2.10.

Таблица 2.10. Последовательность расчета уровня звукового давления ΔL , дБ, при использовании звукопоглощающей облицовки

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
μ	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6
$B_{1000} = V/20 = 3880/20$	194	194	194	194	194	194	194	194
$B = \mu B_{1000}$	97	97	106,7	135,8	194	310	582	1164
S	2148	2148	2148	2148	2148	2148	2148	2148

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
B/S	0,045	0,045	0,049	0,063	0,09	0,144	0,27	0,541
$B/(S+1)$	1,045	1,045	1,049	1,063	1,09	1,144	1,27	1,541
$A = \frac{B}{B/(S+1)}$	92,8	92,8	101,7	127,7	177,9	270	458	755
$\alpha = B/(B+S)$	0,043	0,043	0,04	0,059	0,086	0,126	0,213	0,35
$\alpha_{\text{обл}} \text{ (ПА/С)}$	0,02	0,05	0,21	0,66	0,91	0,95	0,89	0,7
$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} S_{\text{обл}}$ ($S_{\text{обл}} = 864 \text{ м}^2$)	17,2	43,2	181	570	786	820	768	604
$A_1 = \alpha(S - S_{\text{обл}})$	55	55	51	75	110	161	273	449
$A_1 + \Delta A$	72,2	98,2	232	645	896	981	1041	1053
$\alpha_1 = (A_1 + \Delta A)/S$	0,033	0,045	0,1	0,3	0,41	0,45	0,48	0,49
$1 - \alpha_1$	0,967	0,955	0,9	0,7	0,69	0,65	0,52	0,51
$B_1 = (A_1 + \Delta A)/(1 - \alpha_1)$	75,6	102,6	257	921	1298	1509	2001	2064
B_1/B	0,78	1,05	2,42	6,82	6,69	4,86	3,43	1,77
$\Delta L = 10 \lg (B_1/B)$	-1,19	0,2	3,8	8,3	8,2	6,8	5,3	2,4

Как видно из приведенного расчета, использование для акустической обработки арматурного цеха звукопоглощающих плит марки ПА/С обеспечивает снижение уровней отраженного звука в расчетной точке от 2 до 8 дБ на частотах 250...8000 Гц. В результате уровни звукового давления на рабочих местах на частотах 250...8000 Гц уменьшились несколько ниже требуемой гигиенической нормы.

2.8.2. Расчет звукоизолирующей способности ограждений

Очень важным вопросом при решении задач, связанных с борьбой с шумами, является оценка способности ограждений снижать уровни звуковой энергии. Понятие разности уровней, т. е. отношение падающей энергии к энергии, проникшей через ограждения, не

определяет качества изоляции конструкции, так как уровень шума в помещении зависит от внутреннего звукопоглощения.

Чем больше звукопоглощение в изолируемом помещении, называемом помещением низкого уровня, тем больше значение разности уровней. Чтобы оценить эффективность конструкции с исключением влияния звукопоглощения, введено понятие *звукоизолирующей способности*.

Для оценки звукоизолирующей способности преграды следует ознакомиться еще с одним весьма существенным акустическим параметром — звукопроницаемостью. Под *звукопроницаемостью* τ понимают отношение энергии, проникшей через бесконечно протяженную преграду в полупространство, к энергии, падающей на ту же преграду из соседнего полупространства.

Математически это выражается так:

$$\frac{w_{0\text{ пр}}}{w_{0\text{ пад}}} = \tau,$$

где $w_{0\text{ пр}}$ — количество энергии в единице объема за ограждением (плотность энергии), Дж/м³; $w_{0\text{ пад}}$ — то же, перед ограждением, в помещении высокого уровня, т. е. в котором находится источник шума, Дж/м³.

Десять десятичных логарифмов величины, обратной коэффициенту звукопроницаемости, и называются звукоизолирующей способностью:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{w_{0\text{ пад}}}{w_{0\text{ пр}}}.$$

Эта величина является эталоном сравнения акустических качеств разного рода ограждений. Звукоизолирующая способность связана с коэффициентом звукопроницаемости зависимостью $\tau = 1/10^{0,1R}$.

Разность давлений по обе стороны перегородки, деленная на колебательную скорость, называется сквозным или разделительным импедансом слоя перегородки или звукового ее сопротивления:

$$(p_1 - p_2)/\dot{\xi} = i\omega m.$$

Импеданс ограждения зависит только от частоты и колеблющейся массы:

$$Z = i\omega m.$$

Известно, что интенсивность звуковой энергии пропорциональна квадрату давления или скорости, причем коэффициентом пропорциональности является характеристическое волновое сопротивление ρc :

$$J = \dot{\xi}^2 \rho c.$$

Принимая во внимание, что $p_a = \dot{\xi} \rho c$, получим

$$J = p_a^2 / \rho c. \quad (2.30)$$

Колебательная же скорость в прилегающем к перегородке с обеих сторон слое воздуха и скорость самой перегородки идентичны. Колебательная скорость в воздухе перед перегородкой равна сумме скоростей в прямой и отраженной волнах. Давление со стороны падающего звука больше, чем в волне, образовавшейся в соседнем помещении при поршневом движении ограждения.

Отношение давлений по обеим сторонам перегородки можно считать коэффициентом передачи:

$$\frac{p_1}{p_2} = 1 + \frac{i\omega m}{\rho c}. \quad (2.31)$$

На основании зависимости (2.30) можно уравнение (2.31) представить в следующем виде:

$$\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 = \left(1 + \frac{i\omega m}{\rho c} \right)^2,$$

тогда квадрат отношения звуковых давлений заменится отношением энергии, и уравнение можно переписать в логарифмической форме:

$$2 \lg \frac{p_1}{p_2} = 2 \lg \left(1 + \frac{\omega m}{\rho c} \right). \quad (2.32)$$

Для оценки звукоизоляции, а также уровней интенсивности звука или шума принято пользоваться в десять раз более мелкими единицами — децибелами. В этом случае уравнение (2.32) принимает вид

$$20 \lg \frac{p_1}{p_2} = 20 \lg \left(1 + \frac{\omega m}{\rho c} \right).$$

Отношение $20 \lg (p_1/p_2)$ называется разностью уровней. Оно может быть представлено как

$$20 \lg \frac{p_1}{p_0} - 20 \lg \frac{p_2}{p_0},$$

здесь p_0 — условный звуковой порог, равный 10^{-5} Па.

Таким образом, величина разностей уровней зависит от частоты звука, падающего на ограждение, и от массивности последнего.

Известно, что в зависимости от угла падения звуковой волны на ограждение изменяется его звукоизолирующая способность. При падении звуковых волн под разными углами уравнение скоростей имеет следующий вид:

$$\dot{\xi} \cos \varphi = \dot{\xi}_{\text{нр}} \cos \varphi + \dot{\xi}_{\text{от}} \cos \varphi.$$

Колебательная скорость падающей волны идентична скорости волны, проникшей за преграду, следовательно,

$$\dot{\xi}_1 \cos \varphi = \dot{\xi}_2 \cos \varphi,$$

где $\dot{\xi}_1$ и $\dot{\xi}_2$ — скорости волны соответственно перед преградой и за ней; φ — угол падения звуковой волны на преграду.

Уравнение движения с учетом угла падения звуковой волны запишется так:

$$p_1 - p_2 = m i \omega \dot{\xi}_2 \cos \varphi. \quad (2.33)$$

Согласно принятым обозначениям имеем $p_2 = \rho c \dot{\xi}_2$. Подставляя значения p_2 в формулу (2.33), получаем

$$p_1 = \rho c \dot{\xi}_2 + m i \omega \dot{\xi}_2 \cos \varphi.$$

Следовательно, можно записать

$$p_1 = (\rho c + m i \omega \cos \varphi) \dot{\xi}_2.$$

Определяя отношение p_1/p_2 , получим коэффициент передачи

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{(\rho c + i \omega m \cos \varphi) \dot{\xi}_2}{\rho c \dot{\xi}_2} = 1 + \frac{i \omega m \cos \varphi}{\rho c}.$$

Коэффициент передачи может быть выражен через разность уровней. Как было показано выше, он пропорционален отношению энергий, следовательно,

$$10 \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 = 10 \lg \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\omega m \cos \varphi}{\rho c} \right)^2} \right)^2.$$

Определяя количественно величину звукоизолирующей способности и вследствие малости пренебрегая единицей, получим:

$$10 \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 = 10 \lg \left(\frac{\omega m \cos \varphi}{\rho c} \right)^2.$$

На единице поверхности масса m равна произведению плотности материала ρ на его толщину d , тогда

$$20 \lg \frac{p_1}{p_2} = 20 \lg \frac{\omega \rho d \cos \varphi}{\rho c}. \quad (2.34)$$

Из формулы (2.34) следует, что разность уровней по обеим сторонам ограждения при его размерах, соизмеримых с длиной волны, является функцией угла падения звуковых волн.

Изменение угла падения звуковых волн влияет на звукоизоляцию, так как звуковое давление волны, падающей под углом φ , $p_\varphi = p_0 \cos \varphi$.

Звуковое давление p_0 при нормальном падении равно его амплитудному значению; при других углах оно будет функцией значений φ . Разность уровней по обе стороны ограждения, как это следует из формулы (2.34), также является функцией угла падения звуковых волн.

При нормальном падении волн звукоизолирующая способность ограждения максимальна, с увеличением угла падения она уменьшается и при касательных волнах ($\varphi = 90^\circ$; $\cos \varphi = 0$) преграда теоретически делается «акустически прозрачной».

Следовательно, звукоизолирующая способность ограждений больших размеров, которые устанавливаются в больших помещениях, будет хуже, чем тех же ограждений в малых помещениях. Зависимость звукоизоляции ограждения R от его массы, частоты возбуждающего звука и углов падения звуковых волн выражается полуэмпирической формулой

$$R = 20 \lg m + 20 \lg f - 54, \quad (2.35)$$

где m — масса 1 м² ограждения заданной толщины, кг; f — частота звука, Гц.

Допустим, имеются два смежных помещения: в одном из них находится источник звука, в другом — приемник. Источник шума в помещении излучает в воздух звуковую энергию. Среднее звуковое давление в помещении с высоким уровнем шума

$$p_1 = \sqrt{\frac{4\Phi\rho c}{A}};$$

здесь Φ — излучаемая в воздух акустическая мощность, Вт.

Поглощение звука поверхностями, имеющими площади S_1, S_2 и т. д., будет равно $A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$, или

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i.$$

Полное внутреннее звукопоглощение в помещении с высоким уровнем шума будет A_1 , в помещении с низким уровнем — A_2 . Если разность уровней шума зависит от размеров ограждения и звукопоглощения помещения, то звукоизолирующая способность должна исключить эти условия. Итак, мы имеем в помещении с высоким уровнем шума звуковое давление p_1 , в помещении с низким уровнем — давление p_2 .

Звуковое давление p_2 будет тем меньше, чем меньше поверхность ограждения и больше полное внутреннее поглощение в помещении с низким уровнем шума. На основании этого можно было бы записать

$$p_2^2 = \frac{p_1^2 S}{A_2}.$$

Однако необходимо учесть коэффициент звукопроводности стены τ , характеризующий ее звукоизолирующую способность. Тогда

$$p_2^2 = \frac{p_1^2 S \tau}{A_2}.$$

Определяя разность уровней, которая пропорциональна квадратам давлений, получим

$$10 \lg \frac{p_1^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{p_2^2}{p_0^2} + 10 \lg \frac{A_2}{S \tau}.$$

Обозначая $20 \lg p_1/p_0$ через L_1 , а $20 \lg p_2/p_0$ через L_2 и учитывая, что $R = 10 \lg 1/\tau$, получим

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2}. \quad (2.36)$$

Все расчеты по определению звукоизолирующей способности ограждений производят по формуле (2.36).

Для определения разности уровней формулу (2.36) перепишем так:

$$L_1 - L_2 = R + 10 \lg \frac{A_2}{S}. \quad (2.37)$$

Комбинируя формулы (2.35) и (2.37), можно, зная массу m 1 м² поверхности ограждения, частоту звука f , площадь стены S и полное внутреннее звукопоглощение помещения с низким уровнем шума R , определить разность уровней:

$$L_1 - L_2 = (20 \lg m + 20 \lg f - 54) + 10 \lg \frac{A_2}{S}. \quad (2.38)$$

Пример 2.10. Стена массой 100 кг имеет площадь 20 м². Полное звукопоглощение в помещении с низким уровнем шума $A_2 = 60$ м², частота звука $f = 1000$ Гц. Определить снижение уровня шума в низкошумном помещении.

Решение. Подставляя известные величины в формулу (2.38), получим:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 20 \lg 100 + 20 \lg 1000 - 54 + 10 \lg \frac{60}{20} = 50,8 \text{ дБ},$$

т. е. снижение сигнала любого уровня в помещении с низким уровнем шума при заданной площади и поглощении на частоте 1000 Гц будет равно 50,8 дБ.

Так, если в помещении с высоким уровнем шума задать сигнал уровнем $L_1 = 79$ дБ, то в помещении с низким уровнем шума уровень сигнала $L_2 = L_1 - \Delta L = 79 - 50,8 = 28$ дБ. При уровне заданного сигнала $L_1 = 100$ дБ принимаемый уровень $L_2 = L_1 - \Delta L = 100 - 50,8 = 49,2$ дБ и т. д.

Пример 2.11. Запроектировать звукоизолирующую перегородку, отделяющую комнату отдыха от помещения цеха формовки железобетонных изделий. Рассчитать звукоизоляцию R по уравнению

$$R = 20 \lg mf - 47,5 \text{ дБ},$$

где m — масса 1 м² перегородки, кг; f — частота звука: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. Перегородка делается из кирпича толщиной 12,5 см, т. е. в 1/2 кирпича.

Звукоизоляцию рассчитывают на каждой из указанных частот. По результатам расчета строят график звукоизоляции.

Решение. Масса 1 м² перегородки составит

$$m = V\rho = 1 \cdot 1 \cdot 0,125 \cdot 1800 = 225 \text{ кг},$$

где V — объем перегородки, м³; ρ — плотность материала, т/м³ ($\rho = 1800$ кг/м³).

Рассчитываем звукоизоляцию на частотах 31,5...8000 Гц:

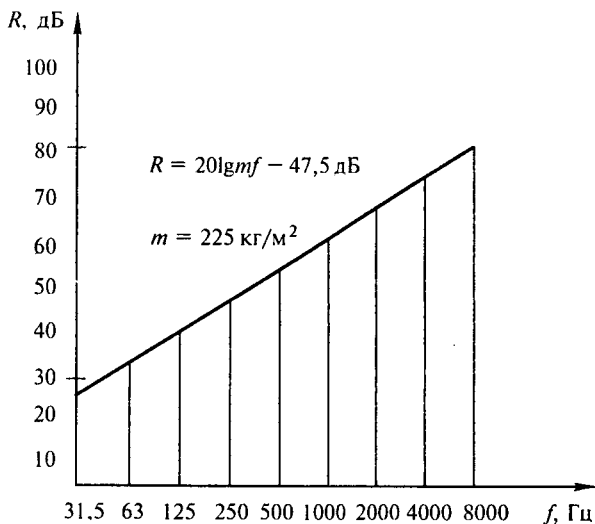
$$R_{31,5} = 20 \lg 225 \cdot 31,5 - 47,5 = 29,3 \text{ дБ};$$

$$R_{63} = 35,5 \text{ дБ}; \quad R_{125} = 41,5 \text{ дБ}; \quad R_{250} = 47,5 \text{ дБ};$$

$$R_{500} = 53,5 \text{ дБ}; \quad R_{1000} = 59,5 \text{ дБ};$$

$$R_{2000} = 65,5 \text{ дБ}; \quad R_{4000} = 71,5 \text{ дБ}; \quad R_{8000} = 77,6 \text{ дБ}.$$

По полученным результатам строим график звукоизоляции кирпичной перегородки толщиной 12,5 см (рис. 2.42).



Р и с. 2.42. График звукоизоляции кирпичной перегородки толщиной 12,5 см

На собственных частотах звукоизоляция массивных ограждений резко уменьшается. Для увеличения звукоизоляции применяют слоистые ограждающие конструкции. В них жесткие элементы, имеющие большую массу, чередуются с гибкими слоями (воздушные зазоры, упругие прокладки и т. п.).

Для увеличения звукоизолирующих свойств сплошного ограждения от импульсного шума, возникающего от непосредственных ударов по ограждению, последние выполняют из чередующихся модулей, резко отличающихся по плотности и модулю упругости. При этом также используют звукопоглощающие слои.

2.8.3. Определение уровня шума, проникшего через ограждения

Часто бывает необходимо определить уровень шума в изолируемом помещении, если известен уровень шума вне его, например при оценке эффективности ограждения или изоляции тихой камеры, установленной в шумном помещении.

Допустим, что через поверхность ограждения площадью S с коэффициентом звукопроницаемости τ пройдет поток звуковой энергии w_0 , тогда

$$\frac{w_0 S \tau}{A} = \frac{4\Phi_1}{Ac},$$

откуда

$$\Phi_1 = \frac{w_0 c S \tau}{4},$$

где Φ_1 — звуковая мощность, Вт; A — полное звукопоглощение помещения, м².

Установившаяся при этом плотность звуковой энергии в помещении согласно формуле (2.19)

$$w_{01} = \frac{4\Phi_1}{Ac}.$$

Подставляя в эту формулу значение Φ_1 и выражая коэффициент τ через звукоизолирующую способность R , получим выражение для определения плотности звуковой энергии в диффузном поле помещения низкого уровня:

$$w_{01} = \frac{w_0 \sum_{i=1}^n S_i 10^{-R/10}}{A}.$$

Оценивая уровень интенсивности звука в помещении низкого уровня при условии, что L_1 — уровень шума, от которого мы изолируемся, и считая, что $w_0 c = J$, имеем

$$L_1 = 10 \lg \frac{w_0}{w_{01}} = 10 \lg \frac{J_0}{J_{01}},$$

где J_{01} — интенсивность звуковой энергии у порога слышимости, Вт/м².

Уровень интенсивности звука в помещении низкого уровня, дБ, определим по формуле

$$10 \lg \frac{J_1}{J_{01}} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_1 - R)/10}}{A}.$$

После преобразования получим выражение для определения уровня интенсивности шума, проникающего в помещение:

$$L_2 = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_1 - R)/10} - 10 \lg \frac{A}{A_0}, \quad (2.39)$$

где $\sum S_i$ — сумма поверхностей, звукоизоляция для каждой из которых R оценивается расчетом; A_0 — звукопоглощение, равное единице ($10 \lg A_0 = 0$).

Если известна реверберация помещения, то формула (2.39) примет вид

$$L_2 = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_1 - R)/10} - 10 \lg \left| 0,164 \frac{V}{T_p} \right|, \quad (2.40)$$

где V — объем помещения; T_p — время реверберации на исследуемой частоте.

Описанная методика определения уровня интенсивности шума, проникающего через ограждения, предполагает знание частотного спектра действующих на ограждение шумов, а также значений звукоизолирующей способности ограждений по частотам и частотных значений звукопоглощающего фонда исследуемого помещения.

Пример 2.12. Площади поверхностей, ограждающих кабину, составляют: потолок 12 м^2 , пол 12 м^2 , четыре стены $29,4 \text{ м}^2$, всего $53,4 \text{ м}^2$. Элементы ограждения имеют массу: железобетонная стена толщиной 50 мм — 120 кг , штукатурка толщиной 25 мм — 40 кг , звукопоглотитель — 3 кг . Масса 1 м^2 ограждения равна 163 кг .

Определить звукоизолирующую способность конструкции и полное звукопоглощение помещения.

Решение. Звукоизолирующая способность конструкции при массе 1 м^2 ограждения до 200 кг равна $R = 13,5 \lg m + 13 \text{ дБ} = 13,5 \lg 163 + 13 = 41 \text{ дБ}$.

Кабину устанавливают в цехе, уровни звукового давления в котором очень высоки:

Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
Уровень звукового давления, дБ	110	119	117	115	114	112

Ниже приведены уровни звукового давления, допускаемые в кабине наблюдателя:

Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
Уровень звукового давления, дБ	87	82	78	75	73	71

Полное звукопоглощение помещения на частоте 1000 Гц принимается равным 40 м^2 . Приведенные исходные данные дают возможность составить расчетную таблицу (табл. 2.11), позволяющую определить величину

$$\sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_1 - R)/10}.$$

Таблица 2.11. Вспомогательная таблица для расчета звукоизоляции на частоте 1000 Гц

Наименование	Поверхность, м ²	Уровень наружного шума, Б	Звукоизоляция, дБ	$10^{(L_1 - R)/10}$	$S \cdot 10^{(L_0 - R)/10}$
Потолок	288	70	65	3,2	920
Наружная стена	188	64	67	—	—
Стена, смежная с цехом	182	70	63	5	910
То же	110	70	63	5	550
»	110	70	63	5	550
Двери	6	70	37	2000	12 000
Окна	1	70	65	3,2	3
$\sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_0 - R)/10} = 14\,933$					

Пользуясь формулами (2.39) и (2.40), можно определить уровни интенсивности проникающего в помещение шума на заданных частотах звукового диапазона, что дает возможность судить о его допустимости для изолируемого помещения.

Пример 2.13. Рассчитать на частоте 1000 Гц уровень проникающего шума в помещение с высокой звукоизолирующей способностью ограждений. Расчет в рассматриваемом примере будем вести на одной частоте.

Уровень интенсивности шума вне помещения составляет 64 дБ, а в соседних помещениях — 70 дБ. Ограждения помещения, включенные в расчет, имеют следующую звукоизолирующую способность R : перекрытия — 65 дБ, наружная стена — 67, внутренние стены — 63, двери в помещение — 37, окно тройного остекления — 65 дБ. Полное внутреннее звукопоглощение помещения A равно 40 м².

Решение. Уровень проникающего в помещение шума в заданных условиях по формуле (2.39) составит

$$L_{1000} = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i 10^{(L_1 - R)/10} - 10 \lg \frac{A}{A_0} = 10 \lg 14\,933 - 10 \lg 40 = 25 \text{ дБ.}$$

Здесь $A_0 = 1$.

Проведя подобный расчет на других частотах, можно определить форму частотной характеристики проникающего в помеще-

ние шума и оценить его допустимость согласно действующим нормативам.

Агрегат, производящий шум, может быть огражден специальным кожухом. Необходимо, чтобы кожух не нарушал технологического процесса, обеспечивая в то же время достаточную защиту от шума.

При конструировании кожухов необходимо знать разность внутреннего L_v и наружного L_n шума ($L_v > L_n$).

Используем для расчета формулу (2.36), видоизменив ее:

$$L_v - L_n = R + 10 \lg \frac{A}{S} = R + 10 \lg \frac{\alpha S}{S}.$$

Предполагая, что все внутренние поверхности под кожухом покрыты звукопоглощающим материалом с коэффициентом звукопоглощения α , получим

$$L_v - L_n = R + 10 \lg \alpha.$$

На рис. 2.43 показаны кривые звукоизолирующей способности дюралюминиевой панели кожуха полуцилиндрической формы толщиной 2 мм с ребрами жесткости, расположенными через каждые 500 мм. Дюралюминиевую панель оклеивали различными материалами.

R , дБ

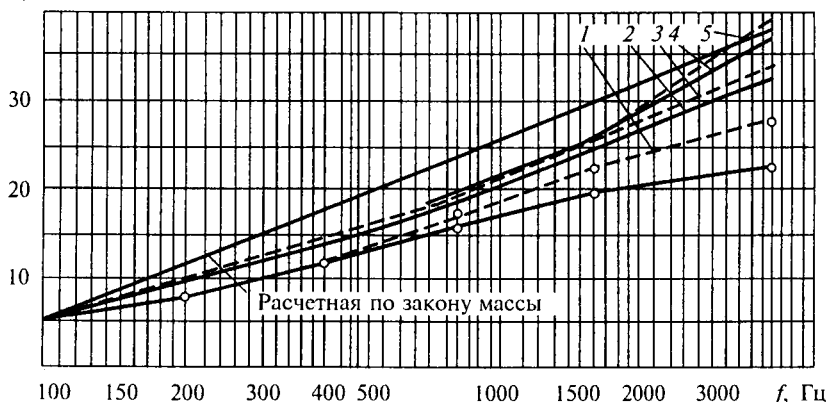


Рис. 2.43. Частотная характеристика звукоизолирующей способности дюралевой панели с различными заполнителями и разной толщиной слоя:

1 — резина (6 мм); 2 — стекловата в шелковой материи (20 мм); 3 — капроновые маты, склеенные полиамидным лаком (20 мм); 4 — стекловата на стеклохолсте (20 мм); 5 — стекловата на стеклохолсте, связанная смолой (20 мм)

Из графика видно, что увеличение толщины и количества звукопоглощающих слоев дает заметный эффект только в области высоких частот (выше 2000 Гц).

Определим граничную частоту волнового совпадения для конструкции из дюралюминия толщиной $h = 2$ мм:

$$f_{\text{гр}} = \frac{6,42 \cdot 10^4}{c_1 h} = \frac{6,42 \cdot 10^4}{5,1 \cdot 10^3 \cdot 0,002} = 6420 \text{ Гц},$$

где $c_1 = 5100$ м/с — скорость распространения звуковых волн в дюралюминии.

Полученная частота лежит за пределами интересующего нас диапазона звуковых частот. Следовательно, на рисунке имеем частотную область, на протяжении которой идет монотонное увеличение звукоизолирующей способности стенок кожуха.

При монтаже кожухи необходимо устанавливать на лентах из упругих прокладок (типа мягких резин), прокладываясь по периметру.

Требуемую эффективность $\Delta L_{\text{тр}}^k$ звукоизолирующего кожуха рассчитывают по формуле

$$\Delta L_{\text{тр}}^k \cong L_p - L_{\text{доп}} + 5,$$

где L_p — уровень звукового давления в зоне измерения или в расчетной точке, дБ; $L_{\text{доп}}$ — нормированный (допустимый) уровень, дБ.

Принято считать, что фактическое снижение шума в результате применения кожуха $\Delta L^k \geq \Delta L_{\text{тр}}^k$.

Суммарное снижение шума с помощью звукоизолирующего кожуха с учетом его звукопоглощения и его размеров, особенностей источника шума и других факторов можно выразить приближенным соотношением с учетом (2.20):

$$\Delta L \cong 10 \lg \frac{1}{\tau} + 10 \lg \frac{S}{\sum \alpha S_i} + \Delta S \cong S_{\text{и}} + \Delta S,$$

где ΔS — дополнительная звукоизоляция облицовки, дБ (табл. 2.12).

Значения ΔS , указанные в табл. 2.12, даны для звукопоглощающего материала в виде слоя супертонкого стеклянного или базальтового волокна толщиной 30...50 мм, плотностью 20 кг/м³ либо в виде слоя полужестких минераловатных плит толщиной 50...80 мм, плотностью 100 кг/м³. В случае недостаточного значения ΔL по сравнению с требуемым значением увеличивают толщину звукопоглощающего материала либо заменяют поглотитель и отражающие стенки на более эффективные материалы.

Таблица 2.12. Значения дополнительной звукоизоляции ΔS , дБ, для октавных полос частот

Размер стенки кожуха, мм	Дополнительная звукоизоляция для октавных полос частот							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$l < 1$	—	1	2	5	6	8	9	10
$l > 2$	1	2	4	8	12	16	20	22

Для удобства расчетов в табл. 2.13 приведены ориентировочные характеристики звукопоглощения двух наиболее характерных типов звукоизолирующих капотов.

Таблица 2.13. Средние коэффициенты звукопоглощения α звукоизолирующих капотов

Капоты	Октавные полосы частот, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Без звукопоглощающей облицовки с небольшим проемом	0,19	0,22	0,25	0,27	0,3	0,3	0,33	0,35
Со звукопоглощающей облицовкой	0,25	0,25	0,3	0,55	0,7	0,65	0,6	0,7

Пример 2.14. Рассчитать звукоизолирующий кожух в виде плоских поверхностей для привода виброплощадки. Кожух состоит из металлического каркаса из листовой стали толщиной $h = 1,5$ мм и ребер жесткости из угловой стали 25×25 мм. Снаружи он покрыт вибродемпфирующей мастикой «Антивибрит-2» или пластиком № 378, или линолеумом негорящим НЛ толщиной 2...3 мм. Изнутри он облицован звукопоглощающим материалом толщиной до 30 мм, например матами из сверхтонкого стекловолокна или оболочками из стеклоткани, или любым другим пористым материалом с аналогичными звукопоглощающими свойствами. Кожух устанавливают на виброизолирующие прокладки, снижающие его вибрацию и, следовательно, уменьшающие шум.

Решение. Определим требуемую частотную характеристику изоляции воздушного шума стенками кожуха в октавных полосах по формуле

$$R_{\text{тр}} = L_p - L_{\text{доп}} - 10 \lg \alpha + 5 \text{ дБ},$$

где L_p — октавный уровень звукового давления в расчетной точке, полученный по результатам измерений шума, дБ; $L_{\text{доп}}$ — допустимый октавный

уровень звукового давления на рабочих местах, дБ (по ГОСТ 12.1.003—83; СН 224/218-562—96); α — реверберационный коэффициент звукопоглощения внутренней облицовки кожуха. Результаты вычислений сводим в табл. 2.14.

Таблица 2.14. Расчет звукоизоляции кожуха

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p (по результатам натуральных измерений), дБ	102	96	94	85	82	79	78	72
$L_{\text{доп}}$ (СН 224/218-562—96)	96	92	86	83	80	78	76	74
α	0,1	0,4	0,85	0,98	1,0	0,93	0,97	1,0
$-10 \lg \alpha$	-10	-3,9	-0,7	-0,08	0	-0,3	-0,13	0
$R = L_p - L_{\text{доп}} - 10 \lg \alpha + 5$	18	12,9	13,7	7,08	7	6,3	7,13	3,0
Требуемая изоляция кожуха $R_{\text{тр}}$, дБ	15	19	23	27	31	35	39	31

Требуемую звукоизоляцию кожуха $R_{\text{тр}}$ строим по данным табл. 2.14.

Частотную характеристику звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций из металла, стекла, сухой штукатурки определяют графическим способом. Частотная характеристика звукоизоляции кожуха R представлена в виде ломаной линии $ABCD$ (рис. 2.44).

Вначале находят координаты точек B и C , а затем от них строят прямые BA и CD . Точки B и C соединяют прямой линией. Наклон отрезка BA на графике следует принимать равным 5 дБ на каждую октаву для глухих од-

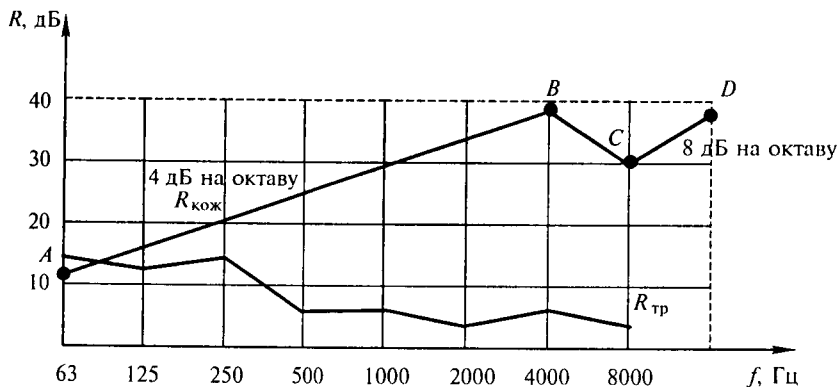


Рис. 2.44. Схема графического построения кривой фактической звукоизоляции кожуха $R_{\text{кож}}$ и график требуемой звукоизоляции $R_{\text{тр}}$

нослойных ограждений из силикатного и органического стекла и 4 дБ на каждую октаву для ограждений, выполненных из других материалов. Наклон отрезка CD составляет 8 дБ на каждую октаву.

Определяем абсциссы точек B и C : $f_B = 6000/h = 6000/1,5 = 4000$ Гц;
 $f_C = 12\,000/h = 12\,000/1,5 = 8000$ Гц.

По табл. 2.15 принимаем ординаты точек B и C : $R_C = 31$ дБ; $R_B = 39$ дБ.

Таблица 2.15. Частотная характеристика звукоизоляции однослойных ограждений

Материал	f_B	f_C	R_B	R_C
Сталь	$6000/h$	$12\,000/h$	39	31
Алюминиевые сплавы	$6000/h$	$12\,000/h$	32	22
Стекло	$6000/h$	$12\,000/h$	35	29
Стекло органическое	$17\,000/h$	$34\,000/h$	37	30
Асбестоцементные листы	$11\,000/h$	$22\,000/h$	36	30

Примечание: h — толщина каркаса кожуха без учета ребер жесткости, мм.

По полученным значениям f_B , f_C , R_B , R_C , зная правило построения отрезков BA и CD , строим фактическую характеристику изоляции R от воздушного шума металлическим кожухом с толщиной стенки 1,5 мм (см. рис. 2.44). Как видно из рисунка, фактическая звукоизоляция кожуха на всех частотах спектра больше, чем требуемая по нормам.

2.8.4. Расчет глушителей шума

Методика расчета глушителей включает:

1. Определение допустимого уровня шума $[L]$ для данного вида производства. Шум, проникающий в помещение через решетки вентиляционных каналов, должен быть на 8...10 дБ ниже допустимого уровня шума для данного помещения. Некоторое увеличение допустимого уровня на низкочастотном участке звукового диапазона возможно потому, что ухо человека имеет неодинаковую чувствительность к восприятию звуков различной высоты: на низких частотах чувствительность уха уменьшается.

2. Определение требуемой эффективности снижения уровня акустической мощности исходя из значений величин, полученных в п. 1. Снижение уровня мощности шума ΔL_p в глушителе определяется по формуле

$$\Delta L_p = L_p - [L] - 20 \lg r - \Delta L_a - 10 \lg \Omega, \quad (2.41)$$

где L_p — уровень акустической мощности источника, дБ; $[L]$ — допустимый уровень шума, дБ; r — расстояние от установки до точки наблюдения, м; ΔL_a — снижение уровня шума в атмосфере, дБ; Ω — телесный угол, в который происходит излучение, ст. рад.

3. Выбор глушителя.

4. Гидравлический расчет глушителя.

Абсорбционные камерные и пластинчатые глушители. Для расчета глушителя необходимо знать уровень и частотную характеристику допускаемого шума. Требуемое затухание в глушителе (для данной полосы частот) равно разности между имеющимся и допустимым уровнем шума с учетом ослабления шума в самом канале (при отсутствии глушителя). Если спектр шума занимает узкую полосу частот и неравномерность частотной характеристики в пределах этой полосы невелика, вместо расчета по частотам можно рассчитывать глушитель по общему уровню шума.

Обозначим уровень акустической мощности вентилятора через L_p , дБ, снижение уровня шума, полученное при прохождении воздуха по воздуховодам, через ΔL_b , дБ, снижение уровней шума в глушителях камерного типа через ΔL_k , дБ, пластинчатого типа — через ΔL_n , дБ. Для получения практически бесшумного вентилятора должно соблюдаться равенство, действительное для указанной области частот:

для камерного глушителя

$$L_p - \Delta L_b - \Delta L_k = [L], \quad (2.42)$$

где $[L]$ — допустимый уровень шума на всем участке звуковых частот для этого типа глушителей;

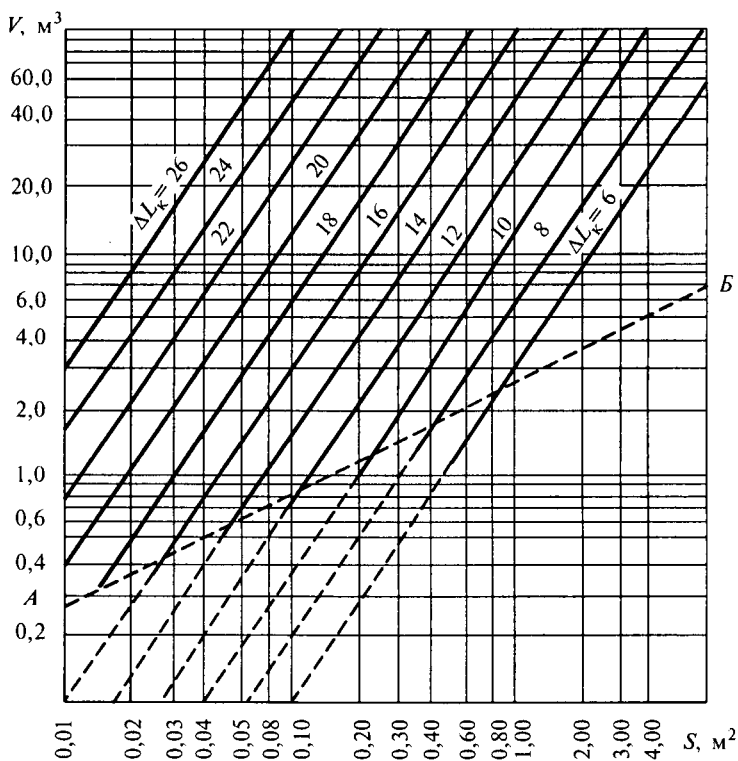
для пластинчатого глушителя

$$L_p - \Delta L_b - \Delta L_n = [L] \quad (\text{на средних частотах}); \quad (2.43)$$

$$L_p - \Delta L_b - \Delta L_n = [L] - 10 \quad (\text{на высоких частотах}). \quad (2.44)$$

При устройстве камерного глушителя со средним коэффициентом звукопоглощения $\bar{\alpha} = 0,4$ определяют требуемую величину $\Delta L_k = L_p - \Delta L_b - [L]$ и находят ее по графику, показанному на рис. 2.45. Затем по нижней оси абсцисс находят значение принятого сечения канала и в месте их пересечения по оси ординат (слева) определяют необходимый объем камеры глушителя, снижающий шум на заданную величину ΔL_k .

Высокочастотный шум, проникающий в помещение через решетки вентиляционных каналов, должен быть на 8...10 дБ ниже допустимого для данного помещения.



Р и с. 2.45. Номограмма для расчета эффективности камерного глушителя:

V — объем камеры глушителя; S — площадь поперечного сечения канала;
 ΔL_k — снижение уровня шума

Порядок приближенного расчета снижения уровня шума в глушителях при расположении звукопоглощающего материала на плоской стене следующий:

1. Определяется частотная характеристика снижения уровня аэродинамического шума, которую должен обеспечить проектируемый глушитель, по формуле (2.41).

Выбирается проходное сечение глушителя S в зависимости от требований компоновки и гидравлического сопротивления. Скорость движения газов в глушителе обычно не должна превышать 20...40 м/с.

2. Определяется толщина звукопоглощающего материала. При расположении материала на жесткой стенке оптимальная толщина его

$$h = \frac{c_n}{bf},$$

Таблица 2.16. Скорость распространения звука c_n , м/с

Материал	Плотность, кг/м³	Частота, Гц									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Хлопчатобумажная вата, пропитанная антипиреном	60	40	50	52	54	57	57	62	60	62	62
Стекланная вата (диаметр волокна 20 мкм)	140	—	—	70	110	150	170	190	200	200	200
Шлаковая вата	150	115	120	130	130	130	135	140	140	150	160
Капроновое волокно	60	150	150	170	200	210	200	230	240	240	240
Пенопласт пенополиуретановый эластичный	45	100	110	130	150	155	165	160	155	140	125
Строительный гравий (диаметр частиц 3...5 мкм)	1500	110	150	170	200	210	270	230	240	245	245

где c_n — скорость распространения звука в звукопоглощающем материале, м/с (табл. 2.16); b — коэффициент, зависящий от формы канала ($b = 4$ для канала, облицованного со всех сторон; $b = 2$ для канала, облицованного с двух сторон); f — частота заглушаемого звука, Гц.

В этом случае на поверхности звукопоглощающего материала имеет место максимум колебательной скорости, вследствие чего происходит эффективное поглощение энергии.

Увеличение толщины слоя звукопоглощающего материала снижает уровень звука в области низких частот, но увеличивает массу и стоимость конструкции. Уменьшение толщины слоя снижает скорость газового потока и, следовательно, гидравлическое сопротивление, а также габариты устройства и его стоимость, но одновременно уменьшает эффективность поглощения от снижения акустической мощности в глушителе.

3. Определяется величина снижения уровня акустической мощности ΔL_{p_1} в глушителе на длине, равной одному калибру. Это может быть сделано по табличным данным для некоторых схем глушителей (табл. 2.17).

Следует иметь в виду, что максимальное звукопоглощение будет наблюдаться при выполнении условия $f_{\max} < f_{\text{гр}}$, где $f_{\max}$ — наибольшая частота заглушаемого звука, Гц; $f_{\text{гр}}$ — граничная частота, выше которой звуковая волна делается неплоской, т. е. для этой частоты один из поперечных размеров канала равен половине длины волны: $f_{\text{гр}} = c/2a$ (a — размер поперечного сечения канала, м).

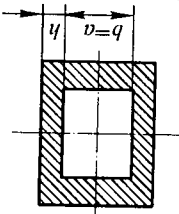
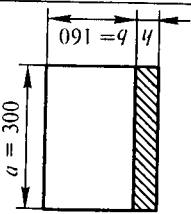
4. В диапазоне возникновения мод колебания газа в объеме глушителя, т. е. при $f > f_{\text{гр}}$, существенно уменьшается величина снижения уровня шума из-за «лучевого эффекта», под которым подразумевается звуковой луч, идущий по оси симметрии канала. Для устранения этого нежелательного явления изменяют продольную форму канала с тем, чтобы звуковые волны испытывали многократные отражения и при этом теряли значительную часть звуковой энергии. Примером такого решения являются глушители с поворотами.

5. Определяется количество калибров n , необходимое для требуемого снижения уровня акустической мощности:

$$n = \Delta L_p / \Delta L_{p_1}, \quad (2.45)$$

где ΔL_p — снижение уровня мощности, который необходимо получить по расчету, дБ; ΔL_{p_1} — снижение уровня мощности на один калибр, дБ.

Таблица 2.17. Снижение уровня акустической мощности $\Delta L_{P,1}$, дБ, в глушителе на длине, равной одному калибру

Схема глушителя	Параметры глушителя		Частота, Гц								
	Материал	Плотность, кг/м ³	Толщина слоя, мм	50	100	200	400	800	1600	3200	6400
	Минеральная вата	150	50	—	0,8	0,8	2	2,4	4,5	2,4	2
			200	1,5	2,7	3,5	4,8	4,5	4,5	2,6	2,4
	Капроновая вата	60	100	1,2	2,5	3,5	3	3,2	5	2,4	2,4
			200	1,5	3	4	4,5	5	4,7	2,4	2,5
	Керамзитовый гравий	450	100	—	0,5	1,2	1,3	3,2	3	3,7	3,4
			40	2	3	4,2	3,2	6	9,5	11	9
	Капроновая вата	60	100	2,5	3,6	4,8	8,3	11,5	8	3,5	2,5
			100	—	5	6	11	8,7	6	5	3,5
			200	3,5	7,5	7,2	9,8	11	7,8	3,5	3,5

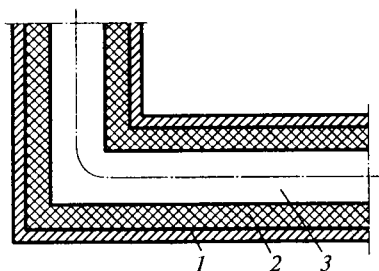


Рис. 2.46. Схема глушителя активного типа изогнутой формы:

1 — стенка канала; 2 — звукопоглощающий материал; 3 — воздуховод

6. Рассчитывается длина l глушителя или части канала, покрытой звукопоглощающим материалом.

При наличии глушителя, состоящего из семейства воздуховодов небольшого сечения, облицованных абсорбентом, рассчитывают снижение уровня шума на калибр одной трубы. Снижение уровня шума в системе многотрубчатого глушителя равно снижению уровня в одной трубе, составляющей деталь его конструкции: $l = nd_3$, где l — длина глушителя; n — число калибров; d_3 — величина калибра данного глушителя.

Если снижение уровня шума на высоких частотах оказывается недостаточным, то применяют активные глушители сложной конфигурации, например изогнутой формы (рис. 2.46).

Расчет снижения уровня шума при повороте газового потока в глушителе (средний коэффициент звукопоглощения облицовочного материала $\alpha = 0,8$) на 90° производится по графику, приведенному на рис. 2.47, а. Эффективность звукопоглощающего материала резко возрастает, начиная с отношения частот $f/f_{тр} = 19$, и далее с увеличением частоты остается постоянной, при этом снижение уровня шума при необлицованном повороте приблизительно на 10 дБ меньше.

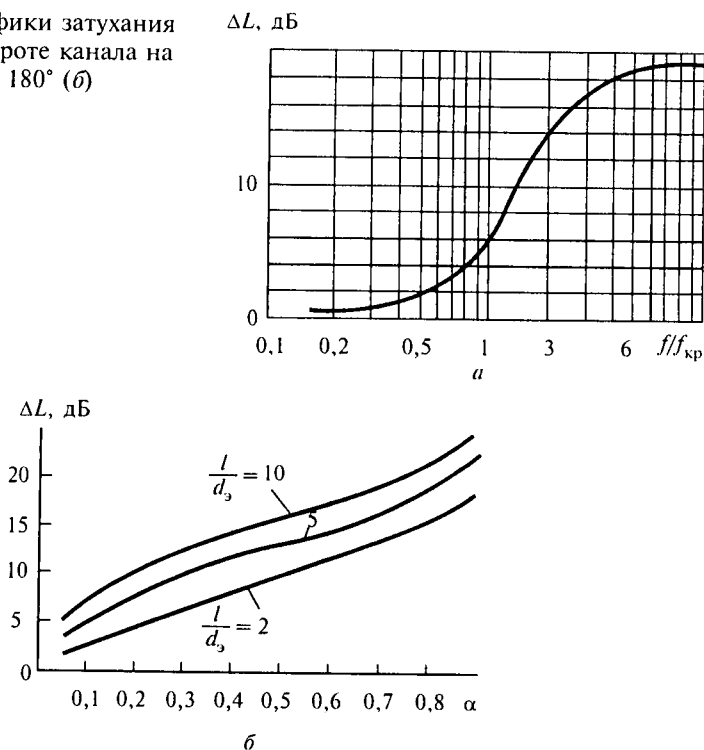
При повороте газового потока на 180° величина снижения уровня шума увеличивается и может быть определена по графику, приведенному на рис. 2.47, б, в функции коэффициента звукопоглощения и отношения длины облицованного канала l к его калибру d_3 .

Снижение уровня шума ΔL на прямых участках канала поперечного сечения S рассчитывают по формуле

$$\Delta L = 1,1 \frac{f(\alpha) \Pi l}{S}, \quad (2.46)$$

где $f(\alpha)$ — условный коэффициент звукопоглощения облицовки глушителя, зависящий от коэффициента звукопоглощения использованного абсорбента; Π — периметр поперечного сечения канала, м; l — длина канала, м; S — площадь поперечного сечения канала, м^2 . Произведение $1,1 f(\alpha) \Pi S^{-1}$ — это снижение уровня шума на 1 пог. м канала.

Р и с. 2.47. Графики затухания шума при повороте канала на 90° (а) и 180° (б)



Для глушителей круглого сечения канала расчет снижения уровня шума следует производить по формуле

$$\Delta L = 4,4 \frac{f(\alpha)l}{d}, \quad (2.47)$$

где d — диаметр канала глушителя.

Снижение уровня шума в пластинчатом глушителе рассчитывают по формуле

$$\Delta L = 2,2 \frac{f(\alpha)l}{a},$$

где a — расстояние между пластинами, м.

Ниже приведены значения $f(\alpha)$ в зависимости от коэффициента звукопоглощения материала α :

α	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f(\alpha)$...	0,1	0,2	0,35	0,5	0,65	0,9	1,2	1,6	2,0	4,0

Из формул (2.46) и (2.47) следует, что для большего снижения шума глушители целесообразно делить перегородками (пластинами) на отдельные соты (сотовые и пластинчатые глушители). Пластины ставят друг от друга на расстоянии 10 см.

Часто щели пластинчатого глушителя заменяют системой каналов очень малого сечения, суммарная рабочая площадь которых равна площади большого канала. Стенки этих каналов также покрывают звукопоглощающими материалами.

Пример 2.15. Рассчитать снижение шума вентилятора производительностью $Q = 150\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($42 \text{ м}^3/\text{с}$) и напором $H = 118 \text{ Па}$. В кирпичной стене имеются вентиляционные каналы длиной 50 м и сечением $0,1 \text{ м}^2$.

Решение. В соответствии с выражением (2.10) уровень звуковой мощности вентилятора

$$\begin{aligned} L_p &= 50 + 25 \lg(9,81H) + 10 \lg Q = \\ &= 50 + 25 \lg(118/9,81) + 10 \lg 42 = 93 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

По формуле (2.45), определяющей число калибров n , необходимое для требуемого снижения уровня акустической мощности, произведем расчет затухания шума в канале при условии затухания $0,35 \text{ дБ/пог. м}$ на частотах $100 \dots 300 \text{ Гц}$: $\Delta L_b = 0,35 \cdot 50 = 17 \text{ дБ}$. При условии затухания $0,55 \text{ дБ/пог. м}$ на частотах выше 500 Гц $\Delta L_b = 0,55 \cdot 50 = 27 \text{ дБ}$.

Рассчитаем по формулам (2.42)–(2.44) требуемое снижение уровня шума, которое должны обеспечить камерный и пластинчатый глушители для всей системы, считая допускаемым уровень вентиляционного шума на низких частотах $[L] = 35 \text{ дБ}$, на высоких — 28 дБ . На низких частотах для камерного глушителя $\Delta L_k = L_p - \Delta L_b - [L] = 93 - 17 - 35 = 41 \text{ дБ}$; на высоких частотах для пластинчатого глушителя $\Delta L_n = L_p - \Delta L_b - [L] + 10 = 93 - 27 - 28 + 10 = 48 \text{ дБ}$.

Для снижения шума на низких частотах на 41 дБ выбираем по графику (см. рис. 2.45) камерный глушитель. Так как в верхней части графика нет величины 41 дБ , берем две камеры, каждая из которых снижает уровень шума на 22 дБ . По графику определяем их объем. Он равен 25 м^3 для каждой камеры при среднем коэффициенте звукопоглощения $\alpha = 0,4$.

Камерный и пластинчатый глушители по произведенным расчетам в равной мере обеспечивают бесшумную вентиляцию в помещениях, в которых проложены каналы.

Приближенные методы расчета активных глушителей основываются на экспериментальных данных. Эксперименты показали, что снижение уровня звука, приходящееся на единицу длины глушителя, является постоянной величиной. За единицу длины принимается 1 пог. м или величина калибра глушителя d_3 , которая определяется по формуле

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi},$$

где S — площадь проходного сечения глушителя, м^2 ; Π — внутренний периметр глушителя, м .

В камере глушителя предполагается диффузное звуковое поле. Плотность диффузной звуковой энергии в воздушном объеме описывается уравнением

$$w_0 = \frac{4\Phi_1}{cA}, \quad (2.48)$$

где Φ_1 — мощность диффузной звуковой энергии.

Выходящий из камеры звуковой поток будет иметь мощность Φ_2 , Вт, в выходном канале сечением S_b (м):

$$\Phi_2 = \frac{w_0 c S_b}{4}. \quad (2.49)$$

Подставляя формулу (2.48) в выражение (2.49), получим

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_1 S_b}{A},$$

откуда снижение уровня шума ΔL , дБ, выходящего из камеры,

$$\Delta L = 10 \lg \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 10 \lg \frac{A}{S_b}$$

или

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{S_b} \right), \quad (2.50)$$

где α_i — коэффициент звукопоглощения i -й поверхности; S_i — i -я внутренняя ограждающая поверхность, м^2 .

Реактивные камерные глушители. Снижение уровня шума однокамерным глушителем может быть определено по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{(m - m^{-1})^2}{4} \sin^2 k l_k \right], \quad (2.51)$$

где $m = S_2/S_1$ — отношение площади сечения камеры S_2 к площади сечения канала S_1 ; k — волновое число; l_k — длина камеры расширения, м .

Выражение (2.51) справедливо для плоских волн.

Для расчетов снижения уровня шума в двухкамерном глушителе (рис. 2.48, *а*) можно также пользоваться формулой (2.51). Форма частотной характеристики снижения уровня шума не изменится — она будет иметь вид ряда полусинусоид. В двухкамерном глушителе снижение уровня шума (в его экстремальном значении) у первой полусинусоиды будет на 5...7 дБ больше, нежели чем у полусинусоиды однокамерного глушителя. Вторая полусинусоида будет иметь максимум на 12...15 дБ больше по сравнению с полусинусоидой однокамерного глушителя, третья — больше на величину порядка 30 дБ.

Упрощенный метод расчета снижения уровня шума пригоден для проведения приближенных расчетов глушителей, состоящих из одной или двух камер, соединенных наружной и внутренней трубкой. Необходимо отметить, что чем длиннее внутренняя трубка, тем ближе сходятся полусинусоиды, а чем длиннее наружная — тем больше они расходятся.

Глушитель камерного типа пропускает звук ниже некоторой граничной частоты, препятствуя распространению колебаний, частота которых выше граничной.

Упрощенный метод расчета снижения уровня шума однокамерного глушителя (рис. 2.48, *б*) приводится ниже. Объем камеры для таких глушителей рассчитывают по формуле

$$V_k = \frac{c^2 S}{f_{гр}^2 l 4\pi^2},$$

где c — скорость звука, м/с; S — площадь поперечного сечения газопровода, м²; l — длина трубопровода до камеры, м; $f_{гр}$ — граничная частота, Гц.

Геометрические размеры камеры связаны соотношением

$$L_k = \frac{V_k}{(\pi/4) D_k^2},$$

где L_k и D_k — длина и диаметр камеры, м.

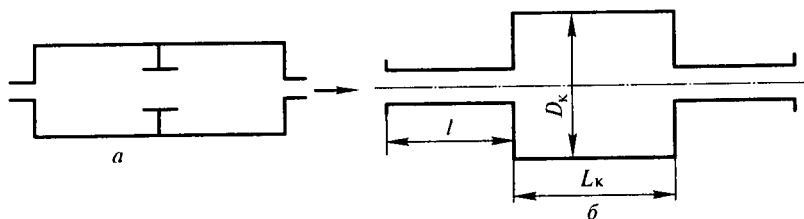


Рис. 2.48. Схемы двухкамерного (*а*) и однокамерного (*б*) реактивных глушителей

Приведенные формулы для расчета камерных реактивных глушителей определены для той области частот, для которой поперечные размеры камер оказываются меньше половины длины волны. Из этого условия и определяется значение граничной частоты $f_{гр}$. В отличие от реактивных глушителей более широкое распространение имеют камерные глушители, в которых размеры камер больше половины длины волны наименьших компонентов, составляющих шум. В этом случае звуковое поле внутри камеры предполагается диффузным и расчеты снижения уровней шума следует вести по формуле (2.50).

Такого рода камерные глушители применяют для уменьшения шума компрессорных станций, вентиляционных систем с побудителями движения газа, имеющими большие окружные скорости и диаметры колеса.

Пример 2.16. Расширительная камера имеет внутреннюю поверхность площадью $S_k = 12 \text{ м}^2$ при среднем коэффициенте звукопоглощения $\bar{\alpha} = 0,3$. Сечение выходного канала $S_a = 0,1 \times 0,1 = 0,01 \text{ м}^2$. Найти снижение уровня шума в камере.

Решение. Пользуясь ранее приведенными формулами (2.22) и (2.50), получим:

$$A = \bar{\alpha} S_k = 0,3 \cdot 12 = 3,6 \text{ м}^2;$$

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A}{S_a} = 10 \lg \frac{3,6}{0,01} = 25 \text{ дБ}.$$

Резонансные глушители. Глушители этого типа являются элементарной колебательной системой с затуханием, которая, будучи возбуждена падающей на нее звуковой волной, отбирает от последней акустическую энергию на частотах, близких к собственной частоте резонатора. Максимальное поглощение энергии для одиночного резонатора будет наблюдаться на резонансной частоте

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{V}},$$

где k_r — проводимость горла отверстия, соединяющего газопровод с резонаторной камерой, м;

$$k_r = \frac{S}{l_{отв} + 0,8d}.$$

Здесь S — площадь сечения горла резонатора, м^2 ; $l_{отв}$ — длина горла резонатора, м; d — диаметр горла резонатора, м; V — объем резонаторной камеры, м^3 .

Для одиночного резонатора величину снижения уровня шума, дБ, рассчитывают по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\sqrt{k_p V} / 2S}{f/f_p - f_p/f} \right)^2 \right], \quad (2.52)$$

где k_p — проводимость горла резонатора, м; S — площадь поперечного сечения газопровода, м²; f — возбуждающая частота, Гц; f_p — собственная частота резонатора, Гц.

Следует иметь в виду, что в формуле (2.52) при $f = f_p$ снижение уровня шума возрастает до бесконечности, что не соответствует действительной картине явления, так как в реальной системе всегда имеются потери энергии.

Для расширения частотной полосы снижения уровня шума можно применять группу присоединенных резонаторов (см. рис. 2.36), которые позволяют увеличить эффективный объем резонаторной камеры V и проводимость k_p .

Снижение уровня шума в однокамерном присоединенном резонаторе определяется выражением (2.52), а проводимость определяется по формуле

$$k_p = \frac{nS_1}{l_{\text{отв}} + 0,8\sqrt{S_1}},$$

где n — количество отверстий; S_1 — площадь одного отверстия, м²; $l_{\text{отв}}$ — глубина отверстия, м.

Резонансную частоту f_p глушителя находят по формуле

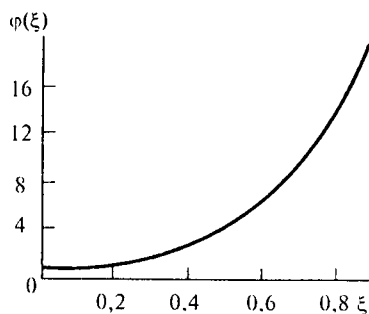
$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{V}},$$

где V — объем резонаторной камеры, м³; k_p — проводимость отверстий, соединяющих трубопровод с резонаторной камерой, м;

$$k_p = \frac{(\pi d^2/4)n}{l + \pi d/4\varphi(\xi)}.$$

Здесь d — диаметр отверстий, соединяющих трубопровод с резонаторной камерой, м; n — количество отверстий; l — толщина стенки, в которой находятся отверстия, м; $\varphi(\xi)$ — функция, учитывающая зависимость поправки на присоединенную массу воздуха в отверстиях от их взаимного расположения: $\xi = d/a$ (a — расстояние между центрами соседних отверстий, м). График $\varphi(\xi)$ приведен на рис. 2.49.

Р и с. 2.49. График влияния функции $\varphi(\xi)$ на присоединенную массу воздуха в отверстиях



2.8.5. Расчет акустических экранов

Акустическая эффективность экрана $\Delta L_{\text{экp}}$ — это снижение уровней звукового давления в рабочей точке (РТ), расположенной за экраном, которое зависит прежде всего от размеров и формы экрана, расстояния от источника шума и РТ до экрана, частоты звука и др. Экраны могут быть плоской или П-образной формы, гладкими (из металла, пластмассы и т. п.) или (чаще всего) со звукопоглощающей облицовкой толщиной не менее 50 мм со стороны источника шума, стационарными и передвижными.

Величину $\Delta L_{\text{экp}}$ в условиях открытого пространства рассчитывают на основе оптико-дифракционного представления звукового поля в зоне акустической тени, образующейся за экраном, по формуле

$$\Delta L_{\text{экp}} = -10 \lg (10^{-0,1 \Delta L_{\text{экp}}^{\text{I}}} + 10^{-0,1 \Delta L_{\text{экp}}^{\text{II}}} + 10^{-0,1 \Delta L_{\text{экp}}^{\text{III}}}),$$

где $\Delta L_{\text{экp}}^{\text{I}}$ — акустическая эффективность экрана бесконечной протяженности, определяемая по рис. 2.50, а, в зависимости от величины $\delta_1 = a_1 + b_1 + d_1$ и частоты f ; $\Delta L_{\text{экp}}^{\text{II}}$, $\Delta L_{\text{экp}}^{\text{III}}$ — акустические эффективности экрана бесконечной высоты, определяемые по рис. 2.50, а в зависимости от $\delta_2 = a_2 + b_2 + d_2$ и $\delta_3 = a_3 + b_3 + d_3$ (a_1, a_2, a_3 — кратчайшие расстояния от источника до верхней и боковых границ экрана; b_1, b_2, b_3 — кратчайшие расстояния от верхней и боковых границ экрана до РТ; d_1, d_2, d_3 — кратчайшие расстояния от РТ (рис. 2.50, б, в) до верхней и боковых границ источников шума).

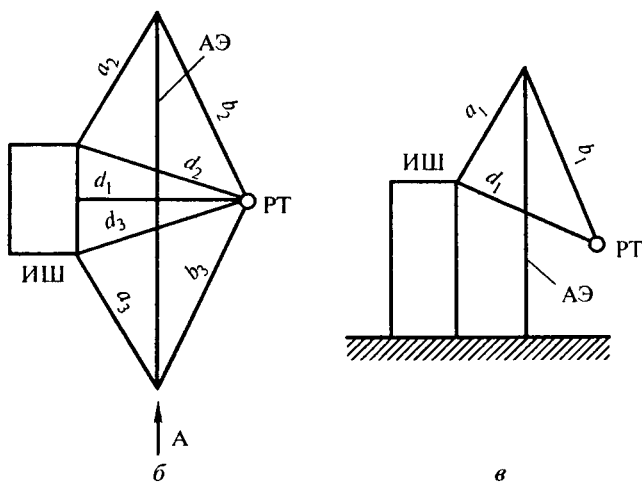
Ширина и высота экрана должны в 3 раза и более превышать соответствующие размеры источника для того, чтобы зона акустической тени, а следовательно, и $\Delta L_{\text{экp}}$ были как можно больше. Поскольку эффективность экранирования тем выше, чем больше высота и

ширина экрана по отношению к длине звуковой волны, экраны целесообразно применять для снижения средне- и высокочастотного шума.

Упрощенный ориентировочный расчет акустических экранов в предположении, что звук не проходит через них, выполняют по формуле

$$\Delta L = 20 \lg N - 10 \lg n,$$

где N — число Френеля ($N = 2\delta/\lambda$); n — число свободных ребер, через которые дифрагирует звук; $\delta = a + b - d$, м (см. рис. 2.30); λ — длина звуковой волны, м.



Р и с. 2.50. Акустическая эффективность экрана:

a — акустическая эффективность экрана бесконечной протяженности и высоты; $б$ — расчетная схема экрана сверху; $в$ — расчетная схема экрана сбоку; ИШ — источник шума; РТ — расчетная точка

Примерное ослабление уровня шума за экраном ΔL , дБ, определяют по формуле

$$\Delta L = 20 \lg \frac{1}{\lambda} \left[X \sqrt{1 + \left(\frac{H}{X} \right)^2} + Y \sqrt{1 + \left(\frac{H}{Y} \right)^2} \right] \quad (2.53)$$

где λ — длина волны, м; X — расстояние от экрана до источника, м; H — высота экрана, м; Y — расстояние от экрана до защищаемого объекта, м.

Пользоваться для ориентировочных расчетов формулой (2.53) можно только тогда, когда длина звуковой тени L за экраном больше расстояния от экрана до защищаемого рабочего места:

$$L = \frac{Y^2}{4\lambda}. \quad (2.54)$$

Пример 2.17. Определить снижение уровня шума за защитным экраном по следующим данным: высота экрана $H = 4$ м, расстояние от него до источника шума $X = 8$ м и расстояние от экрана до жилой зоны $Y = 16$ м. Частота источника шума $f = 100$ Гц, скорость распространения звука в воздушной среде $c = 344$ м/с.

Решение. Определим длину звуковой волны:

$$\lambda = c/f = 344/100 = 3,44 \text{ м.}$$

Определим по формуле (2.53) длину звуковой тени за экраном:

$$L = \frac{Y^2}{4\lambda} = \frac{256}{4 \cdot 3,44} = 18,6 \text{ м.}$$

Поскольку $L > Y$, ослабление уровня шума за экраном можно определить по формуле (2.53):

$$\begin{aligned} \Delta L &= 20 \lg \frac{1}{\lambda} \left[X \sqrt{1 + \left(\frac{H}{X} \right)^2} + Y \sqrt{1 + \left(\frac{H}{Y} \right)^2} \right] = \\ &= 20 \lg \frac{1}{3,44} \left[8 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{8} \right)^2} + 16 \sqrt{1 + \left(\frac{4}{16} \right)^2} \right] = 17,4 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

При проектировании кабины для оператора, установленной в шумном помещении, ее расчет зависит от типа кабины, наличия в ней экрана и ее ориентации по отношению к стене помещения.

Для полузакрытой кабины, одна из сторон которой открыта (голова оператора расположена в точке O (рис. 2.51) вблизи середины высоты кабины), телесный угол Ω определяют по зависимости

$$\Omega = \arcsin(\sin \beta \sin \gamma), \text{ рад; } \beta = \arctg \frac{b}{2t}; \quad \gamma = \arctg \frac{h}{4t}, \quad (2.55)$$

где b , t и h — геометрические размеры.

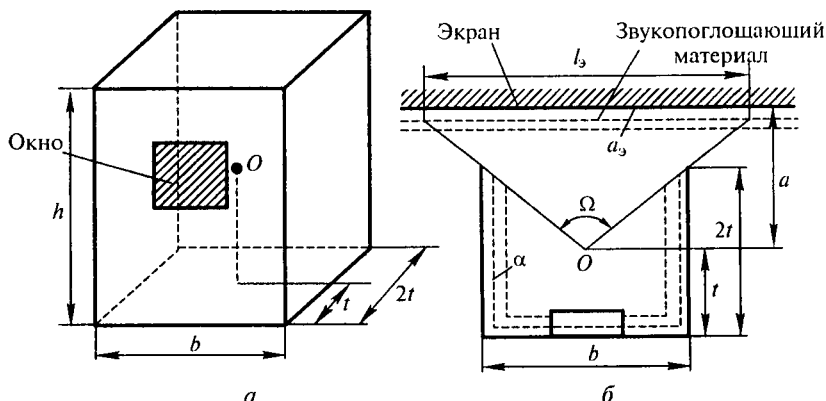


Рис. 2.51. Полузакрытая кабина для наблюдения
(O — точка расположения головы оператора):

a — схема кабины наблюдения; b — положение оператора в кабине (вид сверху)

Для подсчета звукоизоляции R , дБА, по найденному углу Ω может служить формула

$$R = 10 \lg \frac{h}{\Omega} + 10 \lg \left[\alpha + \frac{\Omega}{h} (1 - \alpha) \right] \quad (2.56)$$

или приближенная формула

$$R \approx 10 \lg (h/\Omega),$$

где Ω — телесный угол, ст. рад.

Пример 2.18. Рассчитать и спроектировать полузакрытую кабину для оператора при размерах $t = 0,5$ м; $b = 2t = 1$ м; $h = 2$ м (см. рис. 2.51). Кабина облицована звукопоглощающим материалом с коэффициентом поглощения $\alpha = 0,4 \dots 0,9$ на частотах спектра звука. Уровень шума в производственном помещении $L_R = 90$ дБ.

Решение. По формулам (2.55) находим:

$$\beta = 0,79 \text{ рад}; \quad \gamma = 0,79 \text{ рад},$$

$$\Omega = \arcsin (0,79 \cdot 0,79) = 0,66 \text{ ст. рад.}$$

По формуле (2.56) находим уровень звукоизоляции:

$$R = 10 \lg \frac{2}{0,66} = 4,8 \text{ дБА.}$$

Уровень шума в кабине $L_k = 90 - 6,8 = 83,2$ дБА.

Предельная реальная величина средней звукоизоляции открытых заглушенных кабин составляет 12...14 дБА.

В условиях этого примера определить, насколько увеличится звукоизоляция кабины при установке ее на расстоянии 0,5 м от стены или экрана, облицованных звукопоглотителем с коэффициентом звукопоглощения $\alpha = 0,8$.

Определить также, можно ли без заметного ослабления акустического эффекта экрана увеличить проход между кабиной и экраном до 1 м. Найти требуемую длину облицовки.

По формуле (2.56) находим значение ΔR_s при ширине прохода между кабиной и экраном $a - t = 1 - 0,5 = 0,5$ м:

$$\Delta R_s = -10 \lg(1 - 0,8) \left[1 - \left(\frac{1}{2(1/0,5) - 1} \right)^2 \right] = 7,5 \text{ дБА.}$$

То же, при ширине прохода 1 м, $a = 1,5$ м:

$$\Delta R_s = -10 \lg 0,2 \left[1 - \left(\frac{1}{2(1,5/0,5) - 1} \right)^2 \right] = 7 \text{ дБА,}$$

т. е. можно без особого ущерба увеличить ширину прохода до 1 м. Протяженность облицовки экрана звукопоглотителем при ширине прохода 0,5 м $l_s \geq ab/t = 2$ м, при ширине прохода 1 м $l_s \geq 3$ м.

Суммарное снижение шума кабины с экраном составит:

$$R_{\text{сум}} = R + \Delta R_s = 6,8 + 7,5 = 14,3 \text{ дБА.}$$

При наличии дополнительного экрана или сплошной стены, облицованной звукопоглотителем, звукоизоляция частично открытой кабины может достигать 16...20 дБА.

Дальнейшее увеличение акустического эффекта кабины может быть достигнуто установкой перед открытым проемом звукозаглушенного экрана или ориентацией открытого проема кабины в сторону стены, облицованной звукопоглотителем.

Прирост звукоизоляции кабины, дБА, при этом составит:

$$\Delta R_s = -10 \lg(1 - \alpha_s) \left[1 - \left(\frac{1}{2a/t - 1} \right)^2 \right], \quad (2.57)$$

где α_s — коэффициент звукопоглощения экрана; a , t — геометрические размеры (см. рис. 2.51).

Выражение (2.57) справедливо на частотах, где при реальных размерах кабин относительно слабо развиты дифракционные явления, т. е. на частотах в несколько сотен герц и выше.

Глава 3

ЗАЩИТА ОТ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Инфразвук — звуковые колебания и волны с частотами, лежащими ниже полосы слышимых (акустических) частот 20 Гц. Это наименее изученный вредный и опасный фактор загрязнения окружающей среды. Инфразвук — акустическое нейтрино, и практических преград распространения инфразвуковых волн не существует.

Применение в различных сферах деятельности человека машин и механизмов, увеличение их мощности и габаритных размеров, производительности и других технических характеристик обуславливают тенденцию повышения низкочастотных составляющих в спектрах шумов на рабочих местах и появление инфразвука. Характерная особенность инфразвука в отличие от слышимого и ультразвукового диапазона частот — большая длина волны и малая частота колебаний. При этом инфразвуковые волны могут свободно огибать препятствия, распространяясь в воздушной среде на большие расстояния с незначительной потерей энергии, поскольку поглощение инфразвука в атмосфере незначительно.

Инфразвуковые колебания могут быть периодическими, нерегулярными и кратковременными. Техногенными источниками инфразвука периодического характера являются поршневые двигатели с малым числом оборотов, поршневые насосы. Периодические и нерегулярные инфразвуковые волны возникают при колебаниях больших гибких поверхностей, кратковременные инфразвуковые импульсы — при взрывных работах, выстрелах, при преодолении реактивным самолетом звукового барьера и т. п.

Одна из особенностей инфразвука — слабое по сравнению с волнами звукового диапазона поглощение в воздухе, поэтому инфразвук распространяется на большие расстояния, «очищаясь» при этом от более высоких гармоник. Экспериментально установлено распространение инфразвука, возникающего при мощных взрывах, на расстояния в несколько тысяч километров, причем в точке регистрации этих инфразвуковых колебаний не было обнаружено частот слышимого звукового диапазона. Дальнодействие инфразвука находит практическое применение в звукометрии, сейсмометрии и т. д.

3.1. ИСТОЧНИКИ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Источники инфразвуковых колебаний могут быть как *естественными* — различные природные явления и процессы, так и *искусственными*, созданными в результате производственно-технической и научной деятельности человека. Низкочастотные акустические колебания широко представлены в окружающей нас природе: землетрясения, извержения вулканов (с частотой около 0,1 Гц), грозовые разряды (0,25...4 Гц), штормы (так называемый «голос моря» ~10 Гц), ветры. Немалую роль в возникновении инфразвуковых колебаний играет турбулентность атмосферы. Например, мистраль (северный или северо-западный холодный ветер на юге Франции) создает инфразвук частотой 6 Гц. Северные сияния также генерируют инфразвуковые волны. Однако все эти источники инфразвука локализованы в пространстве и времени и не оказывают глобального влияния на жизнь человечества. Различные естественные источники низкочастотных колебаний создают на планете так называемый инфразвуковой фон, который все время меняется, что обусловлено постоянным обменом энергии между различными явлениями природы.

В последнее время наблюдается увеличение инфразвукового фона в окружающей среде в связи с активной деятельностью человека, в частности с развитием промышленного производства и транспорта. К основным техногенным источникам инфразвуковых колебаний в городах можно отнести:

- производственный инфразвук, генерируемый различным оборудованием, расположенным на территории многочисленных промышленных предприятий в черте городской застройки в крупных урбанизированных центрах (наиболее характерно для градообразующих предприятий металлургической промышленности, в которой фиксировался инфразвук уровнем 97...107 дБ на частотах 8...16 Гц);
- спектры шумов транспортных потоков, содержащие инфразвуковые составляющие, которые не регистрируются обычными измерительными приборами и обладают высокими уровнями звукового давления;
- инфразвуковые колебания высокой интенсивности, которые наблюдаются в зоне жилой или промышленной застройки, причем источником этих колебаний являются не транспортные средства или высокоэнергетическое промышленное оборудование, а фактически сами здания или сооружения.

Человек подвергается воздействию техногенных источников звука: возвратно-поступательных движений частей различных механизмов

и сооружений, доменных печей, дизельных моторов, кузнечных прес-сов, реакторов. Наибольшую интенсивность инфразвуковых коле-баний создают машины и механизмы, имеющие поверхности боль-ших размеров. При этом инфразвуковые колебания являются не только составной, но во многих случаях и преобладающей частью спектров производственных шумов.

Физической характеристикой инфразвука является среднеквад-ратическое значение уровней звукового давления (УЗД) в октавных (1/3 октавных) полосах частот в децибелах:

$$L_p = 10 \lg \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 dt}, \quad (3.1)$$

где p — измеряемое среднеквадратическое значение звукового дав-ления, Па; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — пороговое значение среднеквадрати-ческого давления, соответствующее 0 дБ.

Инфразвук — составная часть спектров шума, излучаемого тех-нологическими агрегатами (табл. 3.1). Так, в спектрах шума боль-шей части агрегатов черной металлургии преобладают низкие час-тоты. В сталелитейном производстве УЗД инфразвука и низкочас-отного шума агрегатов существенно зависят от интенсификации технологических процессов.

Таблица 3.1. Спектры инфразвука и шума

Спектр	Октавные полосы/ максимальные УЗД, Гц/дБ	Основные источники шума
Инфра- звуковой	2, 4, 8, 16/82, ..., 133	Автотранспорт, доменные и кис- лородно-конверторные печи, реч- ные и морские суда, железнодоро- жный транспорт, компрессоры
Инфранизко- частотный	2, ..., 125/84, ..., 112	Мартеновские печи, агломера- ционные машины, отдельные ви- ды транспортных средств и само- ходные машины
Низко- частотный	31,5; 63, 125/ 84, ..., 116	Электродуговые печи, тягачи, гусеничные тракторы, портовые краны, турбинные установки, ав- топогрузчики, экскаваторы

Инфразвуковые колебания в диапазоне ниже 20 Гц создают воздушные и поршневые компрессоры с максимальными УЗД от 92 до 123 дБ преимущественно в октавах 8...16 Гц. Измерения инфразвука в компрессорных цехах показали, что спектр шума имеет пик в 1/3-октаве 20 Гц с разностью УЗД между дБ Лин и дБА в 23 дБ.

На атомных электростанциях (АЭС) в помещениях компрессорных шум, создаваемый технологическим оборудованием АЭС, имеет широкополосный спектр с преобладанием акустической энергии 86...98 дБ преимущественно в октавах 31,5...63 Гц.

Мощными источниками инфразвука являются реактивные двигатели космических ракет. Так, при запуске некоторых типов ракет их максимальные УЗД, превышающие 150 дБ, находятся на частотах 10 и 12,5 Гц. В кабинах вертолетов максимальные УЗД составляют 110...120 дБ на частоте 28 Гц, соответствующей движению лопастей винта. Высокие уровни инфразвука обнаружены также на трассе сверхзвуковых реактивных самолетов. При прохождении ими звукового барьера образуется ударная волна с максимумом спектральной плотности в диапазоне 1...100 Гц. При взлете (гражданских) турбореактивных самолетов типа ТУ-154 уровни инфразвука в салоне составляют 80 дБ на частоте 4 Гц и 90 дБ на частоте 20 Гц.

Источниками инфразвуковых колебаний являются и наземные средства транспорта. Высокие уровни инфразвука до 100...110 дБ в диапазоне 9...16 Гц отмечаются в кабинах легковых автомобилей. При частично открытых окнах автомашины уровни инфразвука повышаются до 110...120 дБ, а их частотный диапазон расширяется до 31,5 Гц, при открытых окнах наиболее высокое звуковое давление 120 дБ наблюдается в диапазоне 2...6 Гц.

Обычно искусственные источники имеют ярко выраженные максимумы частот и довольно сильно различаются по частоте и интенсивности.

Результаты многочисленных исследований отечественными и зарубежными учеными рабочих мест основных видов транспортных средств и технологического оборудования представлены в табл. 3.2, где Δ — разность между уровнями звукового давления дБ Лин и дБА, измеренными по шкалам шумомера «Линейная» и «А» соответственно.

Выделенные классы спектров охватывают основные виды трудовой деятельности операторов, на которых влияют низкочастотные акустические колебания, и позволяют их учитывать при гигиеническом нормировании.

Таблица 3.2. Низкочастотные акустические характеристики

Источник шума	Октавные полосы с максималь- ными уровнями, Гц	Максималь- ные уровни в октавах, дБ	Общий уровень звукового давления		
			дБА	дБ Лин	Δ
Автотранспорт					
ЗИЛ-157	31,5; 63	119; 118	96	119; 119	23
Татра-148	8; 16	109; 110	85	108	23
ЗИЛ-130	8;16	115; 116	85	121; 121	36
ГАЗ-51	8; 16	107; 109	85	109	24
ГАЗ-53А	8; 16	112; 110	84	111	27
КамАЗ	8; 16	114; 116	82	122	40
Волга «ГАЗ-24»	8;16	115; 113	74	116	42
Трейлер «Шкода-Алка»	2; 16	110; 108	87	106	19
Автобус «Икарус-255»	8; 16	111; 113	74	102	28
Водный транспорт					
Речное судно	16	108	72	109	37
Морской транспорт (рубка)	16; 31,5	91; 92	61	94	33
Атомный ледокол (рубка)	8; 16	115; 118	—	—	—
Железнодорожный транспорт					
Электропоезд метро	8; 16; 31,5	93; 92	86	95	9
Пригородный электропоезд	8; 16	101; 98	82	104	22

Источник шума	Октавные полосы с максималь- ными уровнями, Гц	Максималь- ные уровни в октавах, дБ	Общий уровень звукового давления		
			дБА	дБ Лин	Δ
Самоходные подъемно-транспортные машины					
Колесный трактор К-701	16; 31,5	111; 112	91	114	23
Гусеничный трактор ДТ-75	31,5; 63	112; 109	96	115	19
Автопогрузчик	16; 31,5; 63	97;95	72	98	26
Бульдозер С-100	16; 63	106;105	80	103	23
Тягач ТГ-663	31,5	112	89	110	21
Экскаватор ЭО-3322	16; 31,5	106;100	84	100	16
Портовый кран «Кировец»	31,5	84	72	98	26
Технологическое оборудование					
Доменная печь	16	94	87	98	11
Цех горячего проката	8; 16	92; 93	74	98	24
Цех холодного проката	4; 8	91	72	97	25
Воздухозаборная камера	4; 8; 16; 31,5	104; 112; 109	76; 80	110; 112	32; 34
Компрессор поршневой	16	110	83	112	29
Турбинный зал АЭС	63; 125	98; 95	96	101	5
Компрессорная станция АЭС	4; 31,5	82; 84	67	90	23

Человек, не находящийся в производственной среде, подвергается непосредственному воздействию инфразвука в транспортных средствах, особенно на железнодорожном, морском и авиационном транспорте. Кроме того, транспортные потоки и отдельные автомобили формируют низкочастотный шум в окрестностях дорог, который является основной составляющей инфразвукового фона в жилых и общественных зданиях, где человек проводит основную часть своей жизни. Следует отметить, что в жилых и общественных зданиях уровни инфразвуковых колебаний меняются от 70 до 120 дБ, на территории жилой застройки — от 80 до 100 дБ. При этом их выраженность в общем шумовом спектре определяется разностью дБ Лин и дБА, составляющей от 10 до 20...30 дБ, т. е. выявляемый инфразвук оценивается от незначительного до ярко выраженного. В большинстве случаев инфразвук встречается не в изолированном виде, а в сочетании с низкочастотным шумом и вибрацией.

3.2. ВЛИЯНИЕ ИНФРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА

Инфразвук оказывает вредное воздействие на организм человека, и требуются специальные меры защиты от него.

Результаты социально-гигиенических исследований показывают, что население, проживающее в районах, где имеет место круглосуточное воздействие инфразвука с уровнями свыше 109 дБ, предъявляет достоверно больше жалоб, чем население контрольного района (табл. 3.3).

Таблица 3.3. Результаты воздействия инфразвука

Жалобы	Число жалоб жителей двух районов (на 100 опрошенных)	
	опытного	контрольного
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

Гигиеническая проблема, связанная с влиянием инфразвука на организм человека, возникла сравнительно недавно — в 70-е годы XX в. Накопленные данные свидетельствуют о том, что инфразву-

ковые волны оказывают выраженное неблагоприятное воздействие на организм, особенно на психоэмоциональную сферу, влияют на работоспособность, сердечно-сосудистую, эндокринную и другие системы.

При исследовании влияния инфразвука, колебаний и вибраций на человека можно выделить типичные нарушения нормального состояния, т. е. психофизические реакции, непосредственно влияющие на работоспособность человека и надежность выполнения им требуемых операций:

- ухудшение управлением дыхания;
- нарушение координации движений;
- ухудшение способности слежения;
- ослабление внимания;
- уменьшение остроты зрения;
- ухудшение прицельных движений.

Подавляющее большинство людей, находящихся в производственной среде, в большей или меньшей мере подвергаются воздействию интенсивных полей низкой (инфразвуковой) частоты, что вызывает у работника ряд отклонений от его нормального состояния. Психофизическими исследованиями выявлены нарастание времени зрительной реакции, увеличение ошибок операторской деятельности, пространственная дезориентация испытуемых. У 86 % операторов эти отклонения в сочетании с ощущениями апатии и вялости наблюдались уже при уровнях звукового давления 110 дБ. Биологический эффект низкочастотных акустических колебаний проявляется ответной реакцией всего организма, в которой участвуют преимущественно нервная, сердечно-сосудистая и дыхательная системы. В совокупности отклонения реакций различных систем организма от нормальных приводят к значительному снижению производительности труда, а при обслуживании технически сложных производств (предприятия нефтегазовой отрасли, управление современными скоростными транспортными средствами, работа, связанная с высоким уровнем умственной и психофизической нагрузки) может привести к аварийным ситуациям.

Городской шум в отличие от производственного характеризуется большим непостоянством распределения уровней во времени, что определяет трудности в изучении сложных и часто изменчивых реакций организма при взаимодействии его с другими факторами окружающей среды. Установлено, что люди, живущие в отдаленных тихих районах земного шара, отличаются более острым слухом по сравнению с жителями городов соответствующих возрастных групп.

Население, проживающее в мегаполисах, попадает под постоянное воздействие низкочастотных колебаний различных уровней. У таких людей наблюдаются накапливаемое возбуждение и раздражительность, происходит формирование так называемого человека большого города.

3.3. НОРМИРОВАНИЕ ИНФРАЗВУКА

На основании исследования инфразвука были разработаны гигиенические нормы этого фактора. Однако нет единого мнения о безопасных уровнях инфразвука: разброс составляет от 90 до 130...150 дБ. Современная гигиеническая оценка воздействующих факторов предполагает учет таких основных параметров, как уровень, время действия и вероятность возникновения заболевания или физиологических изменений.

Гигиеническое нормирование инфразвука в какой-то мере базируется на критериях здоровья и работоспособности с оценкой влияния фактора на весь организм в процессе трудовой деятельности с учетом напряженности и тяжести.

Нормируемыми параметрами согласно СанПиН 2.2.4./2.1.8.583—96 являются:

- уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц (дБ), определяемые по формуле

$$-L_p = 10 \lg(p^2/p_0^2), \quad (3.2)$$

где p — среднеквадратическое значение звукового давления, Па; p_0 — исходное значение звукового давления в воздухе, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па;

- уровни звукового давления (при одночисловой оценке), измеренные по шкале шумомера «Линейная», дБ Лин (при условии, что разность между уровнями, измеренными по шкалам «Линейная» и «А» на характеристике шумомера «Медленно», составляет не менее 10 дБ).

Нормируемыми характеристиками непостоянного инфразвука являются эквивалентные по энергии уровни звукового давления по шкале «А» (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8 и 16 Гц и эквивалентный общий уровень звукового давления (дБ Лин), определяемые по формуле

$$L_{\text{экв}} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i 10^{0,1 L_i} \right), \quad (3.3)$$

где T — период наблюдения, ч; t_i — продолжительность действия шума с уровнем L_p , ч; n — общее число промежутков действия инфразвука; L_i — логарифмический уровень инфразвука в i -й промежуток времени, дБ.

Общий (линейный) уровень звукового давления, дБ Лин, — величина, измеряемая по шкале шумомера «Линейная» или рассчитанная путем энергетического суммирования уровней звукового давления в октавных полосах частот без корректирующих октавных поправок.

Эквивалентный (по энергии) общий (линейный) уровень звукового давления $L_{экв}$, дБ Лин, — уровень постоянного широкополосного инфразвука, среднеквадратическое звуковое давление которого такое же, как и данного непостоянного инфразвука в течение определенного интервала времени.

В качестве дополнительной характеристики для оценки инфразвука (например, в случае тонального инфразвука) 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.

Предельно допустимые уровни инфразвука на рабочих местах, дифференцированные для различных видов работ, а также в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки проведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Нормы инфразвука

Назначение помещений	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц				Общий уровень звукового давления, дБ Лин
	2	4	8	16	
Для работы различной степени тяжести	100	95	90	85	100
Для работы различной степени интеллектуально-эмоциональной напряженности	95	90	85	80	95
Территория жилой застройки	90	85	80	75	90
Жилые и общественные здания	75	70	65	60	75

Для шумов, спектр которых охватывает инфранизкий и звуковой диапазоны, измерение и оценка скорректированного уровня звукового давления инфразвука являются дополнительной к измерению и оценке шума в соответствии с «Санитарными нормами шума на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий, на территории жилой застройки» СН 2.2.4./2.1.8.562—96 и ГОСТ 12.1.003—83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности».

На территории жилой застройки в случае постоянного инфразвука уровни звукового давления не должны превышать 90 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2; 4; 8; 16; 31,5 Гц. Для третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40 Гц уровни звукового давления не должны превышать 80 дБ.

При непостоянном инфразвуке нормируемыми параметрами будут эквивалентные по энергии уровни звукового давления для тех же октавных полос. Степень проявления инфразвука оценивают по разности общего уровня звукового давления, измеренного по шкалам «Линейная» и «А» шумомера: 6...10 дБ — признаки наличия инфразвука; 11...20 дБ — выражен умеренно; 21...30 дБ — выражен; более 30 дБ — инфразвук значительный.

3.4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ИНФРАЗВУКА

Средства защиты от инфразвука значительно отличаются от применяемых для борьбы с шумом. Это связано с особенностями физических характеристик инфразвуковых колебаний, в частности со значительно большей длиной волн инфразвука по сравнению с размером препятствий на пути их распространения.

Защита от вредного воздействия инфразвука расстоянием малоэффективна, так как поглощение в нижних слоях атмосферы инфразвуковых колебаний с частотой ниже 10 Гц не превышает $8 \cdot 10^{-6}$ дБ/км.

Защита от инфразвука может осуществляться в источнике возникновения, по пути распространения, в ограждаемом помещении.

Снижение интенсивности инфразвука может быть достигнуто изменением режима работы устройства или его конструкции; звукоизоляцией источника; поглощением звуковой энергии глушителями шума интерференционного, камерного, резонансного и динамического типов, а также за счет использования механического преобразователя частоты.

Защита в источнике связана с уменьшением колебаний вибрирующего объекта, возмущающих сил или пульсации движущихся

газовых либо гидродинамических потоков. Борьбу с инфразвуком в источнике его возникновения необходимо вести прежде всего в направлении изменения режима работы технологического оборудования (например, увеличение числа рабочих ходов n кузнечно-прессовых машин), чтобы основная частота следования силовых импульсов $f = n/60$ лежала за пределами инфразвукового диапазона. Одновременно должны приниматься меры по снижению интенсивности аэродинамических процессов, в частности по ограничению скоростей движения транспорта и уменьшению скоростей истечения паров и газов сжатого воздуха в атмосферу. При выборе конструкции предпочтение отдают малогабаритным машинам достаточной жесткости, поскольку в конструкциях с плоскими поверхностями большой площади и малой жесткости создаются условия для генерации инфразвука.

Для защиты от вредного воздействия инфразвука применяют звукоизоляцию источника, глушители различных типов, поглощение инфразвуковых колебаний, выбирают оптимальные режимы работы устройств, специальные конструктивные решения.

Использование глушителей шума — наиболее простой способ уменьшения уровня инфразвуковых составляющих шума всасывания и выхлопа стационарных дизельных и компрессорных установок, ДВС и турбин.

Если требуется заглушить одну или несколько дискретных составляющих в спектре инфразвука, особенно в случае его распространения по каналам, более эффективно применять глушители интерференционного типа.

Для смещения волны по фазе в воздуховодах устраивают боковой отвод, длина которого должна быть $(\lambda/2)\alpha$, где λ — длина заглушаемой инфразвуковой волны; $\alpha = 1, 3, 5$.

Глушители инфразвука камерного или резонансного типа работают с использованием тех же принципов, что и в аналогичных глушителях шума. Однако в случае инфразвуковых колебаний они должны иметь весьма большой объем расширительной камеры или резонансной полости.

Механический преобразователь частоты инфразвуковых колебаний, основанный на амплитудной модуляции звуковых колебаний, применяют для защиты от инфразвука, распространяющегося по закрытому каналу, например в выхлопных трубах ДВС, аэродинамических трубах при испытаниях авиационных двигателей. Модуляция инфразвуковых колебаний осуществляется посредством аэродинамического преобразователя (например, ультразвуковой сирены),

установленного на пути распространения инфразвуковых волн. Это позволяет преобразовывать инфразвуковые колебания в менее опасные ультразвуковые. Амплитуда несущего колебания может быть изменена соответствующим изменением частот модулирующего сигнала во времени.

Звукоизоляция источника инфразвуковых колебаний не обладает достаточной эффективностью на частотах менее 10 Гц, хотя на практике в ряде случаев применяется. Поскольку инфразвуковые волны без существенного затухания распространяются в открытом пространстве, а также без заметного ослабления проникают в закрытые помещения, основной мерой звукоизоляции помещений на низких частотах является увеличение жесткости ограждений. Для повышения ее эффективности на частотах ниже 10 Гц требуется создавать мощные, жесткие конструкции из материалов с поверхностной плотностью $10^5 \dots 10^6 \text{ кг/м}^2$, что в ряде случаев нерентабельно.

Для звукопоглощения инфразвука используют резонансные явления. Метод звукопоглощения может быть реализован применительно к инфразвуковым колебаниям при использовании резонирующих панелей (рис. 3.1). На прямоугольную раму крепят мелкоячеистую сетку и мембрану, выполненную из тонкого металлического листа, фанеры или холста, пропитанного лаком. Пространство между рамой и воздухонепроницаемой мембраной заполняют звукопоглощающим материалом.

Монтаж указанной конструкции в помещениях с источниками инфразвука способствует поглощению его энергии. Конструкция может быть настроена на определенную частоту в спектре инфразвука. При воздушном наполнении внутреннего объема панели собственной частоту панелей определяют по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c^2 \rho}{mh}}, \quad (3.4)$$

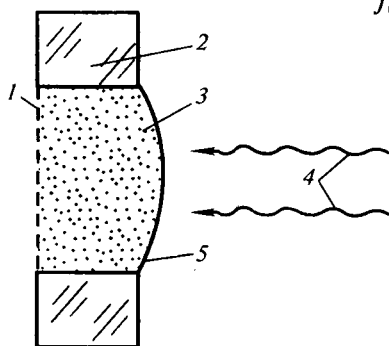


Рис. 3.1. Резонирующие панели:

1 — мелкоячеистая сетка; 2 — рама (каркас);
3 — звукопоглощающий материал; 4 — падающая инфразвуковая волна; 5 — воздухонепроницаемая мембрана

где c — скорость звука, м/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; m — поверхностная масса, кг/м²; h — толщина воздушного промежутка за мембраной, м.

Для защиты от инфразвука наиболее эффективны методы, связанные с применением глушителей различных типов, выбором оптимальных режимов работы и использованием специальных конструкций. В диапазоне инфразвуковых колебаний в силу большой длины их волн размеры резонаторов и объем их внутренних полостей должны быть больше, чем в аналогичных глушителях, применяемых для диапазона слышимых волн.

В случае инфразвуковых источников аэродинамической природы принимают меры ограничения скорости истечения газа.

При конструировании машин и механизмов стремятся найти варианты малогабаритных устройств, обладающих достаточной жесткостью.

Глава 4

ЗАЩИТА ОТ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ультразвук — это упругие колебания звуковой волны с частотой от 16 кГц до 100 МГц и выше. Ультразвук, имеющий свойства упругих волн, не отличается от слышимого звука, но высокая частота колебательного процесса способствует большему затуханию колебаний вследствие трансформации звуковой энергии в теплоту.

Источником ультразвука является производственное оборудование, в котором он генерируется для выполнения технологических процессов, контроля и измерений, и производственное оборудование, при эксплуатации которого ультразвук возникает как сопутствующий фактор, а также медицинское ультразвуковое оборудование.

При действии ультразвука на биологические объекты (в том числе и на человека) в органах и тканях на расстояниях, равных половине длины волны, может возникать разность давлений от 0,01 до 0,1 Па. При небольших интенсивностях ультразвука механические колебания способствуют лучшему обмену веществ и лучшему снабжению тканей кровью и лимфой. Повышение интенсивности ультразвука может привести к возникновению акустической кавитации, сопровождающейся механическим разрушением клеток и тканей. Контактное воздействие ультразвука на руки приводит к нарушению капиллярного кровообращения в кистях рук, снижению болевой чувствительности. При уровне звукового давления 120 дБ наступает поражающий эффект.

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКА

По частотному составу ультразвуковой диапазон подразделяют на низкочастотный — от $1,12 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^5$ Гц и высокочастотный — от $1,0 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^9$ Гц.

По способу распространения различают ультразвук, распространяющийся воздушным путем (воздушный ультразвук) и распространяющийся контактным путем при соприкосновении рук или других частей тела человека с источником ультразвука, с твердыми

и жидкими средами, обрабатываемыми деталями, аппаратурой (контактный ультразвук).

Низкочастотные ультразвуковые колебания распространяются воздушным и контактным путем, высокочастотные — контактным путем.

По режиму генерирования ультразвуковых колебаний выделяют постоянный и импульсный ультразвук, а по способу излучения — источники ультразвука с магнитострикционным генератором; источники ультразвука с пьезоэлектрическим генератором.

4.2. НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Общие требования безопасности к воздействию ультразвуковых колебаний устанавливаются ГОСТ 12.1.001—89. Стандарт распространяется на ультразвуковые колебания в диапазоне частот от $1,12 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^9$ Гц, передающиеся в воздушной, жидкой и твердой средах.

В стандарте даны классификация, характеристика, допустимые уровни ультразвука на рабочих местах и общие требования к ультразвуковым характеристикам оборудования, методам контроля и защите от воздействия ультразвука.

Характеристикой воздушного ультразвука на рабочих местах являются уровни звукового давления в децибелах в 1/3 октавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100 кГц. Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Допустимые уровни звукового давления
ультразвука

Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровень звукового давления, дБ
12,5	80
16	80 (90)
20	100
25	105
31,5...100,0	110

Нормируемой характеристикой контактного ультразвука являются пиковые значения виброскорости L_v или ее логарифмические уровни в децибелах в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000; 16 000; 31 500 кГц, определяемые по формуле

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0},$$

где v — пиковое значение виброскорости, м/с; v_0 — опорное значение виброскорости, равное $5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Допустимые уровни виброскорости и ее пиковые значения для контактного ультразвука на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Допустимые уровни виброскорости для контактного ультразвука

Среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	Пиковые значения виброскорости, м/с	Уровни виброскорости, дБ
8...63	$5 \cdot 10^{-3}$	100
125...500	$8,9 \cdot 10^{-3}$	105
$1 \cdot 10^3$... $31,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	110

Допустимые уровни контактного ультразвука принимают на 5 дБ ниже значений, указанных в табл. 4.2, в тех случаях, когда работающие подвергаются совместному воздействию воздушного и контактного ультразвука.

При использовании ультразвуковых источников бытового назначения, как правило, генерирующих колебания с частотами ниже 100 кГц, допустимые уровни воздушного и контактного ультразвука не должны превышать 75 дБ на рабочей частоте источника.

Уровни воздушного ультразвука следует измерять при типовых условиях эксплуатации оборудования, характеризующихся наибольшим уровнем ультразвука.

Точки измерения воздушного ультразвука на рабочем месте должны находиться на высоте 1,5 м от уровня основания (пола, площадки), на котором при выполнении работы стоит работающий, или на уровне его головы, если работа выполняется сидя, на расстоянии 5 см от уха и на расстоянии не менее 50 см от человека, проводящего измерения.

4.3. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ УЛЬТРАЗВУКА

Основная мера по защите от вредного влияния ультразвука — защита расстоянием, т. е. запрещение непосредственного контакта работающих с рабочей поверхностью оборудования в процессе его обслуживания, жидкостью и обрабатываемыми деталями во время возбуждения в них ультразвука.

Для исключения контакта с источниками ультразвука необходимо применять:

- дистанционное управление оборудованием;
- автоблокировку, т. е. автоматическое отключение оборудования при выполнении вспомогательных операций (загрузке и выгрузке продукции, нанесении контактных смазок и т. д.);
- приспособления для удержания источника ультразвука, или обрабатываемой детали.

Предельно допустимые значения ультразвуковых характеристик оборудования устанавливают исходя из требования обеспечения на рабочих местах допустимых уровней ультразвука.

Стационарные ультразвуковые источники, генерирующие уровни звукового давления, превышающие нормативные значения, должны оборудоваться звукопоглощающими кожухами и экранами и размещаться в отдельных помещениях или звукоизолированных кабинах. Допускается использовать в ультразвуковых источниках генераторы с рабочими частотами не ниже 22 кГц.

Для защиты рук от возможного неблагоприятного воздействия контактного ультразвука в твердой или жидкой средах необходимо применять две пары перчаток — резиновые (наружные) и хлопчатобумажные (внутренние) или только хлопчатобумажные.

Для защиты работающих от неблагоприятного воздействия воздушного ультразвука в качестве средств индивидуальной защиты следует применять противошумы.

К работе с ультразвуковым оборудованием не допускаются лица моложе 18 лет.

Лица, подвергающиеся в процессе трудовой деятельности воздействию контактного ультразвука, подлежат предварительным при приеме на работу и периодическим медицинским осмотрам.

Глава 5

ЗАЩИТА ОТ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

5.1. ВИБРАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Вибрацией называются механические колебания упругих тел, проявляющиеся в перемещении центра их тяжести или оси симметрии в пространстве, а также в периодическом изменении ими формы, которую они имели в статическом состоянии.

Основными источниками вибраций являются рельсовый транспорт (трамвай, метрополитен, железная дорога), различные технологические установки (компрессоры, двигатели), кузнечно-прессовое оборудование, строительная техника (молоты, пневмовибрационная техника), системы отопления и водопровода, насосные станции и т. д. Особенность действия вибраций заключается в том, что эти механические упругие колебания распространяются по грунту и оказывают свое воздействие на фундаменты различных сооружений, вызывая затем звуковые колебания в виде структурного шума.

Вибрации делятся на вредные и полезные. Вредные вибрации создают не только шумовые загрязнения окружающей среды, неблагоприятно воздействуя на человеческий организм, но и представляют определенную опасность для различных инженерных сооружений, вызывая в ряде случаев их разрушение. Полезные вибрации используются в ряде технологических процессов (виброуплотнение бетона, вибровакuumные установки и т. д.), но и в этом случае необходимо применять соответствующие меры защиты.

Действие вибрации на организм проявляется по-разному в зависимости от того, как действует вибрация. Общая вибрация воздействует на весь организм. Этот вид вибрации проявляется на транспорте, в ряде производственных и строительных работ (например, виброуплотнение бетона). Локальная (местная) вибрация воздействует на отдельные части тела (например, при работе ручным пневмоинструментом, виброуплотнителями и т. д.). В зависимости от продолжительности воздействия вибрации, частоты и силы колебаний возникает ощущение сотрясения (паллестезия), а при длитель-

ном воздействии появляются изменения в опорно-двигательной, сердечно-сосудистой и нервной системах.

Биологическое действие вибраций в диапазоне частот до 15 Гц проявляется в нарушении вестибулярного аппарата, смещении органов. Вибрационные колебания до 25 Гц вызывают костно-суставные изменения. Вибрации в диапазоне частот от 50 до 250 Гц вредно воздействуют на сердечно-сосудистую и нервную системы, часто вызывают вибрационную болезнь, которая проявляется болями в суставах, повышенной чувствительностью к охлаждению, судорогами. Эти изменения наблюдаются вместе с расстройствами нервной системы, головными болями, нарушениями обмена веществ, желез внутренней секреции. Наиболее опасны для человека частоты колебаний 6...9 Гц, так как они совпадают с собственной частотой колебаний внутренних органов человека.

Зона действия вибраций определяется величиной их затухания в упругой среде (грунте), и в среднем эта величина составляет примерно 1 дБ/м. При уровне параметров вибрации 70 дБ, например создаваемых рельсовым транспортом, примерно на расстоянии 70 м от источника эта вибрация практически исчезает. Для кузнечно-прессового оборудования зона действия вибраций может достигать 200 м.

Одна из основных причин появления низкочастотных вибраций при работе различных механизмов — дисбаланс вращающихся деталей, возникающий в результате смещения центра масс относительно оси вращения. Возникновение дисбаланса при вращении может быть вызвано:

- несимметричным распределением вращающихся масс, искривлением валов машин, наличием несимметричных крепежных деталей и т. д.;
- неоднородной плотностью материала, наличием раковин, шлаковых включений и других неоднородностей в материале конструкции;
- наличием люфтов, зазоров и других дефектов, возникающих при сборке и эксплуатации механизмов, и т. п.

Вибрации подчиняются всем физическим законам, относящимся к звуковым колебаниям. Вибрации в инженерном деле рассматриваются отдельно от звуковых колебаний и в общем случае аппроксимируются колеблющейся системой с шестью степенями свободы. В тех случаях, когда вибрирующая поверхность имеет размеры, соизмеримые с половиной длины волны, и вибрации ее происходят с звуковой частотой, в воздухе возникает шум.

Как и при всяком колебательном движении, параметрами вибрации являются: частота (Гц); амплитуда смещения (м или см); виброскорость (м/с); виброускорение (м/с²); период колебаний (с).

По источнику возникновения различают:

- локальные вибрации, передающиеся человеку от ручного немеханизированного инструмента (без двигателей);
- общие вибрации I категории — транспортные, воздействующие на человека на рабочих местах самоходных и прицепных машин, транспортных средств при движении по местности, агрофонам и дорогам (в том числе при их строительстве);
- общие вибрации II категории — транспортно-технологические, воздействующие на человека на рабочих местах машин, перемещающихся по специально подготовленным поверхностям производственных помещений, промышленных площадок, горных выработок;
- общие вибрации III категории — технологические, воздействующие на человека на рабочих местах стационарных машин или передающиеся на рабочие места, не имеющие источников вибрации.

По направлению действия в соответствии с направлением осей ортогональной системы координат выделяют:

- локальные вибрации, действующие вдоль осей ортогональной системы координат X_d , Y_d , Z_d ;
- общие вибрации, действующие вдоль осей ортогональной системы координат X_o , Y_o , Z_o .

По характеру спектра 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.

По частотному составу различают:

- низкочастотные вибрации (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах частот 1...4 Гц для общих, 8...16 Гц — для локальных вибраций);
- среднечастотные вибрации (8...16 Гц — для общих, 31,5...63 Гц — для локальных вибраций);
- высокочастотные вибрации (31,5...63 Гц — для общих, 125...1000 Гц — для локальных вибраций).

По временным характеристикам 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 изменении 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 имеется контакт, составляет более 1 с;

в) импульсные вибрации, состоящие из одного или нескольких вибрационных воздействий (например, ударов), каждый длительностью менее 1 с.

Вибрации данной круговой частоты ω характеризуются тремя основными параметрами: амплитудой смещения ξ , амплитудой скорости $\dot{\xi}$ и амплитудой ускорения $\ddot{\xi}$. В случае гармонических колебаний эти величины связаны между собой соотношением

$$\ddot{\xi} = i\omega\dot{\xi} = -\omega^2\xi,$$

где $\xi = \xi_0 e^{i\omega t}$ (ξ_0 — амплитуда смещения).

При работе различных механизмов появляется неуравновешенная центробежная сила, пропорциональная массе системы m , квадрату угловой скорости ω и эксцентриситету l центра массы системы относительно оси вращения: $F = lm\omega^2$.

Силу F можно рассматривать как вынуждающую силу, приводящую к биениям. В общем виде уравнение вынужденных колебаний можно записать так:

$$\frac{d}{dt}(\dot{x} + i\omega x) - i\omega(\dot{x} + i\omega x) = \frac{1}{m} F(t), \quad (5.1)$$

где x — смещение; ω — частота биений.

Перепишем уравнение (5.1):

$$\frac{d\xi}{dt} - i\omega\xi = \frac{1}{m} F(t), \quad (5.2)$$

где $\xi = x + i\omega x$.

Решив уравнение (5.2), получаем:

$$\xi = e^{i\omega t} \left\{ \int_0^t \frac{1}{m} F(t) e^{-i\omega t} dt + \xi_0 \right\},$$

где постоянная ξ_0 представляет собой значение ξ при $t = 0$.

Полная энергия, передаваемая системе (в нашем случае фундаменту машины) под действием вынуждающей силы $F(t)$ в результате биений, будет равна:

$$E = \frac{1}{2m} \left| \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2.$$

Таким образом, полная энергия E в нашем случае определяется квадратом модуля компоненты Фурье силы $F(t)$ с частотой, равной собственной частоте системы.

Другой причиной появления вибраций являются процессы ударного типа, наблюдаемые при работе кузнечно-прессового оборудования, при забивании молотом железобетонных свай при строительстве и т. п. При этом за довольно короткое время импульс (количество движения) тела передается другому неподвижному или двигающемуся навстречу телу. Кинетическая энергия, например молота, при соударении с грунтом превращается в энергию упругих колебаний грунта и частично в тепловую энергию. При этом выполняется закон сохранения импульса $\bar{K}$:

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n m_i v_i,$$

где m_i , v_i — масса и скорость тела; n — число взаимодействующих тел.

Источником вибрации являются различного рода резонансные колебания деталей, конструкций, механизмов, установок и т. п. Вибрации часто сопровождаются инфразвуковыми колебаниями. С другой стороны, инфразвуковые колебания часто вызывают вибрацию упругих тел и поверхностей.

Вибрацию, как и звук, выражают в логарифмических единицах. Уровень колебательной скорости вибрации, дБ,

$$L_v = 20 \lg \frac{\xi}{\xi_0}, \quad (5.3)$$

условный порог $\xi_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Колеблющаяся поверхность соприкасается с окружающим ее воздухом. В прилегающем к ней воздушном слое при колебании поверхности образуется синфазная звуковая волна, уровень которой зависит от возникающего в ней звукового давления. Связь же между звуковым давлением и колебательной скоростью осуществляется с помощью коэффициента пропорциональности, называемого волновым сопротивлением среды.

Формулой (5.3) выражается связь процессов колебаний поверхности и излучения ими звука. Действительно, при наличии в среде плоского фронта волны звукового давления амплитуда давления $p = \rho c \dot{\xi}$ или

$$\dot{\xi} = \frac{p}{\rho c}. \quad (5.4)$$

Подставив выражение (5.4) в уравнение (5.3), получаем уровень звукового давления в окружающей среде, который наблюдается при заданной величине колебательной скорости поверхности, дБ:

$$L_p = 20 \lg \frac{p_a \rho c}{\rho_0 \rho c} = 20 \lg \frac{p_a}{p_0}.$$

Следовательно, можно записать

$$20 \lg \frac{\dot{\xi}}{\dot{\xi}_0} = 20 \lg \frac{p_a}{p_0}.$$

Это равенство означает, что существует корреляционная зависимость между уровнем колебательной скорости вибрирующей поверхности и уровнем звукового давления возникающего при этом в воздухе шума:

$$20 \lg \frac{\dot{\xi}}{5 \cdot 10^{-8}} = 20 \lg \frac{p_a}{2 \cdot 10^{-5}},$$

где $\dot{\xi}$ — колебательная скорость вибрирующей поверхности, м/с; p_a — звуковое давление, Н/м².

Вибрационные системы состоят из элементов массы, упругости и демпфирования. В такой системе действуют силы инерции, трения, упругости и вынуждающие.

Сила инерции равна произведению массы m на ее ускорение dv/dt : $F_m = -mdv/dt$, где v — виброскорость.

Сила F_m направлена в сторону, противоположную ускорению.

Сила действия упругого элемента, т. е. восстанавливающая сила, будет направлена в противоположную сторону и равна

$$F_b = bx,$$

где b — коэффициент жесткости упругого элемента, Н/м; $x = x_1 - x_0$ — смещение конца упругого элемента, м.

При вибрации упругих систем происходит рассеяние энергии в окружающую среду, в материале упругих элементов и в местах со-

единений деталей конструкции. Эти потери вызываются силами трения (диссипативными силами), на преодоление которых необратимо рассеивается энергия источника вибрации.

Если рассеяние энергии происходит в элементе демпфирования, т. е. в среде с вязким сопротивлением, то диссипативная демпфирующая сила F_s прямо пропорциональна виброскорости v : $F_s = Rv$, где R — импеданс (сопротивление) элемента демпфирования, Н · с/м.

Импеданс вибросистемы складывается из импедансов элемента демпфирования, массы и упругости. Импеданс вибросистемы имеет минимальное значение в резонансной области, где он определяется импедансом элемента демпфирования. Вне резонансной области импедансом R можно пренебречь. В диапазоне высоких частот движение определяется вибрирующей массой m , а в диапазоне низких частот — жесткостью системы b .

Коэффициент потерь энергии с учетом импеданса составит $\eta = \omega R/b$.

5.2. ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ВИБРАЦИЙ

Различают санитарно-гигиеническое и техническое нормирование производственных вибраций. При санитарно-гигиеническом нормировании вибрации по ГОСТ 12.1.012—90 «Вибрационная безопасность. Общие требования» и СН 2.2.4/2.1.8.556—96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» производится ограничение параметров производственной вибрации рабочих мест и поверхностей контакта виброопасных механизмов с руками работающего исходя из физиологических требований. При техническом нормировании ограничивается уровень вибраций с учетом технически достижимого уровня защиты от вибраций. Санитарно-гигиенические нормы вибраций устанавливаются для длительности рабочей смены 8 ч.

ГОСТ 12.1.012—90 распространяется на рабочие места, на которых человек подвергается воздействию вибрации, машины и оборудование и технологические процессы, являющиеся источниками вибрации.

В соответствии с нормами СН 2.2.4/2.1.8.556—96 предельно допустимый уровень (ПДУ) вибрации — это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 ч 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 нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Показатели вибрационной нагрузки на человека-оператора формируются из следующих параметров: виброускорение (виброскорость); диапазон частот; время воздействия вибрации.

Санитарно-гигиеническая оценка постоянной и непостоянной вибрации, воздействующей на человека, производится: 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 в соответствии с ГОСТ 12.1.012—90 и СН 2.2.4/2.1.8.556—96 должен быть: 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 средние квадратические значения виброскорости (v) и виброускорения (a) или их логарифмические уровни (L_v , L_a), измеряемые в 1/1 и 1/3 октавных полос частот в децибелах.

При оценке вибрационной нагрузки на человека-оператора предпочтительным параметром является виброускорение.

Логарифмические уровни виброускорения (L_a), дБ, определяют по формуле

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{10^{-6}},$$

где a — среднее квадратическое значение виброускорения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Логарифмические уровни виброскорости (L_v), дБ, определяют по формуле

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{5 \cdot 10^{-8}},$$

где v — среднее квадратическое значение виброскорости, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

При интегральной оценке по частоте нормируемым параметром является скорректированное значение виброскорости и виброускорения (U) или их логарифмические уровни (L_U).

При интегральной оценке вибрации с учетом времени ее воздействия по эквивалентному (по энергии) уровню нормируемым параметром является эквивалентное скорректированное значение виброскорости или виброускорения ($U_{\text{экв}}$) или их логарифмический уровень ($L_{U_{\text{экв}}}$).

В качестве нормируемых показателей вибробезопасности машин используют кинематические (виброперемещение, виброскорость, виброускорение) или динамические (сила, момент силы) параметры.

Предельно допустимые величины нормируемых параметров производственной локальной вибрации при длительности вибрационного воздействия 480 мин (8 ч) приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям X_a, Y_a, Z_a			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с × 10 ⁻²	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 значения и их уровни	2,0	126	2,0	112

В соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.556—96 допустимый уровень вибрации в жилых и общественных зданиях — это уровень фактора, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состоя-

ния систем и анализаторов, чувствительных к вибрационному воздействию.

Допустимые значения нормируемых параметров вибрации в жилых помещениях приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Допустимые значения вибрации в жилых помещениях

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Допустимые значения по осям X_o, Y_o, Z_o			
	виброускорения		виброскорости	
	$m/c^2 \times 10^{-3}$	дБ	$m/c \times 10^{-4}$	дБ
2	4,0	72	3,2	76
4	4,5	73	1,8	71
8	5,6	75	1,1	67
16	11,0	81	1,1	67
31,5	22,0	87	1,1	67
63	45,0	93	1,1	67
Корректированные и эквивалентные значения и их уровни	4,0	72	1,1	67

Примечание. В дневное время в помещениях допустимо превышение уровней на 5 дБ.

5.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИЙ

Защита от вибрации в промышленности и в окружающей среде осуществляется воздействием на источник вибрации, снижением вибрации на пути ее распространения, применением соответствующей организации труда, использованием средств индивидуальной защиты, проведением лечебно-профилактических мероприятий.

Существуют следующие основные методы и способы защиты от вибрации:

- уменьшение или ликвидация возмущающих сил в источнике, достигаемое исключением возможных ударов и резких ускорений;

- изменение частоты собственных колебаний машины или установки для исключения резонанса с частотой возмущающей силы;
- вибродемфирование или вибропоглощение путем превращения энергии колебаний системы в тепловую энергию (использование материалов с большим внутренним трением: древесина, резина, пластмасса);
- виброгашение путем введения в колебательную систему дополнительных масс или увеличения жесткости системы путем установки агрегатов на фундамент;
- виброизоляция путем ввода в систему дополнительной упругой связи для ослабления передачи вибрации смежному элементу конструкции или рабочему месту.

В соответствии с ГОСТ 12.1.012—90 вибрационная безопасность труда должна обеспечиваться:

- системой технических, технологических и организационных решений и мероприятий по созданию машин и оборудования с низкой вибрационной активностью;
- системой проектных и технологических решений производственных процессов и элементов производственной среды, снижающих вибрационную нагрузку на оператора;
- системой организации труда и профилактических мероприятий на предприятиях, ослабляющих неблагоприятное воздействие вибрации на оператора.

Основной способ обеспечения вибробезопасности — создание и применение вибробезопасных машин.

Для исключения воздействия вибраций на окружающую среду необходимо принимать меры по их снижению прежде всего в источнике возникновения или, если это невозможно, на путях распространения.

Снижение вибраций в источнике производится как на этапе проектирования, так и при эксплуатации. При создании машин и технологического оборудования предпочтение должно отдаваться кинематическим и технологическим схемам, исключаящим или предельно снижающим динамические процессы, вызванные ударами, резкими ускорениями и т. п.

При проектировании и строительстве зданий и промышленных объектов, других элементов производственной среды, а также разработке технологических процессов должны быть использованы методы, снижающие вибрацию на путях ее распространения от источника возбуждения.

При проектировании технологических процессов и производственных зданий и сооружений должны быть:

выбраны машины с наименьшей вибрацией;

зафиксированы рабочие места (зоны), на которых работающие могут подвергаться воздействию вибрации;

определены требования вибробезопасности по санитарным нормам с учетом временных ограничений воздействия вибрации, заложенных в технологический процесс и зафиксированных в проектной документации;

разработаны схемы размещения машин с учетом создания минимальных уровней вибрации на рабочих местах;

произведена и указана в проектно-технологической документации оценка ожидаемой вибрационной нагрузки на оператора;

выбраны строительные решения оснований и перекрытий, обеспечивающие выполнение требований вибрационной безопасности труда;

выбраны и рассчитаны необходимые средства виброзащиты для машин или рабочих мест, обеспечивающие вместе со строительными решениями выполнение требований вибробезопасности труда.

Причиной низкочастотных вибраций насосов, компрессоров, двигателей является дисбаланс вращающихся элементов (роторов), вызванный неоднородностью материала конструкции (литейные раковины, шлаковые включения) и неравномерностью его плотности, несимметричным распределением вращающихся масс (начальное искривление валов и роторов), нарушением указанной симметрии крепежными соединениями, неправильным выбором допусков на обработку и рода посадок, а также различием коэффициентов объемного расширения или износостойкости отдельных элементов вращающейся системы. Во всех случаях смещение центра масс относительно оси вращения приводит к возникновению неуравновешенной центробежной силы: $F = me\omega^2$, где m — масса вращающейся системы; e — эксцентриситет (радиус-вектор) центра рассматриваемой массы относительно оси ротора; ω — угловая скорость вращения.

Действие неуравновешенных динамических сил усугубляется плохим креплением деталей, их износом в процессе эксплуатации.

Для снижения уровня вибраций, возникающих из-за дисбаланса оборудования при монтаже и эксплуатации, следует балансировать неуравновешенные роторы, колеса лопаточных машин, валы двигателей и т. п.

В процессе эксплуатации технологического оборудования должны приниматься меры к устранению излишних люфтов и зазоров, что обеспечивается периодическим освидетельствованием источников вибрации.

Весьма эффективный метод снижения вибрации в источнике — исключение резонансных режимов работы оборудования. В этом случае даже при малых значениях дисбаланса и относительно небольших возбуждающих воздействиях уровень вибрационных параметров резко возрастает. Для снижения уровня производственных вибраций важно исключить резонансные режимы работы технологического оборудования. При проектировании это достигается выбором рабочих режимов с учетом собственных частот машин и механизмов. В процессе эксплуатации можно уменьшить жесткость агрегатов, а в некоторых случаях и их массы, что изменит значения собственных частот. Возможно изменение рабочих режимов оборудования. Все это следует учитывать, если машины и механизмы в процессе эксплуатации со временем становятся источником вибраций.

К основным характеристикам *виброзащитных систем* относятся собственная частота системы, механический импеданс и коэффициенты, определяющие процессы затухания вибраций и рассеяния энергии.

Учитывая, что собственная частота колебательной системы

$$\omega_0 = \sqrt{b/m}, \quad (5.5)$$

где b и m — соответственно жесткость и масса системы; изменяя любую из этих характеристик, можно исключить режим резонанса.

Если не удастся снизить вибрации в источнике возникновения, то применяют методы снижения вибраций на путях распространения: виброгашение, виброизоляция или вибродемпфирование.

Свободная вибрация ($F_i = 0$) в отсутствие сил трения ($F_s = 0$) с течением времени не затухает.

При условии $F_m + F_b = 0$ собственная частота колебаний вибросистемы определяется выражением (5.5).

При наличии сил трения ($F_s \neq 0$) свободная вибрация ($F_i = 0$) затухает. Амплитуда виброскорости при этом с течением времени убывает.

Отношение потока энергии на входе в защитное устройство (ЗУ) и на выходе из него W^+/W^- называют силовым коэффициентом защиты при виброизоляции: $k_F = W^+/W^-$. Степень защиты определяется также динамическим коэффициентом защиты k_x , равным отношению амплитуды смещения источника к амплитуде смещения

приемника. Энергетический коэффициент защиты $k_W = k_F k_X$. В общем случае эффективность виброизоляции

$$\Theta = 10 \lg k_W = 10 \lg \left[\eta^2 + \left(\omega^2 / \omega_0^2 - 1 \right)^2 \right] - 10 \lg (1 + \eta^2).$$

Если потери в защитном устройстве отсутствуют ($\eta = 0$), то эффективность

$$\Theta = 20 \lg \left(\omega^2 / \omega_0^2 - 1 \right).$$

5.3.1. Виброгашение

Использование этого метода связано с увеличением реактивной части импеданса колебательной системы.

Виброгашение реализуется при увеличении эффективной жесткости и массы корпуса машин или станин станков за счет их объединения в единую замкнутую систему с фундаментом с помощью анкерных болтов или цементной подливки. С этой же целью относительно малогабаритное инженерное оборудование жилых зданий (вентиляторы, насосы) устанавливают на опорные плиты и виброгасящие основания (рис. 5.1). Колебания сварных фундаментов примерно в 2 раза ниже, чем ленточных.

Определение амплитуд вынужденных и свободных колебаний фундамента производят в соответствии с указаниями СНиП 2.02.05—87 и учетом типа машин. Расчетная динамическая нагрузка $P_d = h \eta P_n$,

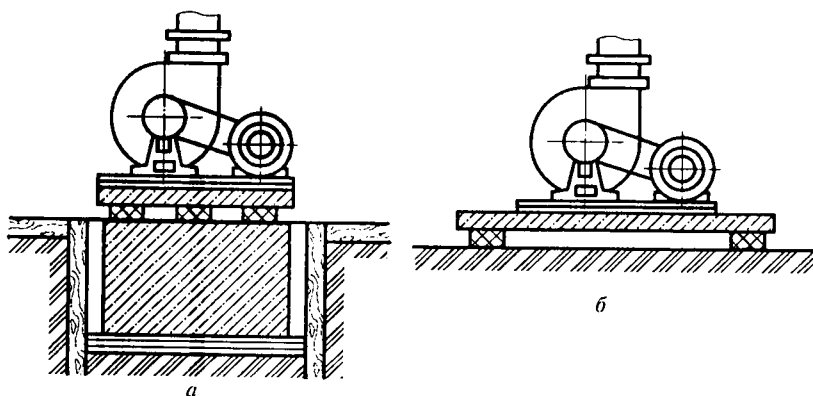


Рис. 5.1. Установка агрегатов на виброгасящем основании:

a — на фундаменте в грунте; *б* — на перекрытии

где h и η — коэффициенты соответственно надежности и динамичности, характерные для каждого типа машин; P_n — нормативное значение динамической нагрузки, соответствующее нормальному эксплуатационному режиму работы машины.

Допустимые значения вибраций определяются условием $A_{\max} \leq A_{\text{доп}}$, где $A_{\max}$ — наибольшая амплитуда колебаний фундамента по расчету; $A_{\text{доп}}$ — допустимая амплитуда колебаний фундамента в соответствии с указаниями СНиП.

Для машин с кривошипно-шатунными механизмами расчет амплитуд вертикальных колебаний рассчитывают по формуле

$$A_{\max} = P_{\text{зд}} / (b_z - m_{\Sigma} \omega^2).$$

Здесь $P_{\text{зд}}$ — расчетная вертикальная составляющая возмущающих сил машины в соответствии со СНиП 2.02.05—87, Н; m_{Σ} — суммарная масса машины и фундамента, кг; b_z — коэффициент жесткости основания при упругом равномерном сжатии, Н/м; $b_z = c_z S$, где S — площадь подошвы фундамента, м²; c_z — коэффициент упругого равномерного сжатия естественного основания, определяемый по результатам исследований. Значение c_z для наиболее распространенных фундаментов с площадью подошвы S не более 200 м² определяют по формуле

$$c_z = b_0 G (1 + \sqrt{S_0 / S}),$$

где b_0 — коэффициент, м^{−1} (принимается равным 1 — для песков; 1,2 — для суспензий и суглинков; 1,5 — для глин и крупнообломочных грунтов); G — модуль деформации грунта, тс/м², определяемый в соответствии с требованиями СНиП по проектированию оснований зданий и сооружений; $S_0 = 10$ м²; S — площадь подошвы фундамента, м².

Снижение вибраций, создаваемых рельсовым транспортом, обеспечивается укладкой и креплением рельсов на массивные железобетонные шпалы.

Одним из средств борьбы с распространением вибраций по конструкциям здания является применение динамических успокоителей колебаний или, как их иначе называют, виброгасителей. Динамические гасители колебаний применяют для снижения колебаний фундамента на отдельных частотах.

Виброгаситель, настраиваемый на одну частоту, представляет собой массу, укрепленную на пружине. Собственная частота такой дополнительной системы, присоединенной к главной, колеблющейся

под влиянием возмущающей силы, должна быть равна частоте возмущающей силы. В этом случае присоединенная система приходит в резонансные колебания, а главная система, которую требуется успокоить, прекращает колебательное движение. Для того чтобы доказать изложенное, рассмотрим колебание системы с сосредоточенными параметрами и двумя степенями свободы, показанное на рис. 5.2.

Уравнение движения системы с двумя степенями свободы будет иметь следующий вид:

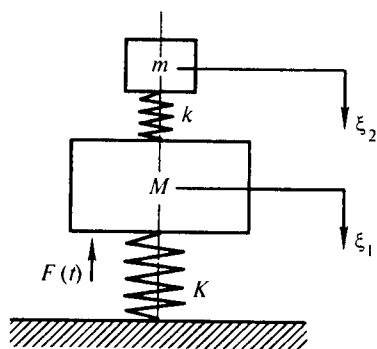


Рис. 5.2. Схема механического виброгасителя с массами M и m и жесткостью K и k

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\xi}_1 &= -K\xi_1 - k(\xi_1 - \xi_2) + F(t) \\ m\ddot{\xi}_2 &= -k(\xi_2 - \xi_1) \end{aligned} \right\}, \quad (5.6)$$

где M , K — масса и жесткость основной системы; m , k — то же, присоединенной системы.

На основании системы двух уравнений (5.6) можно показать, что наличие виброгасителя массой m успокоит движение главной массы M .

Перепишем систему уравнений (5.6) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\xi}_1 + (K + k)\xi_1 - k\xi_2 &= F_0 \sin \omega t \\ m\ddot{\xi}_2 + k(\xi_2 - \xi_1) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5.7)$$

Положим, что $\xi(t) = \xi_0 \sin \omega t$. Тогда $\ddot{\xi}(t) = -\xi_0 \sin \omega t$.

Подставляя значения смещения и ускорения в функции времени в формулу (5.7) и оставляя амплитудные значения (сокращая $\sin \omega t$), получим:

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 (-M\omega^2 + K + k) - k\xi_2 &= F_0 \\ -k\xi_1 + \xi_2 (-m\omega^2 + k) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5.8)$$

Разделим уравнения (5.8) на K и k и, приняв

$$\frac{K}{m} = \Omega^2 \text{ и } \frac{k}{m} = \omega_0^2,$$

получим

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + \frac{k}{K} \right] - \xi_2 \frac{k}{K} &= X_{\text{ст}} \\ \xi_1 &= \xi_2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\}.$$

Определяя коэффициенты передачи, которые будут иметь место при ξ_1 и ξ_2 , получим:

$$\frac{\xi_1}{X_{\text{ст}}} = \frac{1 - (\omega/\omega_0)^2}{\left[1 - (\omega/\omega_0)^2 \right] \left[1 - (\omega/\Omega)^2 + k/K \right] - k/K}; \quad (5.9)$$

$$\frac{\xi_2}{X_{\text{ст}}} = \frac{1}{\left[1 - (\omega/\omega_0)^2 \right] \left[1 - (\omega/\Omega)^2 + k/K \right] - k/K}. \quad (5.10)$$

Рассматривая уравнение (5.9), можно сделать следующие выводы: при равенстве собственной частоты ω_0 присоединенной колебательной системы возбуждающей частоте ω в числителе формулы получим нуль. Следовательно, коэффициент передачи в этом случае будет также равен нулю, а это может быть только тогда, когда главная масса M неподвижна.

Рассмотрим теперь уравнение (5.10) при тех же условиях, т. е. когда $\omega = \omega_0$:

$$\xi_2/X_{\text{ст}} = -K/k,$$

или

$$\xi_2 = -\frac{KX_{\text{ст}}}{k} = -\frac{F_0}{k}.$$

Следовательно, при движении амплитуда смещения успокоителя колебаний будет изменяться по закону

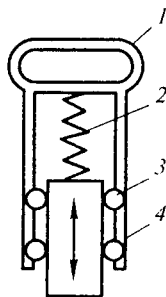
$$\xi_2 = -\frac{F_0}{k} \sin \omega t. \quad (5.11)$$

Уравнение (5.11) показывает, что периодическая сила успокоителя равна и противоположно направлена возмущающей силе.

На практике полностью устранить колебания фундамента нельзя, однако применение динамического гасителя колебаний может оказаться очень эффективным, особенно при низкой частоте возбуждения колебаний.

Рис. 5.3. Виброгасящая рукоятка:

1 — рукоятка; 2 — пружина; 3 — подшипник; 4 — корпус



Примером использования эффекта механического гашения колебаний является ручной пневматический инструмент, в котором с помощью винтовой цилиндрической пружины скользящий корпус рукоятки изолирован от вибрирующего ствола. Примером такой виброзащиты является виброгасящая рукоятка, конструкция которой показана на рис. 5.3.

Из-за снижения сил трения между поверхностью корпуса инструмента и рукояткой, достигнутого с помощью шарикоподшипников, амплитуда смещения при наличии вибрации уменьшилась в 8...10 раз.

5.3.2. Виброизоляция

Виброизоляция — средство уменьшения динамических сил, передаваемых с виброактивной системы на другую, защищаемую от вибрации.

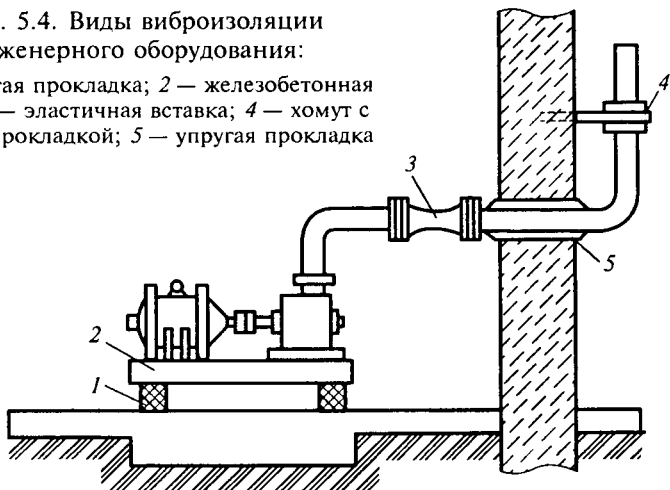
При виброизоляции механизмов создаются такие условия на пути распространения колебаний, которые увеличивают необратимые потери энергии и тем самым уменьшают передаваемую от источника колебательную энергию. При разработке мероприятий по виброизоляции следует добиваться, чтобы амплитуды колебаний, проходящих через акустический фильтр, которым являются всякого рода упругие прокладки, были возможно меньше.

Методы установки оборудования на фундамент требуют больших затрат времени. К тому же фундаменты таких машин, как молоты, представляют собой сложные строительные сооружения высотой с трех-, четырехэтажный дом, стоимость которых может на порядок превышать стоимость машины. Поэтому на этапе эксплуатации промышленных комплексов в основном без фундамента устанавливают оборудование непосредственно на виброизолирующих опорах. Такой метод позволяет обеспечить любую степень виброизоляции оборудования.

Установка на виброизолирующие опоры технологического и инженерного оборудования удешевляет его монтаж, исключает порчу оборудования и снижает уровень шума, сопутствующий интенсивным вибрациям. Такие опоры могут применяться также и при

Рис. 5.4. Виды виброизоляции инженерного оборудования:

1 — упругая прокладка; 2 — железобетонная плита; 3 — эластичная вставка; 4 — хомут с упругой прокладкой; 5 — упругая прокладка



наличии фундаментов: либо между источником вибраций (машиной) и фундаментом (основанием, опорной плитой), либо между фундаментом и грунтом. Для ограничения распространения колебаний инженерные коммуникации разделяют на отдельные участки специальными гибкими вставками. Во всех рассмотренных случаях введение в колебательную систему дополнительной гибкой связи ослабляет передачу вибрации от источника колебаний (рис. 5.4).

Виброизоляторы устанавливают также при прокладке воздуховодов систем вентиляции и разного рода трубопроводов внутри строительных конструкций. Это исключает передачу вибраций от стенок воздуховодов и трубопроводов элементам конструкции зданий. Для уменьшения передачи вибраций от трубопроводов к строительным конструкциям в местах установки креплений под трубопроводы устанавливают упругие прокладки из резины или другого материала.

Один из способов крепления трубопроводов к стенам показан на рис. 5.5. В качестве упругого элемента между деревянной обоймой, в которой лежит трубопровод, и стойкой, крепящейся к стене, установлены резиновые прокладки, выполненные в виде усеченных призм.

Такая геометрическая форма создает в прокладке неравные напряжения, при которых в области их максимальных значений обеспечивается пониженная собственная частота.

В качестве виброизоляторов используют резиновые или пластмассовые прокладки, одиночные или составные цилиндрические пружины, листовые рессоры, комбинированные виброизоляторы (пружинно-резиновые, пружинно-пластмассовые, пружинно-рессор-

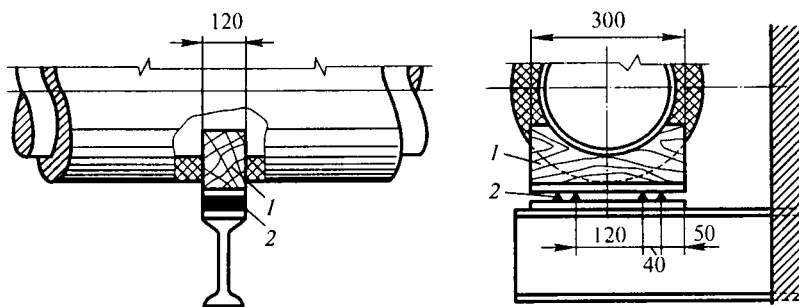


Рис. 5.5. Схема крепления трубопровода к стене на кронштейне:

1 — деревянная обойма; 2 — резиновые призмы-амортизаторы

ные) и пневматические виброизоляторы (воздушные подушки). Виброизолирующие резиновые прокладки выполняют обычно со сквозными или полусквозными отверстиями или оребренными, поскольку резина не склонна к объемной деформации.

Цилиндрические пружины и рессоры по сравнению с прокладками более стойки к воздействию агрессивных сред, дольше сохраняют упругие свойства и позволяют изолировать низкочастотные колебания, так как при прочих равных условиях обеспечивают большую статическую осадку. Существенный недостаток цилиндрических пружин — малое снижение высокочастотных вибраций.

Широко используют комбинированные виброизоляторы (рис. 5.6), состоящие из цилиндрической пружины и набора резиновых про-

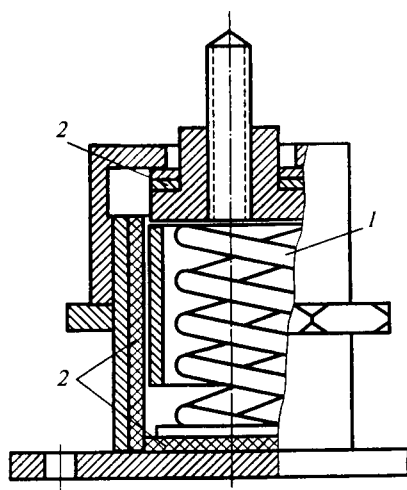


Рис. 5.6. Комбинированные виброизоляторы:

1 — цилиндрическая пружина;
2 — набор резиновых прокладок

кладок, отделяющих пружину как от опорной поверхности, так и от элементов корпуса виброизолятора.

Конструкции такого рода позволяют обеспечить эффективное снижение уровня вибраций в широкой полосе частот. Их применяют для ослабления передачи вибрации большинства видов стационарного и технологического оборудования (станки, насосы, вентиляторы). Для изоляции вибраций инженерного оборудования жи-

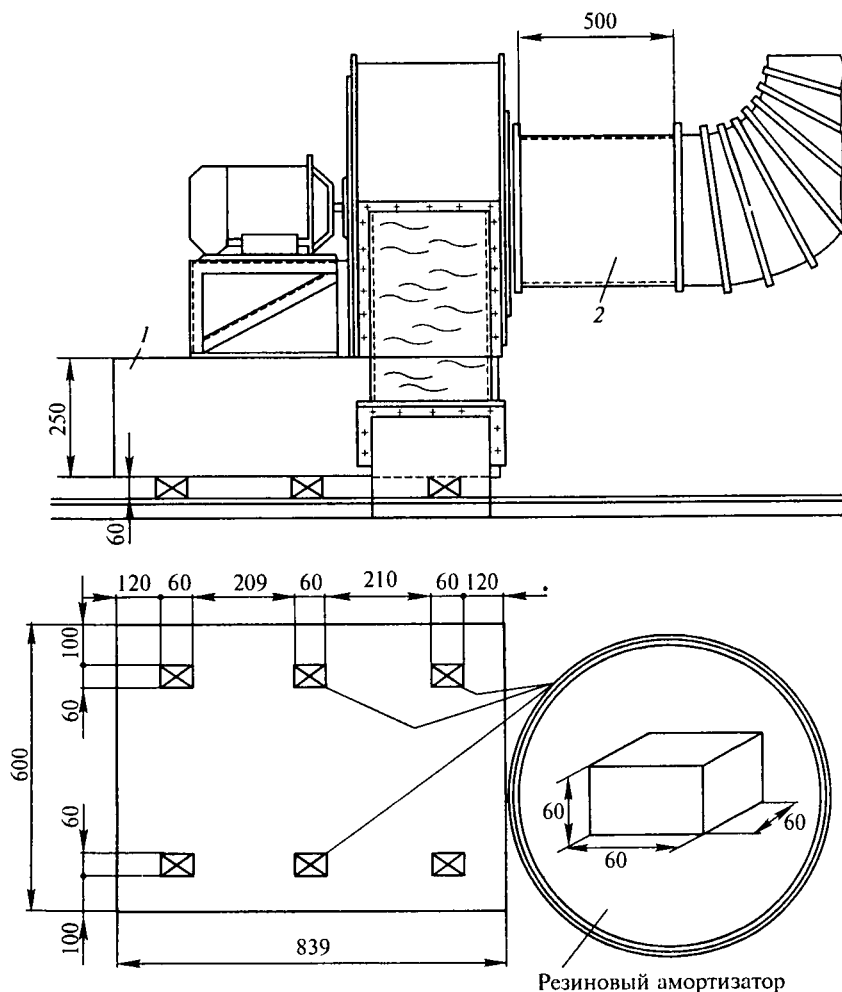


Рис. 5.7. Схема установки вентилятора на плавающем основании:

1 — железобетонная плита; 2 — брезентовая манжета

лых и административных зданий, как правило, используют пружинные виброизоляторы или резиновые прокладки. Для снижения передачи колебаний, создаваемых рельсовым транспортом, практикуется виброизоляция рельсового пути.

На рис. 5.7 показана установка вентилятора на плавающем фундаменте, расположенном на железобетонном основании. В качестве упругих прокладок использована резина. Железобетонная плита имеет вес, втрое превышающий вес вентилятора. Центробежный вентилятор соединен с воздухопроводом гибкой брезентовой манжетой. Плавающий фундамент локализовал вибрации, благодаря чему ограждения здания перестали излучать звуковую энергию.

На рис. 5.8 показана спиральная пружина, употребляемая в качестве амортизатора. Высота ее в ненагруженном состоянии 80, в нагруженном — 60 мм. Толщина спирального прутка, из которого навита пружина, 7 мм, внутренний диаметр 51 мм, наружный — 58 мм. Допускаемая нагрузка — 500 Н на одну пружину. Статическая осад-

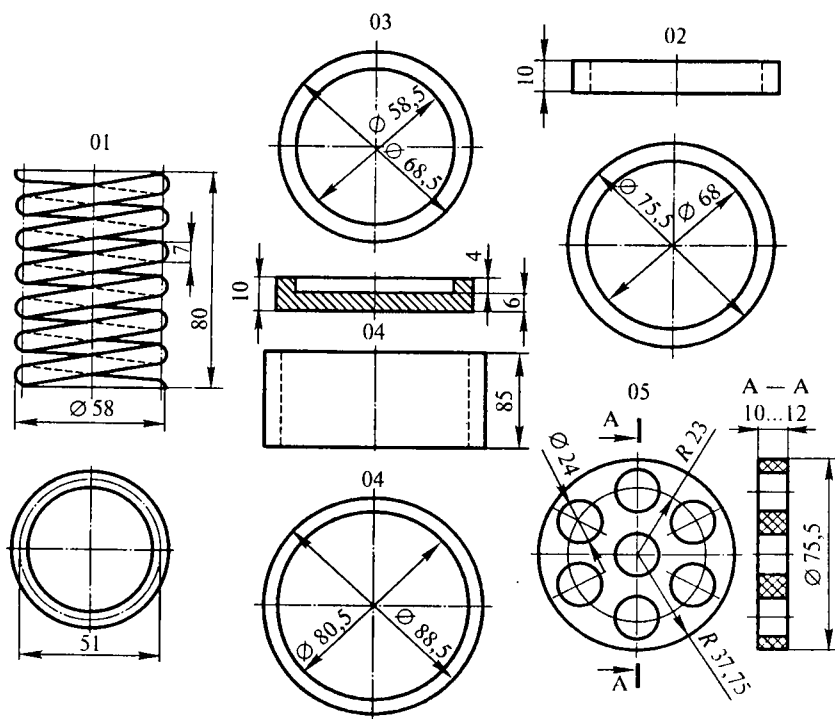
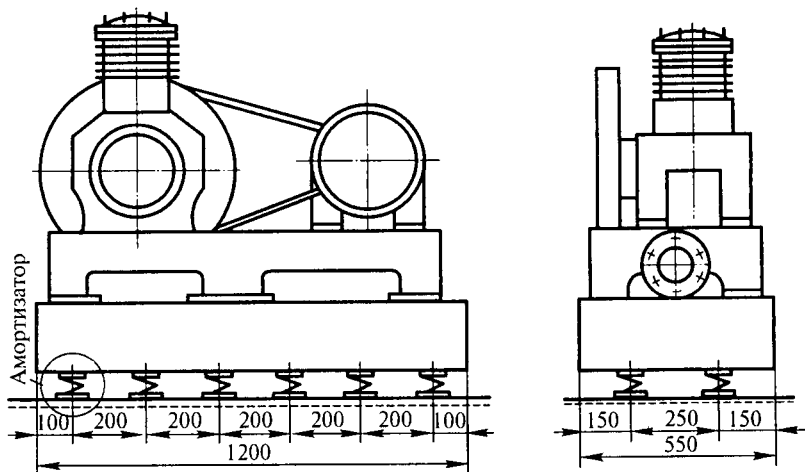


Рис. 5.8. Пружинный амортизатор

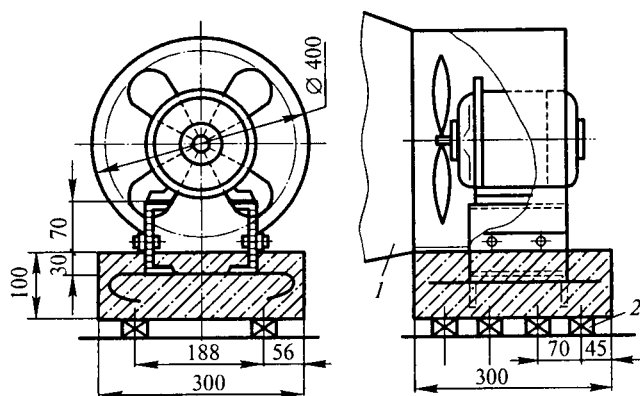


Р и с. 5.9. Схема компрессора, установленного на плавающем основании

ка при допускаемой нагрузке равна 20 мм. Обеспечиваемая собственная частота подрессоренной системы 3,6 Гц.

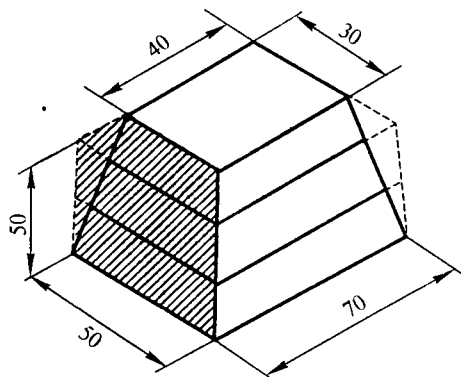
На рис. 5.9 показан типичный случай установки плавающего на спиральных пружинах основания под компрессор.

Установка осевого вентилятора на амортизирующие прокладки показана на рис.5.10, а размеры резинового амортизатора, выполненного в форме усеченной пирамиды, даны на рис. 5.11.



Р и с. 5.10. Схема установки вентилятора на амортизаторах:
1 — диффузор; 2 — амортизаторы

Рис. 5.11. Резиновые прокладки в форме усеченных пирамид с рабочей нагрузкой 600 Н на прокладку



Пустотные экраны с дискретными связями между составляющими плитами, устанавливаемые в грунте между рельсовыми путями и фундаментами зданий, снижают колебания в 3...4 раза.

Это приводит к резкому ослаблению передачи вибраций на основание виброплатформы, грунт и далее на фундаменты рядом расположенных зданий без снижения уровня рабочих параметров вибратора.

Фундаментный блок под виброизолируемой машиной устраивают в следующих случаях: корпус машины имеет недостаточную жесткость; размещение виброизоляторов непосредственно под корпусом машины имеет конструктивные затруднения; изолируется агрегат, состоящий из отдельных машин, установленных на отдельных фундаментных блоках; требуется увеличить массу изолируемой установки и моменты инерции для уменьшения амплитуды ее вынужденных колебаний. Увеличение массы и моментов инерции позволяет избежать повышения частоты собственных колебаний установки, обусловленного увеличением жесткости виброизоляторов. Кроме того, это способствует устранению недопустимых перекосов установки от временных статических нагрузок и уменьшению амплитуды собственных колебаний установки, вызванных случайными ударами.

Иногда фундаментные блоки заменяют виброизоляцией специальной конструкции (рис. 5.12). Здесь в качестве виброизоляторов использованы 12 комплектов семилистовых эллиптических рессор, расположенных в двух поясах по высоте подшаботной ямы (опорно-подвесной вариант). Шабот опирается на рессоры через переходную раму. Вертикальность перемещения шабота при ударах, создающих дополнительный опрокидывающий момент, обеспечивается шестью роликовыми направляющими, установленными в раме

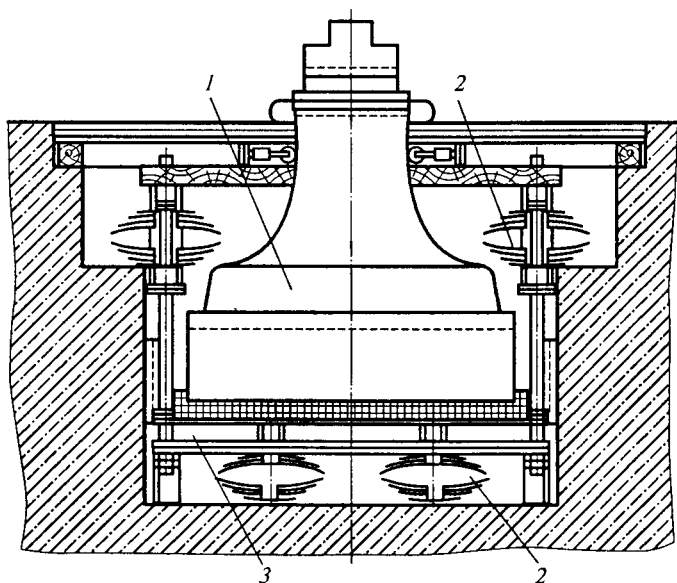


Рис. 5.12. Подшаботная виброизоляция
на невibroизолированном фундаменте:
1 — шабот; 2 — рессоры; 3 — переходная рама

перекрытия подшаботной ямы. Использование этой конструкции позволяет снизить виброускорение в близлежащих жилых домах в 20...30 раз.

Для исключения передачи вибраций от фундаментов технологического оборудования предприятий в жилую застройку по периметру фундаментов на всю его высоту предусматривают акустические швы с засыпкой какого-либо рыхлого материала, например асбестовой крошки. К мероприятиям аналогичного назначения относят устройство акустических щелей, в которых изолирующей прослойкой служит воздух.

Полы на упругом основании из минераловатных плит или резиновых виброизоляторов позволяют снизить колебания в диапазоне частот 31,5...63 Гц в 1,5...2,5 раза. Большое снижение вибраций достигается в перекрытиях с засыпкой и беспустотным полом.

Машина, установленная на амортизирующие устройства, в общем случае представляет собой колебательную систему с шестью степенями свободы. Машины, у которых гармоническая возмущающая сила имеет вертикальное направление и приложена к точке, находящейся на одной вертикали с центром тяжести, можно рассматривать

как системы с одной степенью свободы. К таким машинам можно отнести, например, вертикальные одноцилиндровые компрессоры, вибростенды с вертикально направленным вибратором и др. Однако с определенным приближением, которое должно быть в каждом конкретном случае оценено, указанные допущения могут быть распространены и на некоторые другие машины и агрегаты.

Эффективность виброизоляции при действии гармонических нагрузок оценивается коэффициентом передачи (КП). При поступательных колебаниях в направлении оси x пространства и вращательных колебаний вокруг этой оси соответствующие коэффициенты передачи определяют по формулам:

$$КП_x = \frac{F_{кx}}{F_x} = \frac{1}{\alpha_x^2 - 1}, \quad КП_{\varphi x} = \frac{M_{кx}}{M_x} = \frac{1}{\alpha_{\varphi x}^2 - 1}, \quad (5.12)$$

где $F_{кx}$ и $M_{кx}$ — соответственно амплитуды гармонической силы и гармонического момента относительно оси x , передающиеся через виброизоляторы на опорную конструкцию; F_x , M_x — соответственно амплитуды гармонической силы и момента, воздействующие на изолируемую установку; $\alpha_x = \omega_x / \omega_{0x}$, $\alpha_{\varphi x} = \omega_x / \omega_{0\varphi x}$ — соответственно отношения угловой частоты вынужденных колебаний ω_x к угловой частоте ω_{0x} и $\omega_{0\varphi x}$ собственных возвратно-поступательных вращательных колебаний установки относительно той же оси.

Выбор виброизоляции можно вести в определенной последовательности. Выбирают конкретный тип виброизоляторов с известными допустимыми нагрузками и жесткостными характеристиками и определяют значения собственных частот f_0 виброизолированной установки. Для известных значений частот ω возмущающих сил и моментов рассчитывают по формуле (5.12) соответствующие значения КП и сопоставляют с требуемыми значениями.

5.3.3. Вибродемпфирование

Метод вибродемпфирования (вибропоглощения) основан на увеличении активных потерь в колебательных системах. Искусственное увеличение потерь колебательной энергии в системе значительно уменьшает амплитуды колебаний особенно в резонансных областях.

Это достигается выбором материалов и конструкции с малой жесткостью и большим внутренним трением; использованием прокладок с малым значением модуля Юнга в местах сочленения отдельных элементов конструкции; искусственным демпфированием вибрирующей поверхности различными покрытиями. При вибро-

поглощении упруговязкие материалы, обладающие большими внутренними потерями энергии, наносят на вибрирующие элементы машины, причем вибропоглощающий материал должен быть плотно скреплен с колеблющейся поверхностью.

Вибрирующие со значительной амплитудой поверхности оборудования покрывают вибропоглощающими и демпфирующими материалами с большими коэффициентами внутреннего трения — битумом, резиной, толем, фетром, асбестом, пластмассами, специальными мастиками при условии плотного их прилегания к вибрирующей поверхности.

В качестве основной характеристики вибродемпфирования принят коэффициент потерь энергии $\eta = \omega\mu/b$, где ω — угловая частота колебаний; μ — коэффициент вязкого трения; b — жесткость системы.

Снижение уровня вибрации при вибродемпфировании определяют по формуле $\Delta L_v = 20 \lg (\eta_2/\eta_1)$, где η_1 и η_2 — коэффициенты потерь до и после вибродемпфирования (для чугунов и сталей $\eta = 10^{-3} \dots 10^{-4}$).

Вибрации от места их возникновения в механизме к наружным поверхностям распространяются по корпусу главным образом за счет изгибных колебаний конструкций (в тех случаях, когда длина изгибной волны значительно больше толщины колеблющейся детали). Одновременно по конструкции распространяются и продольные волны, длины которых соизмеримы с линейными размерами конструкций. Обычно эти волны возникают в области высоких частот потому, что распространение продольных звуковых волн в твердых телах происходит с высокими скоростями.

Благодаря тому, что колеблющаяся деталь соприкасается с окружающим воздухом, последний приводится в соколебания, в результате чего возникает шум. Уровень излучаемого в воздух помещения шума пропорционален квадрату колебательной скорости вибрирующей пластины. Колебательная скорость имеет максимальные значения на резонансных частотах, совпадающих с возбуждающими частотами источника. Излучаемая при этом звуковая энергия определяется величинами действующих сил, их частотным составом, динамическими характеристиками машины и режимом ее работы, а также линейными размерами детали.

Снижение структурного шума достигается увеличением активной части механического импеданса или массы конструкции, а также размещением на пути следования бегущей волны сред с импедансами меньшими, нежели импеданс волновода.

Вибрирующие элементы большинства промышленных установок имеют широкие спектры собственных частот, среди которых находится большое количество частот, приходящих в резонансные соколебания с возбуждающими частотами. Каждая собственная частота соответствует определенной форме колебаний элемента и, попадая в резонанс с возбуждающей частотой, способствует увеличению уровня шума.

Измерение резонансных частот колебаний разного рода элементов промышленных установок встречает значительные трудности из-за наличия широкого спектра их собственных частот, создаваемых распределенными системами, а также из-за отсутствия методик расчета собственных частот колебаний реальных конструкций, существенно отличающихся по форме от пластин, мембран, стержней, колец и т. п., теоретический расчет которых возможен. Однако собственные частоты полирезонансных систем, каковыми являются вибрирующие элементы машин, представляют сходящийся ряд. Первые гармоники ряда, обычно имеющие наибольшую амплитуду, с достаточной точностью аппроксимируются аналогичными параметрами колебательной системы с одной степенью свободы.

Покажем связь коэффициента потерь с другими величинами, определяющими свойства колебательной системы. Коэффициент внутренних потерь η связан с резонансной частотой f_0 и шириной резонансной кривой Δf при амплитуде, равной $0,707$ максимальной (рис. 5.13). Найдем условие, при котором амплитуда колебательной скорости уменьшится до $0,707\xi_a$, для чего положим $\omega = \omega_2$ и запишем уравнение движения в виде

$$\omega_2 m - \frac{k}{\omega_2} = \frac{k}{\omega_2} \eta. \quad (5.13)$$

Уравнение (5.13) можно представить так:

$$\frac{\omega_2 \omega_2 m}{k} - 1 = \eta. \quad (5.14)$$

Так как $\omega_0^2 = k/m$, то из выражения (5.14) следует

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2 = \left(\frac{f_2}{f_0}\right)^2 = 1 + \eta.$$

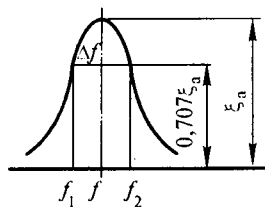


Рис. 5.13. К определению вида колебательного контура

Отсюда

$$f_2 = f_0 \sqrt{1 + \eta}. \quad (5.15)$$

На рис. 5.13 видно, что ширина резонансной кривой

$$\Delta f = 2(f_2 - f_0). \quad (5.16)$$

Подставляя выражение (5.15) в выражение (5.16), получим

$$\Delta f = 2f_0 (\sqrt{\eta + 1} - 1). \quad (5.17)$$

При $\eta < 0,3$, что имеет место для большинства рассматриваемых колебательных систем с вибропоглощающим покрытием, из выражения (5.17) получим

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Параметр η связан с логарифмическим декрементом d и добротностью Q колебательной системы следующими зависимостями:

$$\eta = d/\pi; \quad \eta = 1/Q.$$

Коэффициент потерь η является не только мерой внутренних потерь энергии в твердых телах, но и мерой демпфирования при сочетании металла конструкции с вибропоглощающим покрытием. Эта величина пропорциональна той части энергии собственных колебаний системы, которая в единицу времени рассеивается, превращаясь в теплоту.

Эффективное действие вибропоглощающих покрытий наблюдается на резонансных частотах несущей металлической конструкции. Акустический эффект покрытий основан на введении дополнительного затухания в элементы конструкции, вследствие чего амплитуды бегущих и стоячих волн в конструкциях уменьшаются.

Вибропоглощающие покрытия подразделяются на жесткие и мягкие. К жестким покрытиям относятся твердые пластмассы (часто с наполнителями) с динамическими модулями упругости, равными $10^4 \dots 10^5$ Н/см². Действие этих вибропоглощающих покрытий обусловлено их деформациями в направлении, параллельном рабочей поверхности, на которую они наносятся. Ввиду их относительно большой жесткости они вызывают сдвиг нейтральной оси вибрирующего элемента машины при колебаниях изгиба. Действие подобных покрытий проявляется главным образом на низких и средних звуковых частотах. На вибропоглощение в данном случае кроме внутренних

потерь большое влияние оказывает жесткость или упругость материала. Чем больше упругость (жесткость), тем выше потери колебательной энергии. Покрытия такого типа могут быть выполнены в виде одно-, двух- и многослойных конструкций. Последние более эффективны, чем однослойные. Иногда твердые вибропоглощающие материалы применяют в виде комплексных систем (компаундов), состоящих из полимеров, пластификаторов, наполнителей. Каждый компонент придает поглощающему слою определенные свойства.

К мягким покрытиям относятся мягкие резины и пластмассы, битумизированный войлок, мастики и другие материалы с динамическим модулем упругости порядка 10^3 Н/см². Затухание колебаний металлических конструкций при нанесении на них таких покрытий обусловлено деформациями покрытия по его толщине. Поэтому мягкие покрытия при равной толщине с твердыми покрытиями более эффективно работают на высоких частотах.

Действие вибропоглощающих покрытий будет удовлетворительным при условии, если протяженность поглощающего слоя равна нескольким длинам волн колебаний изгиба. При малой протяженности облицовки по сравнению с длиной волны изгиба покрытия не уменьшают амплитуд колебаний. Это условие особенно важно учитывать при демпфировании вибраций на низких частотах, когда длины изгибных волн велики и требуются вибропоглощающие покрытия значительной протяженности.

5.4. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИЙ

5.4.1. Расчет виброизоляции

Методика расчета виброизоляции для машины с одной степенью свободы состоит из следующих этапов:

I. Исходные данные машины:

вес машины совместно с основанием Q , Н;

число оборотов в секунду f , Гц;

амплитуда возмущающей силы P_z , Н;

амплитуда силы, передающейся через виброизоляторы на несущую конструкцию P_k , Н;

допустимая величина амплитуды колебательного смещения виброизолируемой машины ξ_z .

II. Предварительный расчет виброизоляторов.

Приближенное определение амплитуды смещения ξ_{az} вынужденных колебаний машины. Предварительно предполагается, что машина

представляет собой систему, как бы подвешенную в пространстве на нитях, не имеющих жесткости; тогда амплитуда смещения (ξ_{az}) машины равна

$$\xi_{az} = \frac{P_z}{k_z - m\omega^2} \approx \left| \frac{P_z}{-m\omega^2} \right| = \frac{P_z}{m\omega^2}, \quad (5.18)$$

где k_z — упругость виброизоляторов в вертикальном направлении; m — масса машины; ω — круговая частота возмущающей силы.

Рассмотренное приближение с учетом лишь инерционной слагающей в определении ξ_{az} имеет в виду нулевую упругость k_z виброизоляторов.

Если полученная величина амплитуды смещения по вертикальной оси больше заданной, т. е. $\xi_z > [\xi_z]$, то следует увеличить вес машины, установив ее на металлическое или железобетонное основание. Необходимый в этом случае вес колебательной системы определяют по формуле

$$Q = \frac{P_{az}g}{[\xi_{az}]\omega_0^2},$$

где g — ускорение силы тяжести.

Увеличение веса машины за счет присоединения дополнительной плиты к основанию приведет к увеличению инерционного сопротивления системы, уменьшит амплитуду ее колебания при той же вынуждающей частоте. Одновременно с этим тяжелая плита, жестко связанная с машиной, приблизит геометрический центр тяжести системы к плоскости несущей конструкции, что, создавая более устойчивое равновесие, также будет способствовать уменьшению амплитуд вынужденных колебаний. Однако чрезмерное увеличение веса механизма повлечет изменение жесткости прокладок, что, нарушая их оптимальные упругие свойства, может привести к преждевременному их разрушению. Поэтому при увеличении веса машины необходимо следить за тем, чтобы напряжение в прокладках не превышало допустимого.

Определение коэффициента передачи и собственной частоты колебаний машины f_z и упругости виброизоляторов k_z . Коэффициентом передачи называется отношение силы P_k , передающейся через виброизоляторы на несущую конструкцию, к силе P_z , возникающей при работе виброизолированной машины, т. е. $\mu = P_k/P_z$.

Коэффициент μ связан с частотой собственных колебаний f_{0z} виброизолированной машины и частотой возмущающей силы f_b соотношением

$$\mu = \frac{1}{(f_b^2/f_{0z}^2) - 1} = \frac{1}{\psi_z^2 - 1},$$

где $\psi_z = f_b/f_{0z}$.

Если известна допускаемая максимальная величина возбуждающей силы P_z , то коэффициент отношения частот ψ_z должен быть больше, чем $\psi_{z \min}$, т. е. $\psi_z \geq \psi_{z \min}$.

Величина $\psi_{z \min}$ находится из выражения

$$\psi_{z \min} = \sqrt{\frac{1}{\mu} + 1} = \sqrt{\frac{P_z + [P_k]}{[P_k]}} = \sqrt{\frac{P_z}{[P_k]} + 1}.$$

Для машин с вертикальной периодической силой, приложенной к центру тяжести, обычно рекомендуют значение $\psi_z \geq 3$, т. е. $\mu \leq 1/8$. Отсюда, задавшись величиной ψ_z , обеспечивающей малое значение коэффициента μ , определяется частота f_{0z} собственных колебаний машины, установленной на амортизаторах:

$$f_{0z} = f_b/\psi_z, \quad (5.19)$$

а также упругость амортизаторов

$$k_z = (2\pi f_{0z})^2 m,$$

где m — масса механизма, подлежащего виброизоляции (включая массу основания).

Под влиянием веса машины, установленной на основание с большой массой, амортизаторы получают статическую осадку $X_{ст}$. Эта осадка связана с собственной частотой свободных колебаний системы следующей зависимостью: $X_{ст} = 25/f_{0z}^2$ [см]. При этом

$$f_{0z} = \frac{5}{\sqrt{X_{ст}}} = 5\sqrt{\frac{GS}{hQ}}, \quad (5.20)$$

где G — модуль Юнга материала амортизатора, Н/см²; S — площадь прокладки, см²; h — расчетная высота амортизатора, см.

Формула (5.20) является основной при расчете упругих амортизаторов. Величина $X_{ст}$ характеризует жесткость амортизатора, т. е. изменение его высоты под влиянием нагрузки:

$$X_{ст} = \frac{h\sigma}{G} = \frac{Q}{k_z} \text{ [см]}, \quad (5.21)$$

где $\sigma = Q/S$ — напряжение в амортизаторе, Н/см².

Используя формулу (5.21) и зная допускаемые напряжения на упругие прокладки и модуль Юнга материала, легко определить собственную частоту системы.

Пример 5.1. Машина устанавливается на амортизаторы из резины. Допускаемое напряжение для резины 30 Н/см^2 , динамический модуль Юнга 500 Н/см^2 .

Определить собственную частоту системы при высоте прокладок 5 см .

Решение. Подставляя имеющиеся данные в формулу (5.21), получим

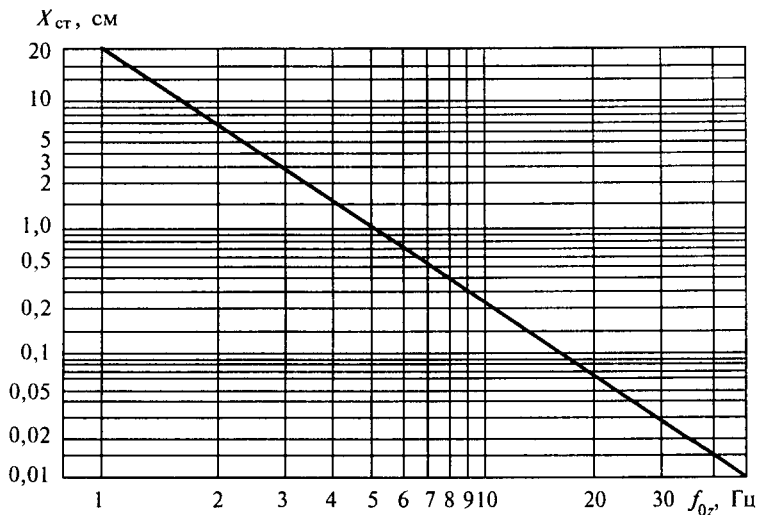
$$X_{\text{ст}} = \frac{5 \cdot 30}{500} = 0,3 \text{ см}.$$

Отсюда собственная частота системы, рассчитанная по формуле (5.20), будет $f_{0z} = 5/\sqrt{0,3} \approx 9 \text{ Гц}$.

Статическая осадка является основным расчетным параметром. На рис. 5.14 показана зависимость собственной частоты вертикальных колебаний машины от статической осадки $X_{\text{ст}}$.

Если материал виброизоляторов имеет динамический модуль упругости $G_{\text{дин}}$, отличный от статического $G_{\text{ст}}$, то для определения истинного значения f_{0z} выражение (5.20) необходимо умножить на $(G_{\text{дин}}/G_{\text{ст}})^{1/2}$, т. е.

$$f_{0z} = 5 \sqrt{\frac{G_{\text{дин}}}{X_{\text{ст}} G_{\text{ст}}}}.$$



Р и с. 5.14. Зависимость собственной частоты колебательной системы от статической осадки

Динамические модули упругости не являются постоянными значениями. Они зависят от частоты и нагрузки. Обычно с увеличением нагрузки увеличивается значение динамического модуля упругости, с изменением частоты значения динамического модуля упругости меняются незначительно, повышаясь в сторону высоких частот.

В табл. 5.3 сведены значения модулей Юнга различных прокладочных материалов.

Таблица 5.3. Динамические характеристики прокладочных материалов

Материал	Тип	Твердость по Шору	Плотность, г/см ³	$G_{дин}/f$, Н/см ² /Гц	$G_{ст}$, Н/см ²	Коэффициент потерь η
Морозостойкая резина	—	30	0,95	195/123	114	0,091
Натуральный каучук	3311	30	0,98	283/200	235	0,06
То же	10574	90	1,14	337/192	196	0,161
»	44-1	32	1,23	346/220	235	0,077
»	2959	45	1,16	662/268	274	0,15
»	137	50	1,32	610/285	326	0,085
»	10542	55	1,38	810/273	522	0,074
Полихлоропреновый каучук	604-1	60	1,46	4420/723	895	0,45
То же	—	65	1,55	3560/679	840	0,269
»	604-1	70	1,52	4040/583	1260	0,322

Примечание. В практике строительства допустимые нагрузки для резины, имеющей твердость по Шору 50...70, являются 30...40 Н/см²; для твердости по Шору 30...50 допустимые нагрузки равны 15...20 Н/см².

Для того чтобы можно было применять материал в качестве виброизолирующего, необходимо знать напряжения, которые возникнут в нем в процессе измерений динамических модулей упругости. В табл. 5.4 представлены измеренные значения $G_{дин}$ различных материалов, пригодных для применения в качестве виброизолирующих упругих прокладок под вибрирующее производственное оборудование.

Таблица 5.4. Динамические характеристики виброизолирующих материалов

Материал	Плотность в сжатом состоянии, г/см ³	Нагрузка, Н/с	Скорость звука, мм/с	Динамичес- кий модуль упругости материала, Н/см ²	Коеф- фициент потерь	Частота, при которой производятся измерения, Гц	$G_{дин}/G_{ст}$
Губчатая резина	0,72	0,2	59,8	257	0,15	176	2,2
То же	0,53	0,2	35,0	65	—	—	—
»	0,53	1,0	35,5	67	—	—	—
»	0,53	4,0	38,8	80	—	—	—
»	0,42	До 0,2	27,6	32	0,13	130	—
Губчатый каучук	0,11	—	13,5	2	0,08	85	—
То же	0,11	0,5	16,5	3	0,04	92	—
Пенопласт ПХВ-Э	0,17	2,0	58,0	57,5	0,85	172	4
То же	0,17	5,0	59,5	60	—	—	—
»	0,17	10,0	63,0	67,5	—	—	—
»	0,17	1,5	66,0	74	—	—	—

Поролон (пенополиуретан)	0,04	0,05	89,5	32	0,22	138	—
То же	0,04	0,1...0,25	117,0	55	—	—	—
Войлок волосной	0,4	0,3	102,5	420	0,23	115	2,7
То же	0,3	0,2	95,0	270	0,12	400	—
»	0,25	1,0	98,0	240	0,18	410	—
Пробка средней твердости	0,18	3,0	378,0	2570	0,11	315	—
Стекловолокнистые плиты на фенольной связке	0,06	0,2	34,0	7	0,1	—	2,3
То же	0,09	0,2	35,8	11,5	—	—	—
Стекловолокнистые плиты на формальдегидной смоле	0,09	0,2	38,0	13	0,05	—	—
Минераловатная плита на синтетической вяжущей массе	0,15	0,2	31,6	15	0,04	—	3,2
Древесноволокнистые плиты толщиной 1,25 см	0,2	0,3	90	16,2	0,1	200...300	2,1
Металл, сталь Ст.3	7,8	—	6000	2,107	0,01...0,001	—	1

Определение затухания колебаний в виброизоляторах. Так как собственная частота колебаний системы устанавливается ниже возбуждающей, то при переходе через резонансную частоту f_{0z} во время пуска и остановки машины амплитуда вынужденных колебаний ξ_z зависит от затухания энергии в амортизаторах и от скорости нарастания и убывания частоты возмущающей силы. Вследствие того, что при остановке машины угловая скорость вращения убывает со временем, можно определить, на каком участке звукового диапазона располагается собственная частота колебаний изолируемого агрегата.

Если собственная частота колебаний расположена в низкочастотной области, продолжительность времени резонансного совпадения возбуждающей и собственной частот будет больше, чем в том случае, когда собственная частота колебаний системы относительно высока. Однако при остановке машины энергия возбуждающей силы невелика, особенно в области низких частот; кроме того, необходимо предусматривать и увеличивать диссипативный параметр системы, т. е. внутреннее затухание.

Затухание колебаний в виброизоляторах обусловлено наличием необратимых потерь колебательной энергии, которые характеризуются коэффициентом внутренних потерь η :

$$\eta = \frac{\omega r}{k} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{d}{\pi},$$

где d — логарифмический декремент колебания.

Логарифмическим декрементом колебания называется натуральный логарифм отношения амплитуд колебаний, отвечающих началу и концу $(i + 1)$ -го цикла:

$$d = \ln \frac{\xi_i}{\xi_{i+1}}.$$

Логарифмический декремент колебания является мерой скорости затухания колебательного процесса, происходящей за счет внутренних необратимых потерь энергии. Чем больше декремент, тем скорее колеблющаяся масса приходит в состояние равновесия. При пуске резонансные явления не успевают проявиться. Следовательно, для максимального смещения $\xi_{z \max}$ будем иметь зависимость

$$\xi_{z \max} \leq \frac{P_z}{\eta k_z} = \frac{X_{\text{ст}}}{\eta}.$$

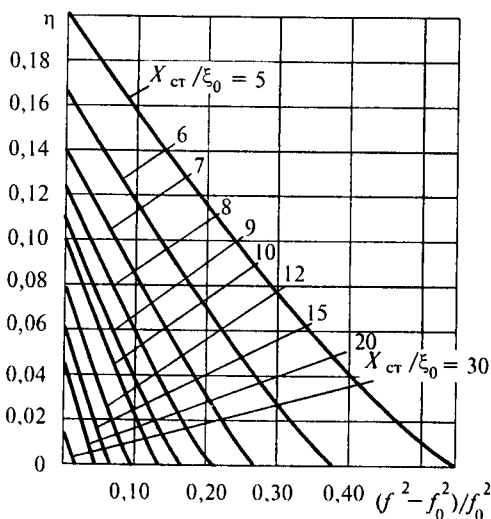


Рис. 5.15. Зависимость η от $(f^2 - f_0^2)/f_0^2$

С целью уменьшения амплитуд смещения в переходных режимах работы машины увеличивают затухание колебаний в виброизоляторах. На рис. 5.15 приведена номограмма, которая позволяет определить требуемое затухание в упругих прокладках под машиной. Кроме того, уменьшение амплитуд смещения при переходе через резонанс машины может быть достигнуто искусственным торможением вращающихся частей машины; уменьшением жесткости виброизолятора и, соответственно, уменьшением частоты собственных колебаний системы.

Определение возмущающих сил, передающихся через виброизоляторы на несущую конструкцию. Суммарная сила P_k , передающаяся через все амортизаторы, определяется по формуле $P_k = \xi_k k_z$, где k_z — общая жесткость всех амортизаторов в вертикальном направлении.

Зная количество амортизаторов, на которых установлена машина, и полагая, что все они имеют одинаковый параметр жесткости, можно определить силу, действующую на один амортизатор:

$$P_{k1} = \frac{P_k}{n} = \xi_k \frac{k_z}{n} = \xi_k k_{z1},$$

где k_{z1} — жесткость одного амортизатора в вертикальном направлении.

Выбор и расчет виброизоляторов. Количество виброизоляторов находят исходя из конструктивных особенностей машины и характе-

ристик типовых виброизоляторов. Расчет пружинных и резиновых амортизаторов приводится ниже.

Уточнение величины амплитуды смещения вынужденных колебаний машины. В связи с тем, что известна жесткость единичного амортизатора, необходимо найти значение колебательного смещения виброизолируемой машины, используя выражения (5.18), и сравнить полученную величину с допускаемым смещением $[\xi_z]$.

Расстановка виброизоляторов. Требования к расстановке виброизоляторов для машин заключаются в том, чтобы центр жесткости виброизоляторов находился на одной вертикали с центром жесткости массы, которую представляет собой машина, установленная на специальное основание.

5.4.2. Расчет амортизаторов

Наибольшее распространение в практике виброизоляции получили пружинные и резиновые амортизаторы.

Пружинные амортизаторы. В качестве пружинных амортизаторов чаще всего применяют стальные витые пружины, изготавливаемые из прутка круглого сечения. Для расчета пружины, предназначенной для виброизоляции, необходимы следующие исходные данные:

статическая нагрузка $P_{ст1}$, приходящаяся на один амортизатор, Н;

амплитуда колебательного смещения верхнего торца пружины при рабочем режиме машины ξ_{z1} , см;

упругость пружины в вертикальном направлении k_{z1} , Н/см;

допускаемое напряжение на кручение материала пружины $[\tau]$, Н/см²; для пружинных сталей средние значения $[\tau] = 40\,000$ Н/см²;

модуль упругости на сдвиг G , Н/см²; для большинства пружинных сталей $G \approx 8 \cdot 10^6$ Н/см².

Расчет амортизаторов этого типа рекомендуется проводить в такой последовательности:

1. Определяется расчетная нагрузка P_1 на одну пружину:

$$P_1 = P_{ст1} + 1,5P_{дин},$$

где $P_{ст1}$ — статическая нагрузка, приходящаяся на одну пружину; $P_{ст1} = P/n$, где P — вес машины, Н; n — число пружин; $P_{дин}$ — динамическая нагрузка, приходящаяся на одну пружину, Н ($P_{дин1} = \xi_z k_{z1}$). Множитель 1,5, на который умножается $P_{дин}$, обеспечивает требуе-

мый запас прочности пружины, учитывающей усталостные явления в стали, возникающие под влиянием динамических нагрузок.

2. Определяется диаметр d стального прутка:

$$d = 1,6 \sqrt{\frac{k P_1 C}{[\tau]}},$$

где k — коэффициент, учитывающий добавочное напряжение среза, возникающее в точках сечения прутка, расположенных ближе всего к оси пружины; C — индекс пружины ($C = D/d$, где D — средний диаметр пружины).

3. Определяется число рабочих витков пружины:

$$i_1 = \frac{Gd}{8k_{z1}C^3}.$$

4. Определяется общее количество витков пружины: $i = i_1 + i_2$, где i_2 — число нерабочих витков пружины. При $i_1 > 7$ $i_2 = 2,5$; при $i_1 < 7$ $i_2 = 1,5$.

5. Определяется высота ненагруженной пружины: $H_0 \leq 2D$.

При использовании готовой пружины, выпускаемой промышленностью, проверочный расчет выбранной пружины осуществляется следующим образом:

определяется максимально допустимая статическая нагрузка

$$[P_{ст}] = \frac{\pi d^3 [\tau]}{8kD} - 1,5 P_{дин};$$

определяется жесткость пружины в вертикальном направлении

$$k_{z1} = \frac{Gd}{8C^3 i};$$

находится число пружин из условия

$$\frac{Q}{[P_{ст}]} \leq n \leq \frac{k_z}{k_{z1}},$$

где Q — вес машины, Н; k_z — жесткость всех амортизаторов.

Пригодность готовой пружины можно проверить экспериментально, что обеспечит более точные результаты. Тогда, используя формулу (5.19) и предполагая, что известна требуемая собственная частота виброизолируемой системы f_{0z} , нагружают готовую пружину, измеряя при этом статическую осадку $X_{ст}$. Затем по формуле

(5.20) определяют, пригодна ли пружина для обеспечения системе заданной частоты f_{0z} :

$$f_{0z}^2 X_{\text{ст}} = 25 \quad \text{или} \quad X_{\text{ст}} = 25 / f_{0z}^2.$$

При соблюдении этого равенства статическая осадка, полученная под нагрузкой $P_{\text{ст}}$, считается пригодной и определяется количеством пружин, требующихся для амортизации механизма: $n \geq Q/P_{\text{ст}}$.

Установка машин на пружинные амортизаторы более эффективна, чем на резиновые, так как обеспечивает более низкие собственные частоты колебаний вибрирующего механизма.

Пример 5.2. Требуется рассчитать пружинную виброизоляцию для рабочего места оператора дозирочного отделения бетоносмесительной установки (БСУ).

При работе дозаторов БСУ возбуждаются недопустимо сильные колебания железобетонного перекрытия, на котором расположено рабочее место оператора дозаторами. Исходные данные: основная частота колебания перекрытия $f = 50$ Гц; амплитуда колебания перекрытия $a = 0,28$ мм.

Допускаемая амплитуда виброперемещения на рабочих местах, расположенных на строительных конструкциях, составляет: при 16 Гц — 0,0282 мм; при 31,5 Гц — 0,0141 мм; при 63 Гц — 0,0072 мм (ГОСТ 12.1.012—90).

Решение. Для данного случая принимаем за допустимую амплитуду $[a] = 0,009$ мм. Такие колебания человек воспринимает как слабоощутимые.

Определяем коэффициент передачи:

$$\mu = [a]/a = 0,009/0,28 = 1/31.$$

Определяем частоту собственных вертикальных колебаний виброизолированной плиты, на которой установлены пульт и рабочее место оператора:

$$f_0 = \frac{f}{\sqrt{1/\mu + 1}} = \frac{50}{\sqrt{31 + 1}} = 7,62 \text{ Гц}.$$

Пульт управления весом 500 Н устанавливаем на железобетонную плиту размером $1,3 \times 0,8 \times 0,1$ м. Вес плиты $Q_{\text{пл}} = V_{\text{пл}} \rho g = 1,3 \cdot 0,8 \cdot 0,1 \cdot 2200 \cdot 9,8 \approx 2300$ Н.

Вес плиты с установленным оборудованием, учитывая вес оператора (800 Н): $Q = 2300 + 800 + 500 = 3600$ Н.

Суммарная жесткость всех пружин:

$$K'_{\Sigma} = \frac{Q f_0^2}{25} = \frac{3600 \cdot 7,62^2}{25} = 8361 \text{ Н/см}.$$

Статическая осадка каждой из восьми пружин:

$$\lambda_{\text{ст}} = Q/K'_{\Sigma} = 3600/8361 = 0,43 \leq 1 \text{ см}.$$

Конструктивно располагаем по две пружины под каждый угол плиты (рис. 5.16), всего используем восемь пружин.

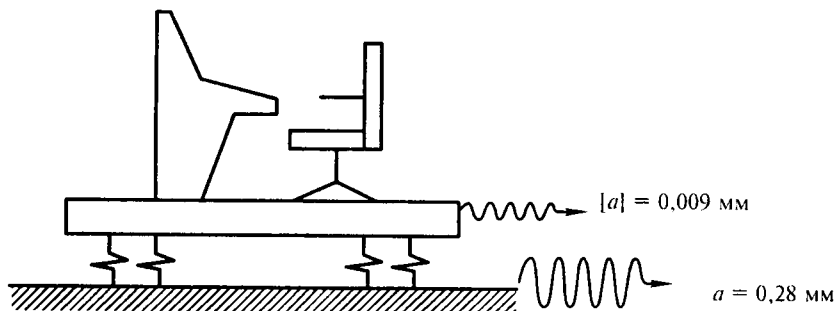


Рис. 5.16. Пружинная вибрация рабочего места оператора дозаторного отделения БСУ

Жесткость одной пружины

$$K' = K'_\Sigma / n = 8361/8 = 1045 \text{ Н/см}.$$

Осадка двух пружин ($n' = 2$) при нахождении над ними оператора составит:

$$\lambda' = \frac{Q_{\text{чел}}}{n' K'} = \frac{800}{2 \cdot 1045} = 0,38 \text{ см} < 1 \text{ см}.$$

Для обеспечения устойчивости в горизонтальной плоскости плиты на пружинных виброизоляторах необходимо, чтобы статическая осадка каждой из пружин не превышала 1 см. Здесь это условие выполнено.

Определяем расчетную нагрузку на одну пружину при $n' = 2$:

$$Q = \frac{Q - Q_{\text{чел}}}{n} + 1,5 \frac{Q_{\text{чел}}}{n'} = \frac{3600 - 800}{8} + 1,5 \frac{800}{2} = 950 \text{ Н}.$$

Производим расчет пружины.

а) Определяем диаметр прутка

$$d = 1,6 \sqrt{\frac{k Q C}{[\tau]}} = 1,6 \sqrt{\frac{1,3 \cdot 950 \cdot 7}{45\,000}} = 0,67 \text{ см} \approx 0,7 \text{ см},$$

где k — коэффициент, определяемый по графику на рис. 5.17; $C = D/d$ — рекомендуется принимать 4...10, принимаем $C = D/d = 7$ (D — диаметр пружины, см); P — расчетная нагрузка, принимаемая на одну пружину, Н; τ — допускаемое напряжение на срез для материала пружины, принимаем $[\tau] = 45\,000 \text{ Н/см}^2$.

Число «мертвых» витков i_2 принимают: $i_2 = 1,5$ витка на оба торца пружины при $i \leq 7$; $i_2 = 2,5$ витка при $i > 7$.

б) Определяем число рабочих витков пружины:

$$i_1 = \frac{G d}{8 K' C^3} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 0,7}{8 \cdot 1045 \cdot 7^3} = 1,9 = 2 \text{ витка},$$

где G — модуль упругости стали на сдвиг для материала пружины, для стали $G = 8 \cdot 10^6 \text{ Н/см}^2$.

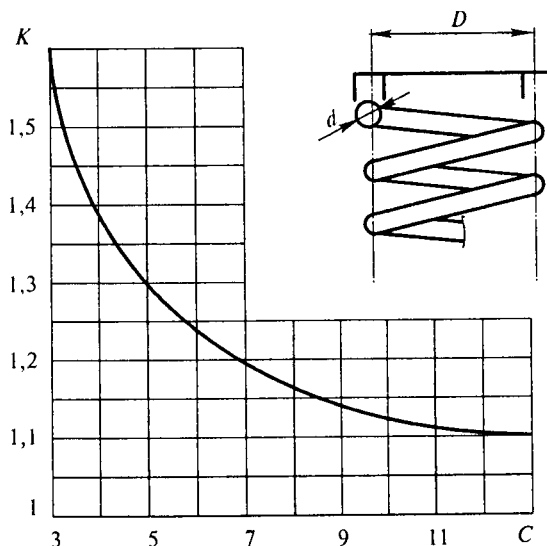


Рис. 5.17. График для определения коэффициента k

При расчете пружин, работающих на сжатие, $H/D \leq 1,5$ для обеспечения устойчивости пружины.

в) Полное число витков $i = i_1 + i_2 = 2 + 1,5 = 3,5$ витка.

г) Диаметр ненагруженной пружины (при шаге $h = 0,25D$)

$$D = Cd = 7 \cdot 0,7 = 4,9 \text{ см} = 5 \text{ см.}$$

д) Высота ненагруженной пружины

$$H_0 = i_1 h + (i_2 - 0,5)d = 2 \cdot 2,5 + (1,5 - 0,5)0,7 = 5,7 \text{ см,}$$

где h — шаг пружины, равный $0,25 \dots 0,5D$, т. е. выполнено условие устойчивости пружины, так как $H/D = 5,7/5 = 1,14 < 1,5$.

е) Проверяем, выполнено ли условие обеспечения допустимого напряжения на сдвиг в материале пружины:

$$\tau = \frac{2,56kQC}{d^2} = \frac{2,56 \cdot 1,3 \cdot 950 \cdot 7}{0,7^2} = 41\,691 \text{ Н/см}^2.$$

Допускаемое $[\tau] \leq 45\,000 \text{ Н/см}^2$.

Рассчитанная пружинная виброизоляция рабочего места оператора обеспечивает снижение амплитуды виброперемещения в 31 раз с 0,28 мм до нормативной величины — 0,009 мм.

Резиновые амортизаторы. Расчет амортизаторов этого типа рекомендуется проводить в такой последовательности.

1. Выбирается резина с динамическим модулем упругости $G_{\text{дин}}$, Н/см² (см. табл. 5.3 и 5.4).

2. Исходя из конструктивных особенностей машины задаются числом амортизаторов n .

3. Находят поперечный размер A виброизолятора квадратного сечения:

$$A = \sqrt{\frac{Q}{n\sigma}},$$

где Q — вес машины, Н; σ — расчетное напряжение в резине (эту величину рекомендуется принимать равной 20...40 Н/см², а для твердых сортов резины — до 50 Н/см²).

4. Полная высота резинового амортизатора определяется из соотношения $H \geq A/4$. Применять широкие амортизаторы с малой высотой H нежелательно, так как они имеют чрезмерную жесткость, поэтому подстилаемые под вибрирующие механизмы резиновые ковры практически часто не приносят никакой пользы.

Если по конструктивным соображениям приходится использовать широкие амортизаторы, их необходимо делать перфорированными или рифлеными. В этом случае пустоты не будут препятствовать поперечному расширению резины при вертикальном сжатии.

5. Определяется рабочая высота амортизатора:

$$H_1 = H - \frac{A}{8}.$$

6. Рассчитывается жесткость одного резинового амортизатора в вертикальном направлении:

$$k_{z1} = \frac{G_{\text{дин}} S_1}{H_1},$$

где $G_{\text{дин}}$ — динамический модуль упругости при сжатии, Н/см²; S_1 — площадь поперечного сечения одного виброизолятора, м².

7. Определяется жесткость одного резинового виброизолятора в горизонтальном направлении:

$$k_x = k_y = \frac{S_1 E_{\text{дин}}}{H_1},$$

где $E_{\text{дин}}$ — динамический модуль сдвига, Н/см².

8. Определяется частота собственных вертикальных колебаний виброизолируемой машины:

$$f_{0z} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\beta^2 g E_{\text{дин}}^2 n^2}{(8 - \beta^2) Q \sigma}}, \quad (5.22)$$

где $\beta = A/H$ — отношение ширины амортизатора к полной его высоте.

Полученную из выражения (5.22) собственную частоту сравниваем с требуемым ее значением, рассчитанным по формуле (5.19). Если эти значения не сходятся, то в расчет резиновых амортизаторов вносят соответствующие изменения:

выбирают тип резины с меньшим динамическим модулем упругости;

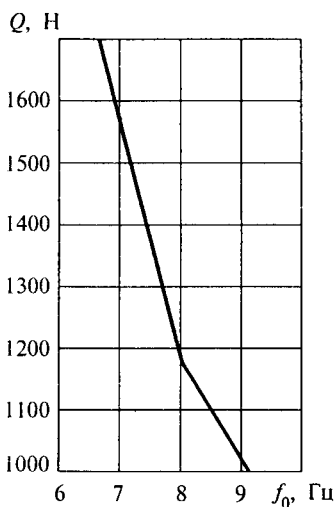
в допустимых пределах увеличивают статическое напряжение в резине;

увеличивают вес машины путем присоединения к ней железобетонного основания;

переходят на другие виды амортизаторов, например стальные или комбинированные.

Данная методика применима не только к резиновым, но и к другим упругим материалам, у которых, так же как и у резины, коэффициент Пуассона близок к 0,5. Для материалов, у которых $\mu < 0,5$, в расчете необходимо принимать вместо рабочей высоты H_1 полную высоту амортизатора H .

Недостаток резиновых амортизаторов — их недолговечность. Резиновые виброизоляторы со временем становятся жестче и через 5...7 лет их необходимо заменять. Кроме того, с их помощью нельзя получить очень низкие собственные частоты колебаний системы, которые необходимы для тихоходных агрегатов, из-за неизбежной в этом случае перегрузки прокладок, значительно сокращающей срок их службы.



Из резины жесткостью по Шору до 70...80 можно делать прокладки с переменной по их высоте жесткостью. Жесткость прокладок меняется по высоте так же, как и их сечение. Такого рода прокладки при нагрузке обеспечивают малое изменение в значениях собственной частоты колебательной системы, подпрессоренной этими прокладками.

На рис. 5.18 представлены результаты испытания жестких прокладок при изменении нагрузки на четыре усеченные

Р и с. 5.18. Изменение собственной частоты системы, установленной на пирамидальных прокладках из резины, в зависимости от нагрузки

пирамидальные прокладки из резины твердостью по Шору 50 и размерами: нижнее основание 65×65 , верхнее — 40×40 мм при высоте 62 мм в ненагруженном состоянии.

Наиболее выраженными будут фундаментальные собственные частоты по трем координатам при параллелепипедаидальной форме упругих прокладок. Так как рассматривалась система с одной степенью свободы, совершающая колебания по оси z , то и собственную частоту колебаний прокладки (в Гц) будем определять только по ее высоте:

$$f_{0np} = \frac{nc}{2h}, \quad (5.23)$$

где n — целое число, соответствующее номеру гармоники; c — скорость распространения звука в прокладке, м/с (см. табл. 5.4); h — высота прокладки, м.

На каждой из собственных частот, полученных в результате расчета по формуле (5.23), будет наблюдаться значительное понижение виброизоляции. Глубина провалов частотной характеристики обусловлена величиной внутренних потерь в материале.

Упругие прокладки работают аналогично акустическому фильтру. На резонансной частоте будут наблюдаться понижения виброизолирующей способности амортизаторов, ограничиваемые величиной диссипативного параметра системы. Чем выше частота по сравнению с $f_{гр}$, тем эффективнее влияние прокладок. Граничная частота находится из соотношения $f_{гр} = 1,41f_{0z}$.

На частотах, выше граничной, эффективность прокладок или снижение уровня ΔL действующей периодически возмущающей силы могут быть определены по формуле

$$\Delta L = 40 \lg \frac{f_n}{f_{гр}},$$

где f_n — текущая частота, более высокая, чем $f_{гр}$.

Для удобства пользования расчетные формулы, по которым определяют требующиеся параметры при проектировании упругих прокладок, сведены в табл. 5.5.

Наличие активно действующих упругих прокладок под машиной не может оказать влияния на снижение шума самого механизма, так как и при наличии прокладок и без них отдельные узлы и детали излучают в воздух помещения одну и ту же энергию. Излучающие поверхности в обоих случаях остаются без изменений. Нали-

Таблица 5.5. Формулы для расчета параметров, необходимых при проектировании упругих прокладок

Назначение формулы	При установке машин на перекрытиях здания	При установке машин на грунт
Для определения собственной частоты	$f_{0z} = \begin{cases} 5 \sqrt{\frac{1 + Q_1/Q_2}{X_{ст}}} \\ 5 \sqrt{G/\sigma H_1 (1 + Q_1/Q_2)} \end{cases}$	$f_{0z} = \begin{cases} \frac{5}{\sqrt{X_{ст}}}; \\ 5 \sqrt{\frac{G}{\sigma H_1}} \end{cases}$
Для определения снижения уровня вибрации	$\Delta L = -20 \lg \left(\frac{0,04 G S Q_2}{H_1} f_{0z}^2 \right) + 20 \lg \left[(0,04 Q_1 f_{0z}^2 - k) \times (0,04 Q_2^2 f_z^2 - k^2) - k^2 \right]$	$\Delta L = 40 \lg \frac{f}{f_{0z}}; \quad \Delta L = 20 \lg \left[\frac{1}{(f/f_{0z})^2 - 1} \right]$
Для определения граничной частоты	$f_{гр} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{38,6 f_{0z}^2 + \frac{981 G S}{H_1 Q_2}}$	$f_{гр} = 1,41 f_{0z}$
Для определения толщины прокладок	$H_1 = \frac{25G}{\sigma f_{0z}^2} \left(1 + \frac{Q_1}{Q_2} \right)$	$H_1 = \frac{25G}{\sigma f_{0z}^2}$

Принятые обозначения: f_{0z} — собственная частота системы; Q_1 — вес механизма; Q_2 — вес перекрытия; k — коэффициент жесткости, $k = \frac{ES}{H_1}$; G — модуль Юнга (динамический); H_1 — рабочая высота прокладок; S — площадь прокладок; σ — допускаемое напряжение в прокладках.

чие упругих прокладок создает препятствие для передачи энергии ограждению помещения, где располагается машина (особенно это ощутимо в том случае, когда механизмы находятся на междуэтажных перекрытиях).

Ограждающие конструкции, придя в резонансные колебания, будут излучать звуковую энергию как в то помещение, где находится машина, так и в соседнее.

Наличие упругих прокладок, принося ощутимую пользу помещениям, соседним с шумным, практически не уменьшает шума в помещении, где находится источник. Приведем два примера.

Пример 5.3. Машина весом $Q = 10\,000$ Н с ротором, который имеет $N = 1500$ об/мин, устанавливается на амортизирующие прокладки. Требуется определить их количество и толщину.

Решение.

1. Определяем частоту возбуждающей силы: $f = N/60 = 1500/60 = 25$ Гц.

2. Общую площадь резиновых прокладок S_{Σ} выбираем из учета их технических характеристик. В данном случае применяется резина со следующими данными: твердость по Шору — 60; модуль упругости $G = 500$ Н/см²; допускаемое рабочее напряжение $\sigma_{\text{доп}} = 30$ Н/см². Тогда

$$S_{\Sigma} = \frac{Q}{\sigma_{\text{доп}}} = \frac{10\,000}{30} = 333 \text{ см}^2.$$

3. Используем резиновые амортизаторы в виде куба размером $6 \times 6 \times 6$ см. Тогда опорная площадь одного амортизатора $S_1 = 6 \cdot 6 = 36$ см².

4. Количество прокладок под машиной $n = S_{\Sigma}/S_1 = 333/36 \approx 10$ шт.

5. Собственная частота колебаний системы (машины) на упругих прокладках

$$f_0 = 5 \sqrt{\frac{G}{n\sigma_{\text{доп}}}} = 5 \sqrt{\frac{500}{10 \cdot 30}} = 8 \text{ Гц}.$$

6. Граничная частота $f_{\text{гр}} = f_0 \sqrt{2} = 8 \cdot 1,41 = 11$ Гц.

7. Эффективность прокладок или снижение уровня вибраций (в дБ) на частоте вдвое больше граничной, т. е. равной 22 Гц:

$$\Delta L = 40 \lg \frac{f}{f_0} = 40 \lg \frac{22}{8} \approx 19 \text{ дБ}.$$

Величина снижения уровня вибрации на 19 дБ за счет установки машины на амортизаторы весьма значительна.

Пример 5.4. Установить ту же машину, что и в предыдущем примере, на пружинные амортизаторы. Допускаемая нагрузка на пружину $P_{\text{доп}} = 500$ Н, статическая осадка пружины $X_{\text{ст}} = 2$ см. Определить количество пружин и эффективность снижения уровня вибрации.

Решение.

1. Частота собственных колебаний системы в соответствии с выражением (5.20)

$$f_0 = \frac{5}{\sqrt{\chi_{\text{ст}}}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,6 \text{ Гц.}$$

2. Количество пружин, необходимых для обеспечения виброизоляции,

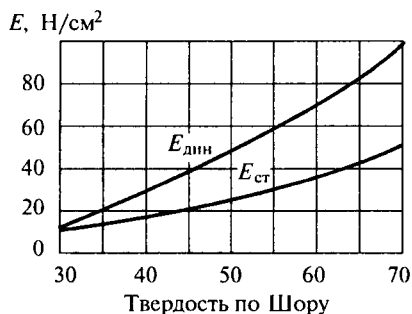
$$n = Q/P_{\text{доп}} = 10\,000/500 = 20 \text{ шт.}$$

3. Эффективность снижения уровня вибрации

$$\Delta L = 40 \lg \frac{f}{f_0} = 40 \lg \frac{22}{3,6} \approx 30 \text{ дБ.}$$

В прокладках могут возникнуть собственные колебания в том случае, когда их линейный размер равен половине длины волны, образующейся в прокладке. В пружине собственные колебания могут появиться тогда, когда в растянутом прутке уложится половина длины волны $\lambda = 2h$ [см. формулу (5.23)].

Для того чтобы колебательная энергия не могла проникнуть в конструкцию, на которой установлен плавающий фундамент, необходимо создать амортизирующий слой малой жесткости, обладающий высокой вязкостью. Для этой цели подходит резина мягких сортов ($\sigma = 80 \text{ Н/см}^2$) твердостью по Шору 60...65. Из нее выполнены прокладки, размещенные под подпятником. Зависимость статических и динамических модулей упругости от твердости по Шору приведена на рис. 5.19. Используя графики, приведенные на рис. 5.19, можно подобрать необходимый для изоляции вибраций упругий слой.



Р и с. 5.19. Зависимость модулей упругости резины от ее твердости по Шору

Пример 5.5. Рассчитать виброизоляцию рабочего места оператора виброплощадки с использованием резиновых виброизоляторов.

Виброскорость колебаний основания на рабочем месте оператора на частоте 50 Гц составляет 0,95 см/с при норме 0,2 см/с по ГОСТ 12.1.012—90 «Вибрационная безопасность» или СН 2.2.4/2.1.8.556—96.

Рабочее место оператора располагаем на железобетонной плите размером 1,2 × 1,2 × 0,1 м (рис. 5.20). Вес пульта управления и рабочего кресла равен 1100 Н, вес оператора — 800 Н.

Решение.

1. Определяем массу железобетонной плиты $m = V\rho$, где V — объем, м³; $\rho = 2200$ кг/м³ (плотность железобетона).

$$m = (1,2 \cdot 1,2 \cdot 0,1) \cdot 2200 \approx 317 \text{ кг.}$$

2. Для изготовления виброизоляторов используем резину на каучуковой основе № 3111 твердостью 30...40 условных единиц и с динамическим модулем упругости $G = 280$ Н/см².

3. Определяем массу всей виброизолированной системы:

$$m_c = m + m_{\text{чел}} + m_{\text{пункта}} = 317 + 80 + 110 = 507 \text{ кг.}$$

Вес вибрационной системы

$$Q = m_c g = 507 \cdot 9,8 = 4968 \text{ Н.}$$

4. Исходя из конструктивных особенностей виброизолированной железобетонной плиты задается число виброизоляторов: $n = 8$.

5. Находим поперечный размер A виброизолятора квадратного сечения:

$$A = \sqrt{\frac{Q}{n\sigma}} = \sqrt{\frac{4968}{8 \cdot 20}} = 5,51 \text{ см,}$$

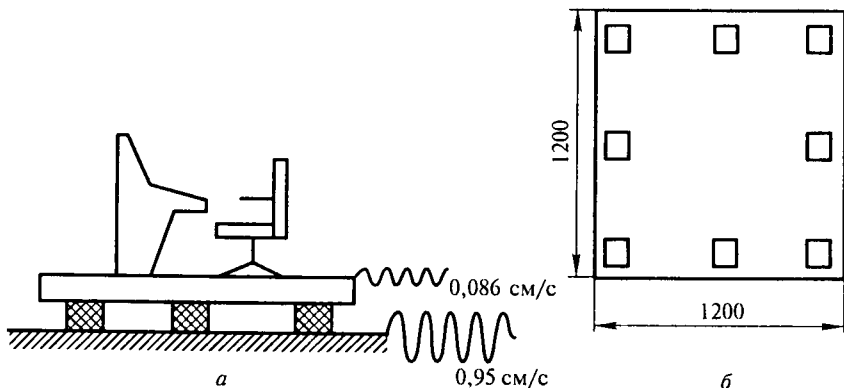


Рис. 5.20. Схемы виброизолированного рабочего места (а) и размещения резиновых виброизоляторов (б)

где $Q = 4968 \text{ Н}$ — вес виброизолированной системы; σ — допускаемое напряжение в материале резины: $20 \dots 40 \text{ Н/см}^2$ для мягких сортов, 50 Н/см^2 — для твердых сортов. Принимаем $\sigma = 20 \text{ Н/см}^2$.

Принимаем $A = 6,0 \text{ см}$.

6. Полная высота резинового виброизолятора

$$H \geq \frac{A}{2,5} = \frac{6}{2,5} = 2,4 \text{ см}.$$

Принимаем $H = 2,5 \text{ см}$.

7. Рассчитываем жесткость одного виброизолятора в вертикальном направлении:

$$K = \frac{SG_{\text{дин}}}{H} = \frac{36 \cdot 280}{2,5} = 4032 \text{ Н/см},$$

где $S = 6 \cdot 6 = 36 \text{ см}^2$ — площадь поперечного сечения виброизолятора.

8. Определяем частоту собственных вертикальных колебаний виброизолированной системы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\beta^2 g E_{\text{дин}}^2 n^2}{Q\sigma(8 - \beta^2)}},$$

где $\beta = A/H = 6/2,5 = 2,4$;

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{4 \cdot 2,4^2 \cdot 9,81 \cdot 280^2 \cdot 8^2}{4968 \cdot 20(8 - 2,4^2)}} = 14,1 \text{ Гц}.$$

9. Рассчитываем коэффициент передачи и оцениваем эффективность виброизоляции:

$$\mu = \frac{1}{(f/f_0)^2 - 1} = \frac{1}{(50/14,1)^2 - 1} \approx \frac{1}{11}.$$

Установили, что запроектированная вибросистема снижает динамическую силу, передающуюся от основания на виброизолированное рабочее место, в 11 раз. При этом виброскорость на рабочем месте уменьшается также приблизительно в 11 раз.

Виброскорость колебания рабочего места

$$v_{\text{рм}} = v/\mu = 0,95/11 = 0,086 \text{ см/с},$$

что значительно ниже установленной гигиенической нормы.

5.4.3. Расчет вибродемпфирования

При вибродемпфировании наблюдается слабое поглощение вибропоглощающими покрытиями продольных волн (волн сжатия), которые вызывают также и поперечные колебания. Продольные волны переносят особенно большое количество колебательной энер-

гии на высоких звуковых частотах. Борьба с этими колебаниями заключается в создании звукоизолирующих разрывов между отдельными частями конструкций установок, заполненных или воздухом, или материалом с низким значением волнового сопротивления. Используя известное из теории колебаний соотношение между колебательной скоростью $\dot{\xi}_{01}$, силой F и частотами ω_2 и ω_0 , можно записать

$$\dot{\xi}_{01} = \frac{F}{i[(\omega_2/\omega_0)^2 - 1] + \eta}. \quad (5.24)$$

Определим, как будет характеризоваться уровень снижения скоростей при нанесении на поверхность вибропоглощающего материала с коэффициентом η_2 . В случае виброзадемпфированной поверхности получим выражение, аналогичное (5.24), но вместо η будет η_2 , выражающее коэффициент потерь в комбинированном вибропоглощающем слое. Тогда снижение уровня колебательной скорости при нанесении вибропоглощающего слоя в условиях резонанса (т. е. когда $\omega_2 = \omega_0$) определится формулой

$$20 \lg \frac{\dot{\xi}_{01}}{\dot{\xi}_{02}} = 20 \lg \frac{F \eta_2}{\eta_1 F} = 20 \lg \frac{\eta_2}{\eta_1}. \quad (5.25)$$

При наличии мягких покрытий вибропоглощающий слой почти не вызывает сдвига нейтральной оси пластины при изгибных колебаниях. Поглощение энергии происходит в основном за счет деформации вибропоглощающего слоя. Так как модуль упругости мягкого покрытия мал, то длина упругой волны в покрытии также мала и уже на относительно низких звуковых частотах (порядка нескольких сотен герц) соизмерима с толщиной покрытия. Максимумы поглощения колебательной энергии будут наблюдаться на частотах, где по толщине вибропоглощающего слоя укладывается несколько полуволн, поэтому полоса частот вибропоглощения достаточно широка. Уровень уменьшения шума в случае мягких вибропоглощающих покрытий можно рассчитывать с помощью выражения (5.25).

Тип вибропоглощающего покрытия должен быть выбран на основании изучения спектра вибраций исследуемых машин, т. е. в зависимости от расположения в спектре максимальных амплитуд колебательной скорости. Наносить вибропоглощающие покрытия необходимо главным образом в местах максимальных амплитуд вибраций, что также определяется исследованием вибрационного поля скорости колеблющегося элемента установки.

Особенно эффективны вибропоглощающие покрытия в области высоких звуковых частот. Низкие и средние области диапазона подавляются вибропоглощающими покрытиями лишь с высокими значениями модулей упругости и коэффициентов потерь. Известно, что

$$20 \lg \frac{\dot{\xi}_{01}}{\dot{\xi}_{02}} = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} = \Delta L_p.$$

Следовательно, уменьшение уровня звукового давления ΔL_p в окружающей среде при нанесении на указанные поверхности вибропоглощающего слоя можно найти из выражения

$$\Delta L_p = 20 \lg \left(\frac{\dot{\xi}_{01}}{\dot{\xi}_{02}} \right) = 20 \lg \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \text{ дБ}, \quad (5.26)$$

где $\dot{\xi}_{01}$, η_1 — колебательная скорость и коэффициент потерь вибрирующей поверхности до нанесения вибропоглощающего слоя; $\dot{\xi}_{02}$, η_2 — то же, при наличии вибропоглощающего слоя.

Уравнение (5.26) выведено на основании того, что потери в системе пропорциональны колебательной скорости.

Уменьшение уровня резонансных колебаний металлической конструкции при облицовке ее вибропоглощающим слоем рекомендуется подсчитывать по формуле

$$\Delta L = 20 \lg \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{\eta_1} \right) \text{ дБ}. \quad (5.27)$$

Было показано, что при

$$\eta_2 = \eta_3 a \varphi(b), \quad (5.28)$$

$$a = G_n / G_m, \quad b = h_n / h_m,$$

где η_3 — коэффициент потерь в вибропоглощающем слое; G_n , G_m — модули упругости покрытия и металла конструкции; h_n , h_m — толщины покрытия и несущей конструкции.

Из выражения (5.28) видно, что коэффициент потерь η_2 пластины, покрытой вибропоглощающим слоем, пропорционален коэффициенту потерь η_3 этого слоя, умноженному на модуль упругости материала покрытия G_n .

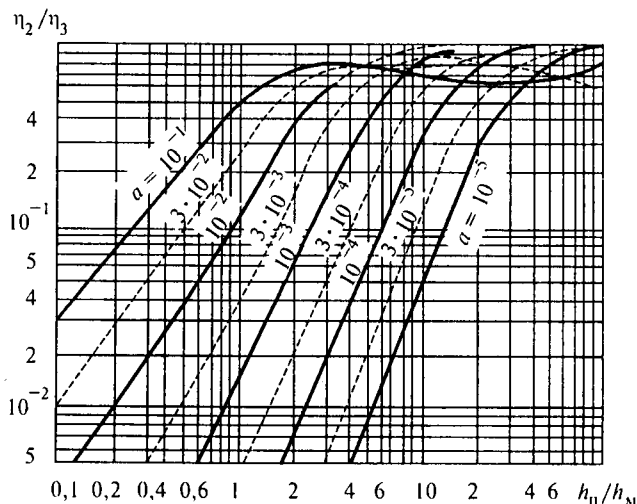


Рис. 5.21. Зависимость η_2/η_3 от толщины и модулей упругости материала

Зависимость отношения η_2/η_3 в функции аргумента b и параметра a приведена на рис. 5.21. Из рисунка видно, что при больших значениях a и b отношения η_2/η_3 стремятся к единице, т. е. $\eta_2 \rightarrow \eta_3$.

Наибольший прирост η при изменении b происходит до значений $b = 3 \dots 5$, поэтому увеличивать слой вибропоглощающего покрытия свыше этой толщины нецелесообразно. Практически толщину вибропоглощающего слоя берут не более 2...3 толщин демпфируемой пластины. В связи с этим для твердых покрытий используют выражение

$$\eta_2 \approx \eta_3 \frac{G_n}{G_m} \left(\frac{h_n}{h_m} \right)^2. \quad (5.29)$$

Отсюда следует, что коэффициент внутренних потерь вибропоглощающей конструкции увеличивается с ростом отношения модулей упругости покрытия и металла.

Для мягких покрытий отношение $G_n/G_m \approx 10^{-4}$. Оно мало, поэтому получается малым и η_2 . Значения коэффициентов потерь и модулей упругости некоторых вибропоглощающих материалов сведены в табл. 5.6.

**Таблица 5.6. Физико-технические характеристики
вибропоглощающих материалов**

Материал	$G, \text{Н/см}^2$	η_3	$\eta_3 \cdot G, \text{Н/см}^2$	Температурный диапазон, °С
Линолеум	$1,1 \cdot 10^5$	0,30	$3,3 \cdot 10^4$	От -10 до +30
Пластик	$3 \cdot 10^4$	0,40	$1,2 \cdot 10^4$	От -30 до +10
Пластикат 485	$4,5 \cdot 10^5$	0,18	$8,1 \cdot 10^4$	От +20 до +70
Мастика	2	0,3	0,6	—
Сталь	$2 \cdot 10^2$	0,01	0,2	—

Пример 5.6. Подсчитать снижение общего уровня шума за счет нанесения мастики на кожух вентилятора.

Решение. Отношение модулей упругости вибропоглощающего слоя G_n к модулю упругости металла кожуха G_m (см. табл. 5.6) равно

$$\frac{G_n}{G_m} = \frac{2}{2 \cdot 10^2} = 0,01.$$

Отношение толщины слоя мастики h_n к толщине стенки кожуха h_k (толщина стенки кожуха 1 мм, толщина слоя мастики 4 мм): $h_n/h_k = 4$.

Определим величину η_2 , используя выражение (5.29), считая, что коэффициент потерь η_3 мастики порядка 0,3 при $G = 2 \text{ Н/см}^2$: $\eta_2 = 0,3 \cdot 0,01 \cdot 16 = 0,048$.

Отсюда находим порядок снижения уровня шума в децибелах по формуле (5.27), считая, что $\eta_1 = 0,01$:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{0,01 + 0,048}{0,01} = 14 \text{ дБ}.$$

Данные, полученные в результате излучения шума кожухом вентилятора, обработанного вибропоглощающей мастикой, приведены ниже:

Частота, Гц	100	200	400	800	1000	1600	2000	2500	3200
Величина снижения шума, дБ	0	0	0	6	8	9	10	13	16

Таким образом, величина снижения уровней шума имеет место только в области высоких звуковых частот, так как довольно тонкий слой мастики не мог заметно сместить нейтральную ось вибрирующей поверхности.

Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕХНОСФЕРЫ

В процессе эволюции и жизнедеятельности человек испытывает влияние естественного электромагнитного фона, характеристики которого используются как источник информации, обеспечивающий непрерывное взаимодействие с изменяющимися условиями внешней среды.

Однако вследствие научно-технического прогресса электромагнитный фон Земли в настоящее время не только увеличился, но и претерпел качественные изменения. Появились электромагнитные излучения таких длин волн, которые имеют искусственное происхождение в результате техногенной деятельности (например, миллиметровый диапазон длин волн и др.). Миллиметровое излучение внеземного происхождения интенсивно поглощается атмосферой Земли, поэтому живые организмы не имеют адаптации к этим волнам.

В результате широкого использования в современном производстве технологий электромагнитных полей (ЭМП) и других физических полей появились источники техногенного происхождения, отличающиеся по своим характеристикам от традиционных источников, к которым живые организмы биосферы адаптировались в процессе длительной эволюции.

Электромагнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами. Электромагнитное поле в вакууме характеризуется векторами напряженности электрического поля $\vec{E}$ и индукции магнитного поля $\vec{B}$, которые определяют силы, действующие на неподвижные и движущиеся заряды. Размерность напряженности электрического поля $[E] = \text{В/м}$ (вольт на метр), и размерность индукции магнитного поля $[B] = \text{Тл}$ (тесла). Источниками электромагнитных полей являются заряды и токи, т. е. движущиеся заряды. Единица заряда называется кулоном, а единица тока — ампером (обозначение Кл и А соответственно).

Силы взаимодействия электрического поля с зарядами и токами определяются следующими формулами:

$$\vec{F}_3 = q\vec{E}; \quad \vec{F}_m = [\vec{j} \vec{B}], \quad (6.1)$$

где $\vec{F}_3$ — сила, действующая на заряд со стороны электрического поля, Н; $\vec{F}_m$ — сила, действующая на ток со стороны магнитного поля, Н; q — величина заряда, Кл; $\vec{j}$ — вектор плотности тока, указывающий направление тока и равный по абсолютной величине А/м².

Прямые скобки во второй формуле (6.1) обозначают произведение векторов $\vec{j}$ и $\vec{B}$ и образуют новый вектор, модуль которого равен произведению модулей векторов $\vec{j}$ и $\vec{B}$, умноженному на синус угла между ними.

Напряженность электрического поля определяется законом Кулона, а индукция магнитного поля — законом Био—Савара.

В электрическом и магнитном поле на материальную частицу, обладающую зарядом q , массой m и движущейся со скоростью $\vec{v}$, действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \vec{B}]. \quad (6.2)$$

Первое слагаемое соответствует силе со стороны электрического поля с напряженностью $\vec{E}$, а второе — магнитной силе в поле с индукцией $\vec{B}$.

Электрическая сила действует в направлении напряженности электрического поля, а магнитная сила перпендикулярна как скорости заряда, так и вектору индукции магнитного поля.

В последнее время проблема взаимодействия человека с ЭМП становится весьма актуальной в связи с интенсивным развитием радиосвязи и радиолокации, расширением сферы применения электромагнитной энергии для выполнения технологических операций, массовым распространением бытовых электрических и радиоэлектронных устройств.

К основным источникам ЭМП антропогенного происхождения относятся телевизионные и радиолокационные станции, мощные радиотехнические объекты, промышленное технологическое оборудование, высоковольтные линии электропередач промышленной частоты, термические цеха, плазменные, лазерные и рентгеновские установки, атомные и ядерные реакторы и т. п.

Спектральная интенсивность некоторых техногенных источников ЭМП может существенным образом отличаться от эволюцион-

но сложившегося естественного электромагнитного фона, к которому привык человек и другие живые организмы биосферы.

Одним из поражающих факторов ядерного взрыва является электромагнитный импульс (ЭМИ), который представляет серьезную опасность для вывода из строя электронной и электротехнической аппаратуры, ЭВМ, систем электронного зажигания, линий электропередач и т. п. Наводимые ЭМИ токи и напряжения могут оказаться смертельными для людей.

Любое техническое устройство, использующее либо вырабатывающее электрическую энергию, является источником ЭМП, излучаемых во внешнее пространство. Особенностью облучения в городских условиях является воздействие на население как суммарного электромагнитного фона (интегральный параметр), так и сильных ЭМП от отдельных источников (дифференциальный параметр).

Величина напряженности поля ЭМИ высоковольтной линии электропередачи может достигать 50 кВ/м, что вызовет появление тока порядка 12 тысяч ампер. Это говорит о том, что генератор ЭМИ представляет собой техногенный источник сильных электромагнитных полей, который требует применения специфических средств и методов защиты от него с использованием микро- и наносекундной техники.

Электромагнитный фон в городских условиях имеет выраженный временной максимум от 10 до 22 ч, причем в суточном распределении наибольший динамический диапазон изменения ЭМ-фона приходится на зимнее время, а наименьший — на лето. Для частотного распределения ЭМ-фона характерна многомодальность. Наиболее характерные полосы частот: 50...1000 Гц (до 20-й гармоники частоты 50 Гц) — энергоснабжение, 1...32 МГц — вещание коротковолновых станций, 66...960 МГц — телевизионное и радиовещание, радиотелефонные системы, радиорелейные линии связи.

Интенсивность фона зависит от географических координат места наблюдения; состояния ионосферы; излучения Солнца и галактик; режима работы радиостанций; интенсивности автомобильного движения; близости к электроэнергетическим источникам.

6.1. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ТЕХНОСФЕРЫ

Спектр техногенных электромагнитных излучений простирается от сверхдлинных волн (несколько тысяч метров и более) до коротковолнового γ -излучения (с длиной волны менее 10^{-12} см).

Таблица 6.1. Шкала электромагнитных волн

Длина волны λ	Поддиапазоны волн	Частота колебаний ν	Диапазон
$\lambda \rightarrow \infty$	—	$\nu \rightarrow 0$	—
10^4 м	№ 1...4. Сверхдлинные волны	30 кГц	Радиоволны
10^3 м	№ 5. Километровые волны (НЧ — низкие частоты)	300 кГц	
10^2 м	№ 6. Гектометровые волны (СЧ — средние частоты)	3 МГц	
10 м	№ 7. Декаметровые волны (ВЧ — высокие частоты)	30 МГц	
1 м	№ 8. Метровые волны (ОВЧ — очень высокие частоты)	300 МГц	
0,1 м	№ 9. Дециметровые волны (УВЧ — ультравысокие частоты)	3 ГГц	
1 см	№ 10. Сантиметровые волны (СВЧ — сверхвысокие частоты)	30 ГГц	
1 мм	№ 11. Миллиметровые волны (миллиметровый диапазон)	300 ГГц	
0,1 мм (100 мкм)	Субмиллиметровые волны	3000 ГГц	Оптический диапазон
0,76 мкм	Инфракрасное излучение (ИК-диапазон)	$4,3 \cdot 10^{14}$ Гц	
0,38 мкм	Видимый диапазон	$7,5 \cdot 10^{14}$ Гц	
100 Å	Ультрафиолетовое излучение (УФ-диапазон)	$3 \cdot 10^{16}$ Гц	
0,1 Å	Рентгеновский диапазон	$3 \cdot 10^{19}$ Гц	—
0,001 Å	γ -излучение	$3 \cdot 10^{21}$ Гц	
$\lambda \rightarrow 0$	Космические лучи	$\nu \rightarrow \infty$	

Известно, что радиоволны, свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, рентгеновские лучи и γ -излучение — все это волны одной, электромагнитной природы, отличающиеся длиной волны.

Современная шкала электромагнитных волн для различных диапазонов представлена в табл. 6.1. Поддиапазоны 1...4 — к промышленным частотам, поддиапазоны 5...11 относятся к радиоволнам. К СВЧ-диапазону отнесены волны с частотами 3...30 ГГц. Однако исторически сложилось так, что под СВЧ-диапазоном понимают колебания с длиной волны от 1 м до 1 мм.

Неионизирующие электромагнитные излучения занимают довольно широкий диапазон частот от ультранизкочастотного (УНЧ) интервала в 0...30 Гц до ультрафиолетовой (УФ) области, т. е. до частот $3 \cdot 10^{16}$ Гц.

Под оптическим диапазоном в радиофизике, оптике, квантовой электронике понимается диапазон длин волн примерно от субмиллиметрового до дальнего ультрафиолетового излучений. К видимому диапазону относятся колебания с длинами волн от 0,76 до 0,38 мкм.

Видимый диапазон составляет небольшую часть оптического диапазона. Границы переходов УФ-излучения, рентгеновского, γ -излучений точно не фиксированы, но примерно соответствуют указанным значениям λ и ν . Гамма-излучение, обладающее значительной проникающей способностью, переходит в излучение очень больших энергий, называемое космическими лучами.

В табл. 6.2 приведены некоторые техногенные источники ЭМП, работающие в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Таблица 6.2. Некоторые техногенные источники ЭМП

Источники ЭМП	Диапазон частот (длин волн)
Радиотехнические объекты	30 кГц...30 МГц
Радиопередающие станции	30 кГц...300 МГц
Радиолокационные и радионавигационные станции	СВЧ-диапазон (300 МГц...300 ГГц)
Телевизионные станции	30 МГц...3 ГГц
Плазменные установки	Видимый, ИК-, УФ-диапазоны
Термические установки	Видимый, ИК-диапазон

Источники ЭМП	Диапазон частот (длин волн)
Высоковольтные линии электропередач	Промышленные частоты, статическое электричество
Рентгеновские установки	Жесткий УФ, рентгеновский диапазон, видимое свечение
Лазеры	Оптический диапазон
Мазеры	СВЧ-диапазон
Технологические установки	ВЧ-, СВЧ-, ИК-, УФ-, видимый, рентгеновский диапазоны
Ядерные реакторы	Рентгеновское и γ -излучение, ИК-, видимое и т. п.
Источники ЭМП специального назначения (наземные, водные, подводные, воздушные), применяемые в радиоэлектронном противодействии	Радиоволны, оптический диапазон, акустические волны (комбинированность действия)

6.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Период и частота. Периодом T электромагнитного колебания называют наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех величин, характеризующих колебание. Частотой f электромагнитных колебаний называют число полных колебаний за единицу времени T : $f = 1/T$.

Частота электромагнитного колебания (частота переменного ЭМП) имеет размерность герц (Гц). Кратными единицами являются килогерц (1 кГц = 10^3 Гц), мегагерц (1 МГц = 10^6 Гц) и гигагерц (1 ГГц = 10^9 Гц).

Круговой частотой ω переменного ЭМП называют число колебаний, которые совершаются за 2π единиц времени: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$. Угловая частота имеет размерность радиан в секунду.

Электромагнитные поля с частотой, равной нулю, называются статическими (электро- и магнитостатическими). Чаще всего используется «электротехническая» шкала источников ЭМП:

низкочастотные (НЧ) — от 0 до 60 Гц;

среднечастотные (СЧ) — от 60 Гц до 10 кГц;

высокочастотные (ВЧ) — от 10 кГц до 300 МГц;
сверхвысокочастотные (СВЧ) — от 300 МГц до 300 ГГц.

Скорость и длина волны. Электромагнитной волной называется распространяющееся в пространстве (или среде) переменное электромагнитное поле. Скорость v , м/с, распространения электромагнитной волны определяется свойствами среды:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon\mu},$$

где ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, имеющая размерность фарад на метр (Ф/м); μ — абсолютная магнитная проницаемость среды, имеющая размерность генри на метр (Гн/м).

В вакууме $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная. В вакууме скорость волны, м/с,

$$v = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = c = 2,998 \cdot 10^8.$$

Длиной волны λ называется расстояние, на которое распространяется фронт электромагнитной волны за время T , равное периоду колебаний в источнике (длину волны можно также определять как ближайшее расстояние между точками ЭМП с одинаковыми фазами): $\lambda = v/f$.

Интенсивность. В гигиенической практике интенсивность ЭМП характеризуется следующими величинами в диапазоне частот 0...300 МГц:

E — среднеквадратическим значением напряженности электрического поля, выражаемой в вольтах на метр (В/м);

H — среднеквадратическим значением напряженности магнитного поля, имеющей размерность ампер на метр (А/м), либо B — магнитной индукцией, выраженной в тесла (Тл).

Для поля в вакууме справедливо соотношение $B = \mu_0 H$. В воздухе на расстояниях от источника, больших длины волны (в дальней зоне), напряженности E и H связаны простым соотношением $E/H = Z_0$, где Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

В диапазоне частот 300 МГц...300 ГГц интенсивность ЭМП характеризуется Q — плотностью потока энергии, выраженной в ваттах на квадратный метр (Вт/м²). Для дальней зоны справедлива формула $Q = E^2/377 = 377 H^2$.

Пространство вокруг источника (излучателя) ЭМП условно делят на ближнюю (индукции) и дальнюю (излучения) зоны воздействия.

Ближняя зона (зона индукции). Под ближней зоной воздействия понимается зона, в которой электромагнитное (волновое) поле еще не сформировано на расстоянии $r \leq \lambda/6 \approx \lambda/2\pi$ от излучателя; как следствие этого, одна из составляющих поля намного меньше другой. В ближней зоне одна из составляющих ($\bar{E}$, $\bar{B}$) поля выражена слабо. У таких источников ЭМП при воздействии на окружающую среду слабо выражена магнитная составляющая напряженности. Ближняя зона (зона индукции) ограничена сферой радиусом $r = \lambda/6$, в которой излучатель находится в центре. В ближней зоне ЭМП характеризуется электрической составляющей поля E (В/м). Поэтому в поддиапазонах частот 5...8 (см. табл. 6.1) ЭМП оценивается электрической составляющей напряженности поля E (В/м).

При одновременной работе нескольких источников в данной зоне принимается суммарное значение квадратов напряженности поля:

$$E_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N E_i^2,$$

где E_i — напряженность электрического поля i -го источника в точке измерения

Дальняя зона (зона излучения). В дальней зоне на расстояниях $r > \lambda/6$ существует и распространяется электромагнитное поле. В дальней зоне ЭМП сформировалось, и здесь выражены обе его составляющие — электрическая и магнитная, поэтому в поддиапазонах частот 9...11 (см. табл. 6.1) ЭМП оценивается поверхностной плотностью потока энергии (ППЭ), выраженной в ваттах на квадратный метр — Вт/м² (1 Вт/м² = 0,1 мВт/см² = 100 мкВт/см²).

При одновременной работе нескольких источников берется суммарная интенсивность Q_{Σ} излучений N -источников

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N Q_i,$$

где Q_i — интенсивность излучения i -го источника в точке измерения дальней зоны.

При работе нескольких источников ЭМП различных диапазонов суммарное действие излучателей должно удовлетворять следующему требованию:

$$\sum_{i=1}^k \frac{E_i^2}{E_{0i}^2} + \sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{Q_{0j}} \leq 1,$$

где E_{0i} — предельно допустимый уровень напряженности электрического поля для i -го источника на границе санитарно-защитной

зоны; Q_{0j} — предельно допустимый уровень интенсивности излучения для j -го источника на границе санитарно-защитной зоны; E_p , Q_j — фактическое значение параметров; $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, m$.

Границы раздела R ближней зоны (зоны индукции), где электромагнитная волна еще не сформировалась, и дальней зоны (зоны излучения) определяются следующими соотношениями:

для ненаправленных излучателей и антенн $R = \lambda/2\pi$;

для направленных апертурных антенн (зеркальной, линзовой и др.) $R = d^2/2\lambda$, где d — диаметр апертуры, м;

для антенн других типов $R = L_1 L_2 / 2\lambda$, где L_1 , L_2 — горизонтальный и вертикальный размеры антенны, м.

При одновременном воздействии нескольких источников суммарное значение параметров ЭМП определяют по формуле

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2,$$

где E_1 , E_2 , ..., E_n — напряженности электрического поля, создаваемые каждым передатчиком в контролируемой точке данного диапазона, В/м.

Суммарная интенсивность Q от n источников на прилегающей территории для поддиапазонов частот 9...11 $Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$.

6.3. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Воздействие ЭМП промышленной частоты связано с высоковольтными линиями электропередач, источниками постоянных магнитных полей, применяемыми на промышленных предприятиях.

Постоянное и низкочастотное магнитные поля. Магнитные поля могут быть постоянными от искусственных магнитных материалов и систем, импульсными, инфранизкочастотными (с частотой до 50 Гц), переменными.

Источниками постоянных магнитных полей являются постоянные магниты, электромагниты, электролизные ванны (электролизеры), линии передачи постоянного тока, шинопроводы и другие электротехнические устройства, в которых используется постоянный ток. Важным фактором производственной среды при изготовлении, контроле качества, сборке магнитных систем является постоянное магнитное поле.

Магнитоимпульсные и электрогидравлические установки являются источниками низкочастотного импульсного магнитного поля.

Постоянное и низкочастотное магнитное поле быстро убывает по мере удаления от источника.

К электромагнитным полям (ЭМП) промышленной частоты относятся линии электропередач напряжением до 1150 кВ, открытые распределительные устройства, коммутационные аппараты, устройства защиты и автоматики, измерительные приборы.

Воздушные линии электропередачи (50 Гц). Интенсивности ЭМП от данного источника во многом зависят от напряжения линии (110, 220, 330 кВ и выше). Средние значения на рабочих местах электромонтеров: E — 5...15 кВ/м, H = 1...5 А/м; на маршрутах обхода обслуживающего персонала: E = 5...30 кВ/м, H = 2...10 А/м. В жилых

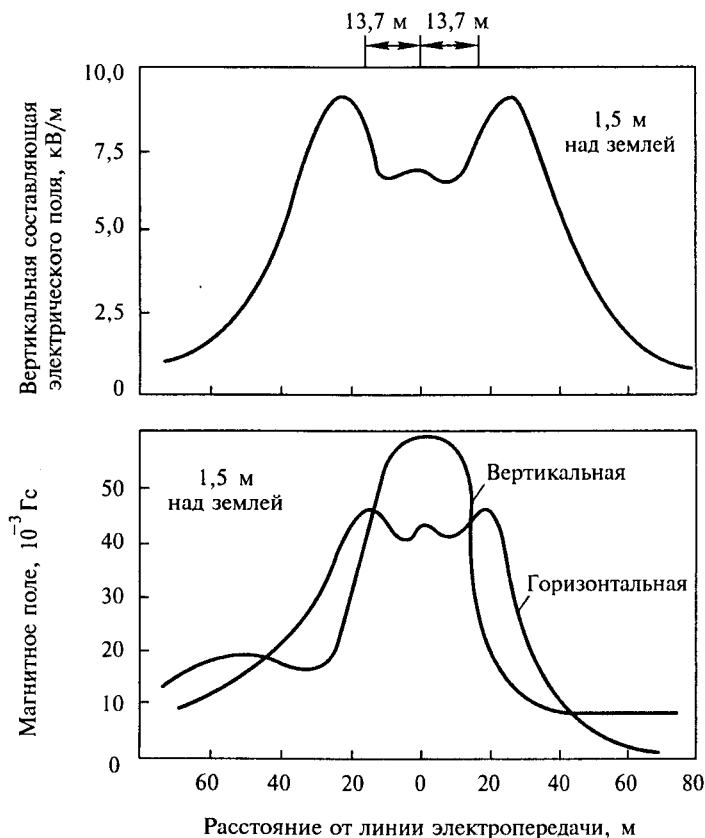


Рис. 6.1. Электрическое и магнитное поле под ЛЭП напряжением 765 кВ (60 Гц) при токе 426 А в зависимости от расстояния до ЛЭП (высота линии 15 м)

зданиях, расположенных вблизи высоковольтных линий, напряженность электрического поля, как правило, не превышает 200...300 В/м, а магнитного поля 0,2...2 А/м ($B = 0,25...2,5$ мТл).

Магнитное поле вблизи линий электропередач (ЛЭП) напряжением 765 кВ составляет 5 мкТл непосредственно под ЛЭП и 1 мкТл — на расстоянии 50 м от ЛЭП.

Картина распределения электромагнитного поля в зависимости от расстояния до ЛЭП представлена на рис. 6.1.

Рельсовый электротранспорт. Самые сильные магнитные поля на больших площадях в плотно населенной городской среде и на рабочих местах образуются от общественного рельсового электротранспорта. Теоретически рассчитанная картина магнитного поля, генерируемого типичными токами от железной дороги, изображена на рис. 6.2. Проведенные экспериментальные измерения на расстоянии 100 м от рельсового пути дали величину магнитного поля в 1 мкТл.

Уровень транспортных магнитных полей может превышать соответствующий уровень от ЛЭП в 10...100 раз; он сравним с магнитным полем Земли (35...65 мкТл), а часто превышает его.

Электрические сети жилых домов и бытовые НЧ-приборы. Основными особенностями жилых помещений в России являются:

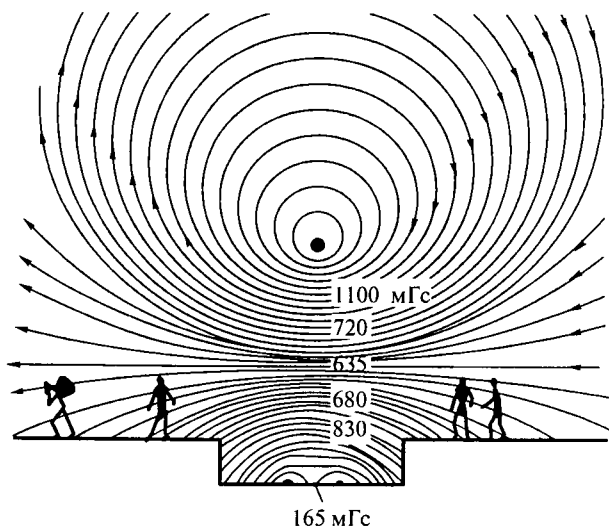


Рис. 6.2. Конфигурация магнитного поля от электрифицированной железной дороги. Ток силой 500 А течет от наблюдателя поперек плоскости рисунка. Возвратные токи текут через рельсы

малометражность комнат и кухонь, что вынуждает человека находиться вблизи электропроводки и электроприборов;

наличие железосодержащих конструкций и коммуникаций, что, с одной стороны, ведет к искажению и ослаблению геомагнитного поля, с другой — создает эффект «экранированной комнаты» для размещенных внутри нее электроприборов.

В подавляющем большинстве случаев используется сеть с одним нулевым (нулевым рабочим) проводником, сети с нулевыми рабочим и защитным проводниками встречаются достаточно редко. Такая ситуация имеет следующие особенности: возрастает риск поражения электрическим током при замыкании фазного провода на металлический корпус или шасси прибора; металлические кожухи, шасси и корпуса приборов не заземлены и являются источником электрических полей (при выключенном приборе с вилкой в розетке) или электрических и магнитных полей промышленной частоты (при включенном приборе).

Довольно сильные магнитные поля можно обнаружить на частоте 50 Гц вблизи домашней бытовой техники. Так, холодильник создает поле 1 мкТл, кофеварка — 10 мкТл, микроволновая печь — 100 мкТл. Подобные магнитные поля гораздо большей протяженности (от 3...5 до 10 мкТл) можно наблюдать в рабочих зонах сталелитейного производства при использовании электропечей.

Напряженности электрических полей вблизи протяженных проводов, включенных в сеть 220 В, составляют 0,7...2 кВ/м, вблизи бытовых приборов с металлическими корпусами (пылесосы, холодильники) — 1...4 кВ/м. В табл. 6.3 приведены значения магнитной индукции около некоторых бытовых приборов.

Таблица 6.3. Значения магнитной индукции B вблизи бытовых приборов

Приборы	Магнитная индукция B в зависимости от расстояния до приборов, мкТл		
	3 см	30 см	1 м
Фены	6...2000	0,01...7	Менее 0,01...0,3
Электробритвы	15...1500	0,08...9	Менее 0,01...0,3
Дрели	400...800	2...3,5	0,08...0,2
Пылесосы	200...800	2...20	Менее 0,13

Приборы	Магнитная индукция B в зависимости от расстояния до приборов, мкТл		
	3 см	30 см	1 м
Миксеры	60...700	0,6...10	—
Электропроводка	0,1...100	0,01...4	0,02...0,25
Переносные обогреватели	10...180	0,15...5	Менее 0,01
Телевизоры	2,5...50	0,04...1,2	Менее 0,01...0,15
Стиральные машины	0,8...50	0,15...2	Менее 0,01...0,15
Электроутюги	8...30	0,12...0,3	0,01...0,025
Вентиляторы	2...30	0,03...0,4	0,01...0,35
Холодильники	0,5...1,7	0,01...0,25	Менее 0,01

Статическое электричество. Оно возникает при дроблении, измельчении, обработке давлением и резанием, разбрызгивании, распылении, просеивании и фильтровании материалов-диэлектриков и полупроводников, при других технологических процессах, сопровождающихся трением (перекачка, транспортирование, слив жидкостей-диэлектриков, например, бензина). При контакте тел, различающихся концентрацией заряженных частиц, температурой, шероховатостью, между ними происходит распределение электрических зарядов.

Источниками электростатических полей в бытовых условиях могут быть любые поверхности и предметы, легко электризуемые при трении: ковры, линолеумы, лакированные покрытия, одежда из синтетических тканей, обувь. Кроме того, электростатический заряд накапливается на экранах электронно-лучевых трубок телевизоров, видеотерминалов, осциллографов. Напряженность электростатических полей в жилых зданиях может составлять до 20...40 кВ/м.

При статической электризации напряжение относительно земли может составлять десятки тысяч вольт (на ременных передачах до 40 кВ, при механической обработке пластмасс и древесины — 20 кВ, при распылении красок — до 12 кВ). Величина заряда статического

электричества прямо зависит от скорости обработки материалов, скорости их истечения, транспортирования, степени дисперсности частиц, удельного электрического сопротивления материала и обратно пропорциональна относительной влажности воздуха.

Возникновение большой разности потенциалов между телами вследствие статической электризации может привести к пробое воздушной прослойки между ними (при 3000 кВ/м) и возникновению искрового разряда, что может стать причиной воспламенения или взрыва смесей паров, газов, пылей с воздухом.

При статической электризации сила тока невелика и составляет доли микроампера ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ А), однако вследствие рефлекторной реакции на этот ток может быть получена механическая травма от удара или падения с высоты.

Электростатика — область физики, изучающая неподвижные электрические заряды. Существуют два вида электричества: положительное и отрицательное. При появлении одного рода электричества всегда возникает равное количество электричества другого рода. Наличие электрических зарядов двух видов является фундаментальным свойством материи.

Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Существует закон сохранения заряда, аналогичный закону сохранения количества вещества. Суммарный заряд в изолированной системе всегда остается неизменным.

Электрические заряды в природе состоят из дискретных зарядов постоянной величины, являющихся зарядом электрона и обозначаемой e .

Сила взаимодействия двух зарядов определяется основным законом электростатики — законом Кулона:

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2 \vec{r}_{21}^0}{r_{21}^2},$$

где $\vec{F}_{12}$ — сила, действующая на заряд 2 (сила, действующая на заряд 1, равна $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$); k — коэффициент пропорциональности (в СИ $k = 8,9875 \cdot 10^9$); q_1, q_2 — величины зарядов; $\vec{r}_{21}^0$ — единичный вектор, направленный от заряда 1 к заряду 2. Умножение на вектор $\vec{r}_{21}^0$ показывает, что сила параллельна линии, соединяющей эти заряды.

Сила взаимодействия двух зарядов не изменяется при наличии третьего заряда. Закон Кулона справедлив для огромного диапазона расстояний: от макроскопических размеров (несколько километров и более) до размеров микромира (около 10^{-13} см).

Наличие зарядов создает в пространстве электрическое поле $\vec{E}$, которое показывает не силу взаимодействия зарядов друг с другом, а только действие зарядов на пробный заряд q_0 . Заряды $q_1, q_2, \dots, q_N$ являются источниками поля. Если исключить заряд q_0 из выражения закона Кулона, то получим определение электрического поля $\vec{E}$ в какой-то точке пространства, созданного распределением зарядов:

$$\vec{E}(x, y, z) = \sum_{j=1}^N \frac{q_j \vec{r}_{0j}}{\vec{r}_{0j}^2}.$$

После определения заряда и электрического поля из закона Кулона вытекает закон Гаусса:

$$\phi = \int_S \vec{E} dS = 4\pi \int \rho dv, \quad (6.3)$$

где ϕ — электрический потенциал; S — замкнутая поверхность; ρ — плотность электрического заряда; v — скорость распространения электромагнитных волн в среде.

Для электростатического поля законы Кулона и Гаусса являются одним законом, но выраженным в различных формах. Использование этих эквивалентных законов позволяет установить связь между полем и его источником, определить величину поля по заданной системе зарядов, по известной величине поля определить величину заряда в любой области.

Скалярная величина электрического потенциала ϕ_{21} имеет смысл работы, затраченной на перенос единицы положительного заряда в поле $\vec{E}$ из точки 1 в точку 2:

$$\phi_{21} = - \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}.$$

Величину ϕ_{21} часто называют разностью потенциалов между двумя точками. Работа перемещения заряда в электростатическом поле, так же как и работа перемещения массы в поле тяготения, не зависит от пути перемещения, а зависит только от начального и конечного положений перемещаемого заряда или массы. Перемещение по эквипотенциалу (линии равного потенциала) не приводит к затратам энергии, так как при этом не производится никакой работы.

Мониторы с электронно-лучевыми трубками персональных ЭВМ. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) являются источниками электромагнитных излучений весьма широкого диапазона частот. Порождаемое ЭЛТ низкочастотное, высокочастотное, инфракрасное, ви-

димое световое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения требуют специального анализа и специфических защитных мероприятий. Основными источниками электромагнитных полей в НЧ- и ВЧ-диапазонах являются:

- экран монитора (электростатические поля);
- питающие провода и системный блок (частота 50 Гц);
- система строчной развертки (диапазон частот 15...130 кГц);
- система кадровой развертки (диапазон частот 50..150 Гц).

Недавно появившийся источник ЭМП — импульсный блок питания. Для уменьшения габаритных размеров и массы сетевого трансформатора в последних моделях частоту напряжения питания сначала повышают до 100...150 кГц, а затем трансформируют уже на этой частоте. Наиболее сильные уровни излучений наблюдаются от верхней и боковых стенок мониторов, причем зона превышения российских гигиенических стандартов может простираться до 2,5 м.

С позиции обеспечения электромагнитной безопасности требуют внимания ПЭВМ типа Notebook. В них отсутствует высоковольтный блок строчной развертки, и суммарное излучение практически полностью определяется импульсными блоками питания. Таких блоков несколько: сетевой адаптер, блок питания электроники, блок питания люминесцентной лампы, подсвечивающей изнутри плоский экран. Отечественные нормативные документы, регламентирующие ЭМП, создаваемые данным типом ПЭВМ, отсутствуют.

6.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОЧАСТОТ (ЭМИ РЧ)

Радиоволны в спектре электромагнитных волн занимают область от длин волн $\lambda = 10^5$ м до $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ м (частотой от $\nu = 3$ кГц до $\nu = 6000$ ГГц). Разбиение всей радиочастотной области длин волн на различные диапазоны приведено в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Разбиение радиочастотной области на диапазоны

Диапазон	Длина волны в вакууме	Частота колебаний
Сверхдлинные волны (СДВ)	100...10 км	3...30 кГц
Длинные волны (ДВ)	10...1 км	30...300 кГц
Средние волны (СВ)	1000...100 м	300...3000 кГц

Диапазон	Длина волны в вакууме	Частота колебаний
Короткие волны (КВ)	100...10 м	3...30 МГц
Ультракороткие волны (УКВ):		
метровые (МВ)	10...1 м	30...300 МГц
дециметровые (ДМВ)	10...1 дм	300...3000 МГц
сантиметровые (СМВ)	10...1 см	3...30 ГГц
миллиметровые (ММВ)	10...1 мм	30...300 ГГц
субмиллиметровые (СбММВ)	1...0,05 мм	300...600 ГГц

По мере развития радиотехники расширялся частотный диапазон радиоволн, которые могут генерироваться и приниматься радиоаппаратурой — от метровых вплоть до субмиллиметровых. В природе существуют также и естественные источники радиоволн во всех частотных диапазонах. Этими источниками являются любое нагретое тело (тепловое излучение), Солнце, звезды и галактики. Радиоволны генерируются при некоторых процессах, происходящих в земной атмосфере, например при разряде молний, при возбуждении колебаний в ионосфере Земли.

Радиоволны применяют для передачи информации без проводов (радиосвязь, телевидение), для обнаружения и определения положения различных объектов (радиолокация) и т. п., а также в различных научных исследованиях.

Перечень технических средств, неионизирующее излучение которых изменяет электромагнитную обстановку в окружающей среде, весьма разнообразен. Источниками электромагнитных излучений радиочастот (ЭМИ РЧ) являются устройства индукционного нагрева металлов и полупроводников, устройства диэлектрического нагрева, телевизионные и радиолокационные станции, антенны радиосвязи, приборы дефектоскопии. Однако основным источником электромагнитного излучения в окружающую среду являются технические средства радиосвязи, радиовещания, телевидения и радиолокации, в состав которых входят передатчики и антенны.

В зонах действия технических средств, излучающих электромагнитную энергию, оказывается не только производственный персонал, но и население, проживающее на территории, примыкающей к излучающему объекту.

Радиопередающие устройства, используемые для радиолокации, радионавигации и связи, работают в очень широком частотном диапазоне: от 9 кГц до сотен гигагерц. Мощности, излучаемые передающими антеннами, также весьма разнообразны.

Особым типом радиопередающих устройств являются радиотелефонные системы с «сотовой» структурой и бесшнуровые телефоны. Распространенными стандартами сотовой радиосвязи в нашей стране являются:

GSM-900 — диапазоны частот 890...915 и 935...960 МГц;

NMT-450 — диапазоны частот 453...457 и 463...467 МГц;

AMPS, AMPS-D — диапазоны частот 824...849 и 869...894 МГц.

Начали свое развитие сети стандарта GSM-1800 (диапазоны частот 1710...1785 и 1805...1880 МГц).

Выходная мощность базовых станций сотовой радиосвязи составляет до 100 Вт, современных передатчиков автомобильных станций — до 6 Вт, ручных радиотелефонов — до 2 Вт (с автоматическим управлением мощности).

Режим облучения различных контингентов лиц имеет некоторые особенности по времени воздействия: лица, профессионально связанные с радиотелефонами (персонал станций, связисты, диспетчеры, работники дорожной инспекции, пожарной охраны), подвергаются облучению в течение рабочего дня, а непрофессиональные пользователи радиотелефонов — только во время телефонных переговоров, которые составляют, по данным исследований, не более 1,5 ч для 85 % этой группы лиц.

Режим работы базовых станций зависит от времени суток. Так, для центра города характерный максимум излучений приходится на период с 11.00 до 17.00 ч, а для «спальных» районов имеют место два максимума — с 09.00 до 10.00 и с 19.00 до 20.00 ч.

Бесшнуровые бытовые и офисные телефоны рассчитаны на весьма малый радиус действия, их излучаемая мощность не превышает 20 мВт, основные частоты: 31...39, 46...49, 900 МГц. Каких-либо сведений о вредности для здоровья подобных систем связи в литературе нет.

6.5. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

Влияние физических, особенно электромагнитных, полей на биосферу разнообразно и многогранно. В результате антропогенной деятельности увеличивается общий электромагнитный фон окружающей природной среды не только в количественном, но и в качественном отношении.

Электромагнитные поля. Искусственные источники создают ЭМП значительно больших интенсивностей, чем естественные. Например, миллиметровые волны, некоторые участки радиодиапазона, УФ, рентгеновские, γ -излучения, инфра- и ультразвуковые колебания, сильные электростатические и магнитные поля в существенной степени изменяют естественный фон. При этом возможно не простое наложение техногенных физических полей на естественный фон, а происходит их более сложное взаимодействие друг с другом, что может существенно влиять на устойчивость экосистем.

Наблюдаются корреляции между урожаем и солнечной активностью (магнитными бурями), влияющей также на климат, животных, эпидемиологические и инфекционные процессы. По данным медицинской статистики, в дни геомагнитных бурь число приступов по поводу инфаркта миокарда, инсультов, кризов на 30 % больше, чем в случае спокойного геомагнитного поля. В периоды геомагнитных бурь увеличивается свертываемость крови, в результате чего растет число тромботических осложнений, которые являются основной причиной сердечно-сосудистых заболеваний. Данные о влиянии электромагнитных полей на заболевания приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Корреляция между повышенным уровнем электромагнитных полей и различными заболеваниями

Источники, характеристика магнитных полей (МП)	Наблюдаемые эффекты
Силовые подстанции, 50 Гц	Головная боль, утомляемость, боли в сердце, головокружение, бессонница
Промышленные магнитные поля, 50, 60 Гц	Утомляемость, сильная головная боль, депрессии, самоубийства
Импульсные электромагнитные поля, 60 Гц	Повышенная смертность из-за несчастных случаев
Линии электропередачи (ЛЭП), 50, 60 Гц	Увеличение числа сердечно-сосудистых заболеваний, повышенный (в 1,5...3 раза) риск заболеваний лейкемией, опухолью мозга у проживающих вблизи ЛЭП
Повышенный уровень электромагнитных полей на рабочем месте	Повышенный риск заболеваний некоторыми формами лейкемии, опухолью мозга, раком у мужчин для некоторых «электрических» профессий

Источники, характеристика магнитных полей (МП)	Наблюдаемые эффекты
МП от трамваев	Повышенный риск заболеваний раком у мужчин — трамвайных рабочих
МП от электропоездов (переменный ток, 16,67 Гц)	Повышенный (в 2...3 раза) риск заболеваний лейкоцитарной лейкемией машинистов и кондукторов. Повышенная (в 2 раза) вероятность смерти от лейкемии у машинистов электропоездов
МП от электропоездов (постоянный ток)	Повышенный риск заболеваний сердечно-сосудистой системы у работающих на железной дороге

При постоянной работе в условиях хронического воздействия магнитных полей, превышающих предельно допустимые уровни, развиваются нарушения функций нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем, пищеварительного тракта, появляются изменения в крови.

Длительное действие ЭМП промышленной частоты приводит к расстройствам (головная боль, вялость, нарушение сна, снижение памяти, апатия, боли в области сердца), нарушению ритма и замедлению частоты сердечных сокращений, нарушениям в работе сердечно-сосудистой системы.

Взаимодействие электромагнитных полей с биологическим объектом определяется:

параметрами излучения (частотой или длиной волны, когерентностью колебания, скоростью распространения, поляризацией волны);

физическими и биохимическими свойствами биологического объекта как среды распространения ЭМП (диэлектрической проницаемостью, электрической проводимостью, длиной электромагнитной волны в ткани, глубиной проникновения, коэффициентом отражения от границы воздух—ткань).

Чувствительность биологических систем к внешним ЭМП зависит от диапазона частот и интенсивности излучений. Весь диапазон неионизирующих электромагнитных излучений при рассмотрении специфики воздействия ЭМП на биообъекты можно условно разбить на три группы:

постоянные и низкочастотные поля (до метрового диапазона длин волн);

СВЧ-диапазон (длины волны от 1 м до 1 см);

миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны (длины волны от 10 мм до 0,1 мм).

Биологический эффект электромагнитного облучения зависит от частоты, продолжительности и интенсивности воздействия, площади облучаемой поверхности, общего состояния здоровья человека. Кроме того, на развитие патологических реакций организма влияют:

режимы генерации ЭМП, в том числе неблагоприятные амплитудная и угловая модуляции;

факторы внешней среды (температура, влажность, повышенный уровень шума, рентгеновского излучения и др.);

некоторые другие параметры (возраст человека, образ жизни, состояние здоровья и пр.);

область тела, подвергаемая облучению.

Известно, что биологическая активность электромагнитных излучений возрастает с уменьшением длины волны, что приводит к большей «агрессивности» действия полей радиочастот по сравнению с полями промышленной частоты.

Однако увеличение мощности генераторов радиоволн привело к тому, что обслуживающий персонал стал жаловаться на ряд нежелательных эффектов, в первую очередь на утомляемость и ощущение тепла.

Другой биологический эффект связан с воздействием радиоволн на центральную нервную систему. В результате длительных обследований людей, работающих при повышенном радиополе, и многочисленных экспериментов с животными была найдена минимальная интенсивность радиоволн, при которой не происходит изменений в центральной нервной системе.

Обнаружен ряд симптомов у персонала, подверженного действию электромагнитных полей радиочастот. Все эти симптомы, называемые по-разному (астенический синдром, синдром хронического переоблучения, микроволновая болезнь), основаны на субъективных жалобах, таких как головная боль, нарушение сна, слабость, снижение либидо, импотенция, боль в груди, чувство общего недомогания. Наблюдаются также лабильные функциональные сердечно-сосудистые изменения, включая брадикардию (иногда, тахикардию), артериальную гипертонию (или гипотонию), изменения сердечной проводимости.

При анализе взаимодействия ЭМП с биологическим объектом разделяют излучения на ионизирующие и неионизирующие. К ионизирующим излучениям относят УФ, рентгеновское и γ -излучение. Квант энергии этих излучений достаточен для разрыва межмолекулярных связей и для ионизации атома. Более длинноволновое излучение (например, СВЧ, миллиметровые или субмиллиметровые волны) относится к неионизирующим излучениям.

Тепловые эффекты. Наиболее исследованным эффектом воздействия ЭМП на биологические ткани является процесс преобразования падающей на ткани энергии в кинетическую энергию молекул, что приводит к нагреву среды (проявляется в диапазонах ВЧ и СВЧ). Нагрев обусловлен одновременно ионной проводимостью и колебанием дипольных молекул воды и белков. Распределение тепловых полей зависит от частоты и конфигурации источника, формы и диэлектрических свойств тканей, тепловых свойств тканей и терморегуляционных способностей организма.

Вредны для организма интенсивные ЭМП в любом диапазоне частот с плотностью мощности, превышающей десятки милливатт на 1 см^2 облучаемой площади. По мере увеличения поглощенной энергии (или плотности потока энергии воздействующего ЭМП выше 10 мВт/см^2) нарушаются защитные механизмы, регулирующие температуру, что приводит к неконтролируемому повышению температуры тела. Наиболее уязвимы ткани с плохой циркуляцией крови и терморегуляцией (хрусталик глаза, семенные железы, желчный пузырь, участки желудочно-кишечного тракта).

Энергия, поглощенная единицей массы за единицу времени, служит основой дозиметрической оценки — так называемой удельной поглощенной мощности, измеряемой в ваттах на килограмм.

Нетепловые (информационные) эффекты. К информационному воздействию ЭМП на биологический объект относится тот случай, когда падающее излучение низкой интенсивности не вызывает нагрева ткани, но полезный эффект оказывается значительным. При этом говорят об информационном или управляющем действии ЭМП. При информационном характере действия ЭМП изменяются характер и скорость передачи информации внутри организма, процесс формирования условных рефлексов, количество ключевых ферментов энергетического обмена и т. д. Этими свойствами, в частности, обладают миллиметровые волны малой интенсивности, равной долям или единицам милливатт на 1 см^2 облучаемой ткани.

При взаимодействии излучения с биологическими объектами возникают резонансные эффекты. Эти процессы имеют частотно

зависимый характер и воздействуют на единую информационно-управляющую систему биосистемы. Волновые и колебательные процессы широко распространены в биосфере и оказывают большое воздействие на биологические системы. При взаимодействии миллиметровых волн малой интенсивности с живой клеткой наблюдается значительный эффект, несмотря на малую энергетику процесса.

Безопасным уровнем поля в жилищах считают значения индукции $0,1 \dots 0,3$ мкТл, что гораздо ниже уровня 100 мкТл, принятого в качестве международного, причем в некоторых странах по итогам исследований уже принимаются меры по защите.

Статическое электрическое поле. Это поле существенно влияет на живые организмы. Земля заряжена отрицательно относительно свободного пространства. Аэрозольные частицы и молекулы газа атмосферы заряжены, как правило, положительно. У поверхности Земли напряженность электрического поля составляет в среднем $100 \dots 130$ В/м. Встречаются локальные области с повышенным значением электрического поля. На предметах, не имеющих электрического контакта с землей, накапливаются поверхностные заряды, которые при соприкосновении с заземленными предметами вызывают разряд, сопровождающийся искрой и характерным треском. В особенности электризуются синтетические ткани.

Разряды, возникающие при стекании статических зарядов, вызывают испуг, раздражение, могут быть причиной пожара, взрыва, травмы, порчи микроэлектронных устройств и т. п. Длительное воздействие статических электрических полей с напряженностью поля более 1000 В/м вызывает у человека головную боль, утомленность, нарушение обмена веществ, раздражительность. Имеются и другие примеры негативного взаимодействия человека и радиодиапазона в окружающей среде.

В последнее время проблема электромагнитной безопасности приобретает социальное значение. Ситуация осложняется тем, что органы чувств человека не воспринимают ЭМП до частот видимого диапазона, в связи с чем без соответствующей аппаратуры оценить степень опасности облучения практически невозможно.

6.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Гигиеническими расчетами ЭМП определяют:

напряженность электрического E и магнитного H полей или плотность потока энергии Q в интересующей точке;

необходимый коэффициент ослабления поля при неизменном геометрическом расположении источника и человека;

необходимое «безопасное» расстояние, начиная с которого параметры ЭМП не превышают ПДУ.

В последних двух вариантах предполагается использовать соответствующие гигиенические стандарты и нормы.

Электрическое поле прямолинейного провода конечной длины, расположенного в воздухе. Исходные данные: потенциал провода U_0 , В; радиус провода r_0 , м; длина провода L , м; расстояние от оси провода до точки наблюдения r , м (рис. 6.3).

Напряженность электрического поля в точке наблюдения, В/м,

$$E(r) = \frac{U_0}{r \ln(L/r_0)} \quad \text{при } r_0 \ll L.$$

Магнитное поле прямолинейного провода конечной длины, расположенного в воздухе. Исходные данные: ток, протекающий по проводу, I_0 , А; длина провода L , м; расстояние от оси провода до точки наблюдения r , м (см. рис. 6.3).

Напряженность магнитного поля в точке наблюдения, А/м,

$$H = \frac{I_0}{4\pi r} \frac{L}{\sqrt{(L/2)^2 + r^2}}.$$

Электрическое поле двухпроводной линии, расположенной в воздухе. Исходные данные: разность потенциалов между проводами U_0 , В; радиус проводов r_0 , м; расстояние между проводами d , м; расстояние от оси линии до точки наблюдения r , м (рис. 6.4).

Напряженность электрического поля, В/м, имеет две компоненты:

$$E_r = \frac{U_0 d}{2r^2 \ln(d/r_0)} \cos \alpha; \quad E_\alpha = \frac{U_0 d}{2r^2 \ln(d/r_0)} \sin \alpha.$$

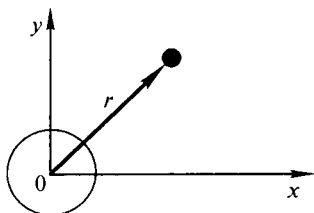


Рис. 6.3. К расчету электрического поля уединенного провода

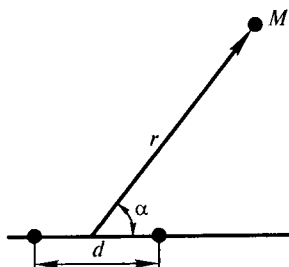


Рис. 6.4. К расчету электрического поля двухпроводной линии

Искомая напряженность в точке наблюдения, В/м, $E = \sqrt{E_r^2 + E_\alpha^2}$ при $r \gg d$.

Магнитное поле двухпроводной линии, расположенной в воздухе. Исходные данные: протекающий ток I_0 , А; расстояние между проводами d , м; расстояния от проводов до точки наблюдения r_1 , r_2 , м; координаты точки наблюдения x , y (рис. 6.5). Напряженность магнитного поля, А/м, имеет две компоненты:

$$H_x = \frac{I_0 y}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right); \quad H_y = -\frac{I_0}{2\pi} \left(\frac{x + d/2}{r_2^2} - \frac{x - d/2}{r_1^2} \right).$$

Искомая напряженность в точке наблюдения, А/м, $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$.

Поле элементарного электрического излучателя (электрического диполя). Исходные данные: амплитуда тока I_0 , А; частота колебаний f , Гц; длина диполя L , м; расстояние от центра диполя до точки наблюдения r , м; угол между вертикальной осью z и направлением на точку наблюдения θ , рад (рис. 6.6).

Поле в ближней зоне (при $r \ll \lambda$, где λ — длина волны излучения, м):

$$E_r = \frac{I_0 L \cos \theta \sin \omega t}{2\pi \omega \epsilon_0 r^3}, \quad \text{В/м};$$

$$E_\theta = \frac{I_0 L \sin \theta \sin \omega t}{4\pi \omega \epsilon_0 r^3}, \quad \text{В/м};$$

$$H_\alpha = \frac{I_0 L \sin \theta \cos \omega t}{4\pi r^2}, \quad \text{А/м}.$$

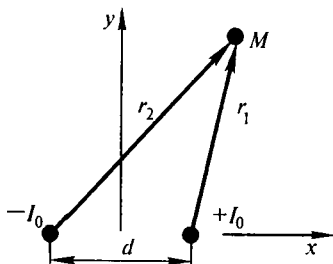


Рис. 6.5. К расчету магнитного поля двухпроводной линии

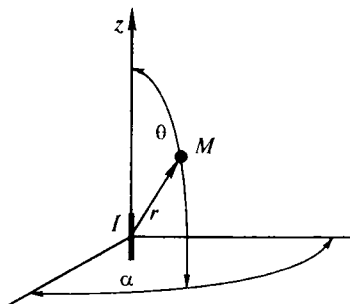


Рис. 6.6. Элементарный электрический излучатель

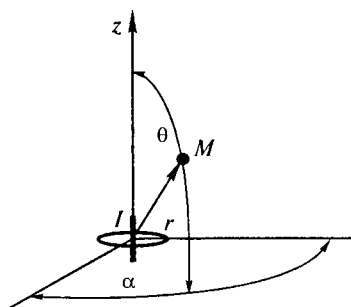


Рис. 6.7. Элементарный магнитный излучатель

Поле в дальней зоне (при $r \gg \lambda$):

$$E_r = 0; \quad E_\theta = \frac{kZ_0 I_0 L \sin \vartheta \sin(\omega t - kr)}{4\pi r^2};$$

$$H_\alpha = \frac{kI_0 L \sin \vartheta \sin(\omega t - kr)}{4\pi r^2},$$

где Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, рад/м.

Поле элементарного магнитного излучателя (рамки с током). Исходные данные: амплитуда тока I_0 , А; частота колебаний f , Гц; площадь рамки S , м²; расстояние от центра рамки до точки наблюдения r , м; угол между вертикальной осью z и направлением на точку наблюдения ϑ , рад (рис. 6.7).

Поле в ближней зоне:

$$E_\alpha = \frac{I_0 S \mu_0 \beta \omega \sin \vartheta \cos \omega t}{4\pi r^2}, \quad \text{В/м};$$

$$H_\vartheta = \frac{I_0 S \cos \vartheta \cos \omega t}{4\pi r^3}, \quad \text{А/м};$$

$$H_r = \frac{I_0 S \cos \vartheta \cos \omega t}{2\pi r^3}, \quad \text{А/м}.$$

Поле в дальней зоне:

$$E_\alpha = \frac{k^2 I_0 S Z_0 \sin \vartheta \cos(\omega t - kr)}{4\pi r}, \quad \text{В/м};$$

$$H_\vartheta = \frac{k^2 I_0 S \sin \vartheta \cos(\omega t - kr)}{4\pi r}, \quad \text{А/м};$$

$$H_r = 0.$$

Поле радиопередающей станции в дальней зоне. Исходные данные: излучаемая мощность P , Вт; длина волны излучения λ , м; коэффициент усиления антенны излучателя в направлении на точку наблюдения D ; расстояние между передатчиком и точкой наблюдения r , м; высоты подъема антенны передатчика и точки наблюдения над поверхностью земли h_1 , h_2 , м.

Множитель ослабления F на трассе в предположении, что коэффициент отражения волны от земли близок к единице, а угол «потери фазы» при отражении близок к 180° :

$$F = 2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}.$$

Действующее значение напряженности электрического поля в точке наблюдения, В/м,

$$E = \frac{\sqrt{30PD}}{r} F.$$

Действующее значение напряженности магнитного поля в точке наблюдения $H = E/377$, А/м, а плотность потока энергии $Q = E^2/377$, Вт/м².

6.7. САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ НОРМАТИВЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Электромагнитное поле как особая форма существования материи характеризуется целым рядом параметров: частотой, напряженностью электрического и магнитного полей, фазой, поляризацией, видом модуляции, структурой и т. д. Биологическая активность почти всех перечисленных параметров уже доказана и степень их воздействия учтена в установленных предельно допустимых уровнях.

Нормирование с точки зрения экологических проблем — это установление предельно допустимых уровней воздействующего фактора. Предельно допустимый уровень устанавливается по биологически активному параметру воздействующего фактора.

Степень вредности воздействия факторов среды (в том числе и электромагнитных излучений) определяют с помощью показателей, полученных в результате физиологических и экспериментальных исследований с учетом отдаленных последствий (генетических и др.).

Нормативной базой в России являются санитарные правила и нормы, а также предельно допустимые уровни (ПДУ) для некоторых источников ЭМП.

Отечественные нормативные документы основаны на комплексе биоэффектов, помимо теплового (влияние на нервную систему, эффекты слабоинтенсивных воздействий, кумуляция биоэффектов при хроническом действии ЭМП и др.). Такой подход требует значительного объема медико-биологических исследований и не позволяет интерполировать результаты нормирования на другие частотные ди-

апазоны. Этим объясняется разрывный (ступенчатый) характер отечественных ПДУ, не перекрывающих весь частотный диапазон.

По мнению многих исследователей в России и за рубежом, большинство изменений, возникающих в организме человека под влиянием электромагнитных полей, как постоянных, так и переменных в разных диапазонах, носит функциональный (временной) характер. Однако это обстоятельство не снимает необходимости нормирования и установления предельно допустимого уровня (ПДУ) облучения, а также строгого контроля и выполнения санитарно-гигиенических норм.

Таблица 6.6. Санитарно-гигиенические нормативы воздействия электромагнитных полей

Диапазон, области применения	Нормируемые параметры	Допустимые значения
Постоянное магнитное поле, условия труда	B , мкТл	ПДУ = 10
Электростатическое поле, условия труда	E , В/м	ПДУ = 60; ПДУ = $60/t^{0,5}$, где $t = 1, 2, 3, \dots, 9$ ч, в остальное время $E \leq 20$
Переменные электромагнитные поля 50 Гц, условия труда	E , В/м	ПДУ = 25 (без средств защиты) ПДУ < 5...2 ч ПДУ = 5...10 — 3 ч ПДУ > 10...15 — 90 мин ПДУ = 15...20 — 10 мин ПДУ > 20...25 — 5 мин
20...22 кГц, население	E , В/м	$E_{\text{пду}} = 0,5$
0,06...300 МГц, условия труда	E , В/м B , мкТл	$B_{\text{пду}} = 5$ $E_{\text{пду}} = 50$ (0,06...3 МГц) $E_{\text{пду}} = 20$ (3...30 МГц) $E_{\text{пду}} = 10$ (30...50 МГц) $E_{\text{пду}} = 5$ (50...300 МГц) $B_{\text{пду}} = 6,3$ (0,06...1,5 МГц) $B_{\text{пду}} = 0,38$ (30...50 МГц)
0,3...300 ГГц, условия труда	Q (предельная поглощаемая энергия), Вт/м ²	$Q_{\text{пду}} = 10$ Дж/м ² (энергетическая нагрузка) $Q_{\text{пду}} = 20$ (от вращающихся и сканирующих антенн) $Q_{\text{пду}} = 2$ (в других случаях)

Принято необходимым осуществлять нормирование электромагнитных полей отдельно для производственного персонала и населения, т. е. людей, профессионально связанных и не связанных с производством и работой в электромагнитных полях. При этом учитывается, что облучение населения может производиться круглосуточно, а производственный персонал попадает в поле только на производстве. В связи с этим предельно допустимые уровни для производственного персонала в 2...3 раза выше, чем для населения.

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей на производстве не должны превышать на рабочих местах производственного персонала, а для населения — на селитебной территории, под которой понимается территория населенного пункта, отведенная под жилые кварталы, общественные здания, парки, бульвары и т. п.

В качестве предельно допустимого уровня (ПДУ) облучения населения принимаются такие значения электромагнитных полей, которые при ежедневном облучении в свойственных для данного источника излучения режимах не вызывают у населения без ограничения пола и возраста заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследования в период облучения или в отдаленные сроки после его прекращения.

Обобщенные санитарно-гигиенические нормативы воздействия электромагнитных полей приведены в табл. 6.6.

6.7.1. Нормативы воздействия низкочастотных магнитных и электростатических полей

Для оценки воздействия ЭМП на человеческий организм с целью выбора способа защиты проводится сравнение фактических уровней излучателей с нормативными.

Электрические поля промышленной частоты (50 Гц). Нормирование ЭМП промышленной частоты осуществляют по предельно допустимым уровням (ПДУ) напряженности электрического и магнитного полей частотой 50 Гц в зависимости от времени пребывания в нем и регламентируют в соответствии с нормами СанПиН 2.2.4.1191—03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» и ГОСТ 12.1.002—84.

Пребывание в электрическом поле (ЭП) напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение всего рабочего дня. Допустимое время (ч) пребывания в электрическом поле напряженностью 5...20 кВ/м $T = 50/E - 2$, где E — напряженность воздействующего ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

В остальное рабочее время напряженность ЭП не должна превышать 5 кВ/м. При напряженности ЭП 20...25 кВ/м время пребывания персонала в ЭП не должно превышать 10 мин. Предельно допустимый уровень напряженности ЭП устанавливается равным 25 кВ/м.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) напряженности ЭМП в окружающей среде в условиях населенных мест (внутри жилых зданий, на территории жилой застройки, на участках пересечения воздушных линий электропередач с автомобильными дорогами) нормируются в соответствии с «Санитарными нормами и правилами защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты» № 2971—84.

Основной критерий безопасности для населения установлен Минздравом РФ и составляет не более 500 В/м при частоте 50 Гц в местах постоянного пребывания людей.

Для электрических полей, излучаемых воздушными ЛЭП напряжением 300 кВ и выше, вводятся следующие ПДУ:

- внутри жилых зданий — 500 В/м;
- на территории зоны жилой застройки — 1 кВ/м;
- в населенной местности вне зоны жилой застройки, а также на территориях огородов и садов — 5 кВ/м;
- на участках пересечения высоковольтных линий с автомобильными дорогами — 10 кВ/м;
- в населенной местности — 15 кВ/м;
- в труднодоступной местности и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения, — 20 кВ/м.

При величине $E > 500$ В/м должны быть приняты меры, исключающие воздействие на человека электрических разрядов и токов стекания.

Для защиты населения вдоль ЛЭП устанавливаются санитарно-защитные зоны, в пределах которых запрещается строить жилые и общественные здания. Границы таких зон вдоль трассы ЛЭП с горизонтальным расположением проводов и без средств снижения поля по обе стороны от нее устанавливаются на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ЛЭП, напряжением 330 кВ — 20 м, 500 кВ — 30 м, 650 кВ — 40 м, 1150 кВ — 55 м.

Напряженность магнитных полей линии электропередачи напряжением до 750 кВ обычно не превышает 20...25 А/м, что не представляет опасности для человека.

Магнитные поля. В соответствии с нормами СанПиН 2.2.4.1191—03 напряженность магнитного поля на рабочем месте не должна превышать 8 кА/м. В гигиенической практике используются измерители магнитной индукции, поэтому в СИ величина 8 кА/м соответствует 10 мТл.

Что касается воздействия магнитного поля промышленной частоты на окружающую среду, то специальных отечественных норм для населения не разработано и приходится ориентироваться на нормы, относящиеся к производственному облучению, либо пользоваться международными нормами (500 мкТл для времени облучения до 2 ч в сутки, 100 мкТл для времени облучения до 24 ч).

Электростатические поля. Нормирование уровней напряженности электростатического поля осуществляют в соответствии с ГОСТ 12.1.045—84 и нормами СанПиН 2.2.4.1101—03. В зависимости от времени пребывания персонала на рабочих местах ПДУ напряженности ЭСП $E_{\text{пред}}$ равен 60 кВ/м в течение 1 ч. При напряженности менее 20 кВ/м время пребывания в ЭСП не регламентируется. В диапазоне напряженности 20...60 кВ/м допустимое время пребывания (ч) персонала в ЭСП без средств защиты $T_{\text{под}} = E_{\text{пред}}^2 / E_{\text{факт}}^2$, где $E_{\text{факт}}$ — фактическое значение напряженности ЭСП, кВ/м.

ПДУ напряженности электростатического поля в жилых и нежилых помещениях не должен превышать 15 кВ/м. Такой же ПДУ установлен для телевизоров, видеомониторов, осциллографов, эксплуатируемых в бытовых условиях.

Установлена гигиеническая норма допустимой напряженности электростатического поля $E_{\text{доп}} = 60$ кВ/м.

Персональные ЭВМ. Особую группу представляют нормативные документы для излучений видеодисплейных терминалов персональных ЭВМ.

В соответствии с нормами СанПиН 2.2.2.542—96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» и СанПиН 2.2.2/2.4.1340—03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» для видеомониторов с электронно-лучевыми трубками персональных ЭВМ ПДУ электрического и магнитного полей на расстоянии 50 см от любой точки поверхности монитора составляют:

25 В/м и 250 нТл (0,2 А/м) — для диапазона частот 5 Гц...2 кГц;
2,5 В/м и 25 нТл (0,02 А/м) — для диапазона частот 2...400 кГц.

Поверхностный электростатический потенциал экрана монитора не должен превышать 500 В. В табл. 6.7 приведены нормативные данные по безопасным ПДУ для персональных ЭВМ.

Таблица 6.7. Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений при работе с видеодисплейными терминалами (ВДТ) и персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ)

Параметр	Допустимое значение
Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть не более: в диапазоне частот 5 Гц...2 кГц в диапазоне частот 2...400 кГц	25 В/м 2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть не более: в диапазоне частот 5 Гц...2 кГц в диапазоне частот 2...400 кГц	250 нТл 25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать	500 В

6.7.2. Нормирование ЭМИ РЧ

Установлено, что биологически активными параметрами электромагнитного поля являются его частота, интенсивность, режим генерации (вид модуляции) и поляризации излучаемых волн. Проявление биологической активности этих параметров в большей мере зависит от взаимного расположения источника излучения и облучаемого объекта, наличия в районе их размещения отражающих предметов и заземления. Однако в мировой практике гигиеническими нормативами предусматривается регламентация лишь двух параметров — частоты и интенсивности электромагнитного поля, причем для частот от 0,3 до 300 ГГц интенсивность поля оценивается плотностью потока мощности, а для частот от 60 кГц до 300 МГц — значением уровней напряженности составляющих поля — электрической (E) и (или) магнитной (H).

В основу гигиенического нормирования ЭМИ радиочастотного диапазона положен принцип действующей дозы, учитывающей энергетическую нагрузку (ЭН).

На территории РФ действуют следующие нормативные документы, регламентирующие ПДУ электромагнитного (неионизирующего) излучения в радиочастотном диапазоне.

1. ГОСТ 12.1.006—84. ССБТ. «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля». Для профессиональных работников в течение рабочего дня диапазон частот 60 кГц...300 МГц.

2. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055—96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)». Для профессиональных работников в течение рабочего дня, круглосуточное непрерывное излучение для населения, проживающего в районах размещения излучающих объектов, диапазон частот 30 кГц...30 ГГц.

3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.8./2.2.4.019—94 «Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи». Для населения, пользователей сотовой связи и обслуживающего персонала станций диапазон частот 400...1200 МГц.

4. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191—03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

5. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.8/2.2.4.1358—03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов».

В диапазоне частот от 30 кГц до 300 МГц интенсивность ЭМИ оценивают значениями напряженности электрического поля (E , В/м) и напряженности магнитного поля (H , А/м).

В диапазоне частот свыше 300 МГц до 300 ГГц интенсивность ЭМИ оценивают плотностью потока энергии излучения (Q , Вт/м², мкВт/см²).

Энергетическую экспозицию (ЭЭ) ЭМИ в диапазоне частот от 30 кГц до 300 МГц определяют как произведение квадрата напряженности электрического и магнитного поля на время воздействия на человека по формулам:

$$\text{ЭЭ}_E = E^2 T [(В/м)^2 \cdot ч]; \quad \text{ЭЭ}_H = H^2 T [(А/м)^2 \cdot ч],$$

где E — напряженность электрического поля, В/м; H — напряженность магнитного поля, А/м; T — время воздействия, ч.

Энергетическую экспозицию (ЭЭ) ЭМИ в диапазоне частот свыше 300 МГц до 300 ГГц определяют как произведение плотности потока излучения на время воздействия на человека:

$$\text{ЭЭ}_Q = QT [(Вт/м^2) \cdot ч], [(мкВт/см^2) \cdot ч],$$

где Q — поверхностная плотность потока энергии излучения Вт/м², мкВт/см²; T — время воздействия, ч.

Нормативы для производственного персонала. Для защиты производственного персонала от воздействия электромагнитных полей высокочастотные установки должны быть оборудованы таким образом, чтобы на рабочих местах и в местах возможного нахождения персонала, связанного профессионально с воздействием электромагнитных полей, напряженность электрического и магнитного полей в диапазоне частот 60 кГц...300 МГц в зависимости от времени их воздействия не превышала значений, указанных в табл. 6.8.

Таблица 6.8. Предельно допустимые уровни напряженности электрического и магнитного полей в диапазоне 0,06...300 МГц в зависимости от времени их воздействия

Время воздействия, ч	0,06...3 МГц		3...30 МГц	30...300 МГц
	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$	$H_{\text{пду}}, \text{А/м}$	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$
12	41	4	24	8
11,5	42	4	25	8
11,0	43	4	25	9
10,5	44	4	26	9
10,0	45	5	26	9
9,5	46	5	27	9
9,0	47	5	28	9
8,5	49	5	29	10
8,0	50	5	30	10
7,5	52	5	31	10
7,0	53	5	32	10
6,5	55	6	33	11
6,0	58	6	34	12
5,5	60	6	36	12
5,0	63	6	37	13
4,5	67	7	39	13
4,0	71	7	42	14
3,5	75	8	45	15

Время воздействия, ч	0,06...3 МГц		3...30 МГц	30...300 МГц
	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$	$H_{\text{пду}}, \text{А/м}$	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$	$E_{\text{пду}}, \text{В/м}$
3,0	82	8	48	16
2,5	89	9	53	18
2,0	100	10	59	20
1,5	115	10	68	23
1,0	141	14	84	28
0,5 (30 мин)	200	20	118	40
0,25 (15 мин)	283	28	167	57
0,08 (5 мин)	500	50	300	80

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

Таблица 6.9. Предельно допустимые уровни плотности потока энергии в диапазоне частот 300 МГц...300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

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

Примечание. При продолжительности воздействия менее 0,2 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

Значения предельно допустимых уровней плотности потока энергии $Q_{\text{пду}}$ в зависимости от продолжительности воздействия ЭМИ РЧ приведены в табл. 6.9.

Предельно допустимые значения интенсивности ЭМИ (по электрической составляющей $E_{\text{пду}}$, В/м, и магнитной составляющей $H_{\text{пду}}$, А/м) в зависимости от времени воздействия в течение рабочего дня (рабочей смены) и допустимое время воздействия в диапазоне частот от 30 кГц до 300 МГц в зависимости от интенсивности ЭМИ определяют по формулам:

$$\begin{aligned} E_{\text{пду}} &= (\Theta \Theta_E / T)^{1/2}; \quad T_E = \Theta \Theta_E / E^2; \\ H_{\text{пду}} &= (\Theta \Theta_H / T)^{1/2}; \quad T_H = \Theta \Theta_H / H^2; \\ Q_{\text{пду}} &= \Theta \Theta_Q / T; \quad T_Q = \Theta \Theta_Q / Q_{\text{пду}}. \end{aligned}$$

При воздействии на производственный персонал электромагнитных полей от нескольких источников, работающих на частотах, для которых установлена общая величина энергетической нагрузки, суммарная напряженность поля E или H определяется по формулам

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}; \quad H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

Если несколько источников (в том числе источники магнитного поля) работают на частотах, для которых установлены различные величины энергетических нагрузок, то на рабочих местах производственного персонала за время рабочего дня должно выполняться условие

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\Theta \Theta_{E_{\text{пду}}}^I} \sum_{i=1}^k E_i^2 T_i + \frac{1}{\Theta \Theta_{E_{\text{пду}}}^{II}} \sum_{j=1}^l E_j^2 T_j + \\ &+ \frac{1}{\Theta \Theta_{E_{\text{пду}}}^{III}} \sum_{p=1}^m E_p^2 T_p + \frac{1}{\Theta \Theta_{H_{\text{пду}}}^I} \sum_{q=1}^n H_q^2 T_q \leq 1, \end{aligned}$$

где E_i, E_j, E_p, H_q — напряженность электрических и магнитных полей от каждого источника излучения на рабочем месте; T_i, T_j, T_p, T_q — время работы каждого источника за рабочий день; k, l, m, n — количество источников в каждом нормируемом диапазоне.

Предельно допустимые уровни напряженности электрического и магнитного полей, приведенные в табл. 6.8, соответствуют следующим предельно допустимым энергетическим нагрузкам в течение рабочего дня, установленным для различных частотных диапазонов:

- для диапазона частот 0,06...3 МГц

$$\mathcal{E}\mathcal{E}_{E_{\text{пду}}}^I = 20\,000 (\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}, \quad \mathcal{E}\mathcal{E}_{H_{\text{пду}}}^I = 200 (\text{А/м})^2 \cdot \text{ч};$$

- для диапазона частот 3...30 МГц

$$\mathcal{E}\mathcal{E}_{E_{\text{пду}}}^{II} = 7000 (\text{В/м})^2 \cdot \text{ч};$$

- для диапазона частот 30...300 МГц

$$\mathcal{E}\mathcal{E}_{E_{\text{пду}}}^{III} = 800 (\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}.$$

Предельно допустимые значения интенсивности ЭМИ в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц ($Q_{\text{пду}}$) в зависимости от времени воздействия в течение рабочего дня (рабочей смены) и допустимое время воздействия в зависимости от интенсивности ЭМИ определяют по формулам:

$$Q_{\text{пду}} = k \mathcal{E}\mathcal{E}_Q / T; \quad T_Q = k \mathcal{E}\mathcal{E}_Q / Q_{\text{пду}},$$

где k — коэффициент ослабления биологической активности, равный: 1 — для всех случаев воздействия, исключая облучение от вращающихся и сканирующих антенн и локальное облучение кистей рук; 10 — для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20; $\mathcal{E}\mathcal{E}_Q$ — предельно допустимая величина энергетической нагрузки, равная $2 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2$ ($200 \text{ мкВт} \cdot \text{ч/см}^2$).

Такой подход основан на представлении, что облучение работающих от СВЧ-генераторов происходит в волновой зоне, а от генераторов более низких частот — в ближней зоне или зоне индукции, где строгого соотношения между E и H , составляющими поля, нет. Во всех случаях максимальное значение $Q_{\text{пду}}$ не должно превышать 10 Вт/м^2 (1000 мкВт/см^2).

Нормативы для населения. Нормирование ПДУ для окружающей среды регламентируется в соответствии с нормами СанПиН 2.2.4/2.1.8.055—96. В табл. 6.10 приведены предельно допустимые уровни электромагнитного поля для различных частотных диапазонов. Эти ПДУ относятся к радиотехническим объектам, работающим в режиме непрерывного излучения (кроме объектов радио- и телевизионного вещания в ОВЧ-диапазоне).

Предельно допустимые уровни по напряженности поля приведены в эффективном значении, а по плотности потока энергии — в среднем значении. Диапазоны, приведенные в табл. 6.10, исключают нижний, включают верхний предел частоты.

Таблица 6. 10. Предельно допустимые уровни электромагнитных полей (круглосуточное непрерывное излучение)

Номер диапазона	Метрическое подразделение диапазона	Частоты	Длины волн	ПДУ
5	Километровые волны (низкие частоты)	30...300 кГц	10...1 км	25 В/м
6	Гектометровые волны (средние частоты)	0,3...3 МГц	1...0,1 км	15 В/м
7	Декаметровые волны (высокие частоты)	3...30 МГц	100...10 м	10 В/м
8	Метровые волны (очень высокие частоты)	30...300 МГц	10...1 м	3 В/м
9	Дециметровые волны (ультравысокие частоты)	300...3000 МГц	1...0,1 м	10 мкВт/см ²
10	Сантиметровые волны (сверхвысокие частоты)	3...30 ГГц	10...1 см	10 мкВт/см ²

Предельно допустимые значения напряженности электрического поля в диапазоне от 48,4 до 300 МГц в зоне размещения радиотелевизионных передающих станций зависят от частоты и определяются по формуле $E_{\text{пду}} = 21\nu^{-0,37}$, где $E_{\text{пду}}$ — предельно допустимое значение напряженности электромагнитного поля, В/м; ν — нормируемая частота электромагнитного поля, МГц.

Нормирование электромагнитного поля, создаваемого телевизионными станциями УВЧ-диапазона (более 300 МГц), необходимо производить согласно ВСН № 2963—84. Оценка уровней ЭМП средств телевидения и радиовещания проводится в соответствии с указаниями Минздрава № 3850—85. Для зон, прилегающих к телевизионным станциям СВЧ-диапазона, нормирование производится по СН 4262—87.

Предельно допустимые уровни ЭМП для мест жилой застройки, мест массового отдыха и для внутренних помещений жилых общественных и производственных зданий приведены ниже.

Интенсивность ЭМИ РЧ радиолокационных станций специального назначения (РЛС СН), предназначенных для контроля космического пространства и работающих в диапазоне частот 150...300 МГц в режиме электронного сканирования луча, на территории населен-

ПДУ ЭМП, создаваемых радиотехническими объектами

Диапазон частот, МГц	30 · 10 ⁻⁶ ...	0,3	0,3...3	3...30	30...300	300...3 · 10 ⁵
ПДУ, В/м	25	15	10	3*	10 мкВт/см ² ; 100 мкВт/см ^{2**}	

ПДУ ЭМП, создаваемых телевизионными станциями

Частота, МГц	48,4	88,4	192,0	300
ПДУ, В/м	5	4	3	2,5

*Кроме телевизионных станций и радиолокационных станций, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.

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

ных мест, расположенных в ближней зоне диаграммы излучения РЛС СН, не должна превышать 10 мкВт/см² и на территории населенных мест, расположенных в дальней зоне диаграммы излучения РЛС СН, — 100 мкВт/см².

Воздействие на пациентов излучением медицинских аппаратов санитарными правилами СанПиН 2. 2.4/2.1.8.055—96 не регламентируется, поскольку уровни и продолжительность этого воздействия определяются необходимым лечебным эффектом.

В соответствии с нормативами ГН 2.1.8./2.2.4.019—94 предельно допустимые уровни плотности потока энергии электромагнитных полей, создаваемых системами сотовой связи, на селитебной территории от антенн базовых станций не должны превышать ПДУ, установленных ВСН № 2963—84, — 10 мкВт/см².

ПДУ плотности потока мощности для пользователей радиотелефонов не должны превышать 100 мкВт/см².

Не подлежит согласованию с учреждениями Госсанэпиднадзора размещение вне зданий (в том числе на крышах) передающих средств со слабонаправленными антеннами, если их максимальная мощность не превышает:

40 Вт — в диапазоне частот 30 кГц...3 МГц;

20 Вт — в диапазоне частот 3...30 МГц;

2 Вт — в диапазоне частот 30 МГц...300 ГГц.

Ряд специальных ПДУ разработан также для метеорологических РЛС и радиопередающих средств аэропортов гражданской авиации.

Излучения от бытового оборудования и приборов, носимых радиопередающих средств, источников ЭМИ РЧ, используемых на рабочих местах лицами, не достигшими 18 лет, и женщинами в состоянии беременности, не должны превышать:

1 Вт — в диапазоне частот 30 кГц...3 МГц;

0,5 Вт — в диапазоне частот 3...30 МГц;

0,05 Вт — в диапазоне частот 30 МГц...300 ГГц.

Для систем сотовой связи, работающих в частотном диапазоне 400...1200 МГц, ПДУ плотности потока энергии составляют:

100 мкВт/см² — для пользователей радиотелефонов;

10 мкВт/см² — для населения, облучаемого от базовых станций.

Для СВЧ-печей ПДУ плотность потока энергии составляет 10 мкВт/см² для расстояний 50 см от любой точки корпуса печи.

Измерение уровней излучений производится в порядке текущего санитарного надзора, при сдаче в эксплуатацию новых или реконструированных источников ЭМП и общественных зданий и сооружений, расположенных на прилегающей к электромагнитным излучателям территории.

Нормированию подлежит также вся бытовая и компьютерная техника, которая является техногенным источником ЭМП.

Глава 7

ЗАЩИТА ОТ НЕИОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

7.1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЭМП

В связи с загрязнением окружающей среды такими физическими полями, как электромагнитные излучения, необходима и защита от них. Для правильного выбора оптимальных средств защиты необходимо определить основные характеристики источников ЭМП: диапазон частот, энергию и мощность излучения, режим работы, диаграмму направленности, особенности распространения в атмосфере, биологическое действие, тип поляризации, их назначение и т. п.

В зависимости от частоты источника ЭМП, его мощности и режима работы выбирают те или иные средства защиты от воздействия электромагнитных колебаний на человеческий организм.

Мероприятия по защите биологических объектов от ЭМП подразделяют на организационные; инженерно-технические; медико-профилактические и лечебные.

Организационные мероприятия. К основным организационным мероприятиям относят:

- нормирование параметров электромагнитных воздействий;
- периодический контроль облучаемости;
- рациональное размещение источников и приемников излучения (территориальный разнос);
- ограничение времени пребывания в ЭМП;
- предупредительные надписи и знаки.

Например, при пользовании радиотелефоном рекомендуется: ограничивать время пользования радиотелефоном (лучше использовать обычную проводную телефонную связь, а радиотелефон — только в экстренных случаях);

пользоваться радиотелефоном в неэкранированных помещениях и на открытых площадках;

плотно охватывать трубку рукой;

попеременно прикладывать трубку к левому и правому уху;

иметь зазор между ухом и трубкой (при хорошем качестве связи).

Для минимизации вредных воздействий питающих проводов в жилых домах и бытового электрооборудования необходимо соблюдать следующие рекомендации:

не находиться рядом с длинными проводами под напряжением;
избегать свивания проводов в кольца, поскольку это увеличивает интенсивность излучения (эффект магнитного диполя);

не оставлять вилку в розетке при выключенном приборе, поскольку в этом случае питающий провод становится дополнительным источником электрического поля;

не размещать электроприборы в углах комнат железобетонных зданий — в этом случае уровень излучения значительно возрастает («угловой отражатель»), это особенно относится к приборам, излучающим спектр частот: телевизорам, электронно-лучевым трубкам персональных ЭВМ.

Магнитные поля промышленной частоты могут быть ослаблены только толстостенными ферромагнитными экранами, что в бытовых условиях невозможно. В связи с этим рекомендуется пользоваться изделиями ведущих фирм-производителей (приборы излучают существенно меньшие поля), а также ограничивать по возможности время пребывания рядом с включенными приборами.

Инженерно-технические мероприятия. Выбор методов и средств защиты от воздействия электромагнитных полей и излучений во многом определяется характеристиками источников по частоте. В число методов защиты от ЭМП в окружающей среде входит защита расстоянием, экранирование, частичное поглощение мощности излучения, снижение уровня энергетического воздействия путем рассеяния и отвода части энергии от места ее локализации в окружающую среду.

К основным инженерно-техническим мероприятиям относятся уменьшение мощности излучения непосредственно в источнике и электромагнитное экранирование.

Экраны могут размещаться вблизи источника (кожухи, сетки), на трассе распространения (экранированные помещения, лесонасаждения), вблизи защищаемого человека (средства индивидуальной защиты — очки, фартуки, халаты).

Иногда необходимо совместное применение организационных и технических мероприятий. Например, для снижения воздействия электростатических полей рекомендуется:

использовать мониторы персональных ЭВМ с антистатическим покрытием экрана либо с заземленными защитными экранами-фильтрами;

выдерживать расстояние до телевизора с экраном диагональю до 36 см не менее 1 м и не менее 2 м до телевизора с экраном диагональю свыше 51 см;

производить влажную уборку в жилых помещениях;

использовать антистатические аэрозоли и бытовые ионизаторы воздуха.

Медицинско-профилактические и лечебные мероприятия. Эти мероприятия предполагают:

гигиенические и терапевтические мероприятия по лечению пострадавших от электромагнитного воздействия;

временный или постоянный перевод на другую работу отдельных категорий граждан (например, женщин в период беременности и кормления ребенка);

просветительную работу среди населения о возможных биологических эффектах электромагнитных воздействий, о действующих стандартах и методах защиты.

7.2. СПОСОБ ЗАЩИТЫ РАССТОЯНИЕМ

Этот способ защиты окружающей среды от воздействия ЭМП является основным, включающим в себя как технические, так и организационные мероприятия.

Вдоль трассы высоковольтной линии (ВЛ), проходящей через населенную местность, границу санитарно-защитной зоны выбирают в соответствии с размерами, приведенными в табл. 7.1.

**Таблица 7.1. Граница санитарно-защитной зоны
вдоль трассы ВЛ**

Напряжение ВЛ, кВ	Расстояние от проекции на землю крайних фаз проводов, м	Напряжение ВЛ, кВ	Расстояние от проекции на землю крайних фаз проводов, м
1150	300	220	25
750	250	110	20
500	150	35	15
330	75	До 20	10

В пределах санитарно-защитной (охранной) зоны запрещается размещать жилые здания, стоянки и остановки транспорта, устраивать места отдыха, спортивные и игровые площадки.

С целью уменьшения ЭМП промышленной частоты увеличивают высоту подвеса проводов ВЛ, удаляют жилую застройку от линии передачи, применяют экранирующие устройства.

Способ защиты временем состоит в том, что находиться вблизи источников ЭМП как можно меньше времени.

При размещении радиотехнических сооружений и объектов (РТО) на селитебной территории с целью получения уровней воздействия ЭМП, не превышающих ПДУ, учитывают:

- мощность и диапазон частот источника ЭМП;

- конструктивные особенности, характеристику направленности и высоту размещения антенны излучателя;

- оптимальный режим работы источника ЭМП;

- рельеф местности;

- функциональное значение прилегающих территорий;

- этажность и особенность застройки и т. п.

Рекомендуется передающие радиотехнические объекты размещать в максимально возвышенных по отношению к остальной местности местах. Площадку РТО оборудуют согласно Строительным нормам и правилам, на ее территории не допускается размещать жилые и общественные здания.

Для защиты населения от воздействия ЭМП при сооружении РТО в случае необходимости создают санитарно-защитную зону и зону ограничения застройки в соответствии с Санитарными нормами СанПиН 2.1.8/2.24.1383—03. Санитарно-защитной зоной является площадь, примыкающая к технической территории радиотехнического объекта. Внешние границы санитарно-защитных зон определяются на высоте 2 м от земли в зависимости от частоты и мощности излучения по значениям ПДУ. Санитарно-защитная зона устанавливается с учетом перспективного развития объекта и населенного пункта и отсчитывается от антенны.

Для радиовещательных и телевизионных станций, имеющих ненаправленное излучение, санитарно-защитная зона имеет круговую форму. Радиусы санитарно-защитных зон для некоторых видов радиопередатчиков приведены в табл. 7.2.

Санитарно-защитные зоны радио- и телевизионных станций представлены в табл. 7.3.

Кроме санитарно-защитных зон, вводятся зоны ограничения территории, где на высоте более 2 м от поверхности земли интенсивности ЭМП превышают ПДУ. В этих зонах запрещается строительство жилых зданий.

**Таблица 7.2. Радиусы санитарно-защитных зон
для типовых радиопередающих станций**

Диапазоны частот, МГц	Мощность передатчика, кВт			
	До 5	5...25	25...100	Более 100
0,03...0,3	10	10...75	75...480	Более 480
0,3...3	20	20...150	150...960	Более 960
3...30	175	175...400	400...2500	Более 2500

Таблица 7.3. Санитарно-защитные зоны радио- и телестанций

Тип объекта	Диапазон частот	Размер санитарно-защитной зоны, м
Длинноволновые радиостанции (ДВ)	30...300 кГц	100...1000
Средневолновые радиостанции (СВ)	300...3000 кГц	200...1000
Коротковолновые радиостанции (КВ)	3...30 МГц	50...700
Телевизионные и УКВ радиостанции	30...1000 МГц	25...800

Зоной ограничения застройки является территория, где на высоте более 2 м от поверхности земли превышаются предельно допустимые уровни. Внешняя граница зоны ограничения определяется по максимальной высоте зданий перспективной застройки, на уровне верхнего этажа которых не превышает предельно допустимый уровень электромагнитного поля.

В санитарно-защитной зоне и зоне ограничений запрещается строительство жилых зданий всех видов, стационарных лечебно-профилактических и санаторно-курортных учреждений, детских дошкольных учреждений, средних учебных заведений всех видов, интернатов и других зданий, предназначенных для круглосуточного пребывания людей.

Санитарно-защитные зоны и зоны ограничения застройки для передающих радио- и телевизионных станций, оборудованных антеннами ненаправленного излучения в горизонтальной плоскости, а также для радиолокационных станций кругового обзора устанавливаются вокруг радиотехнического объекта.

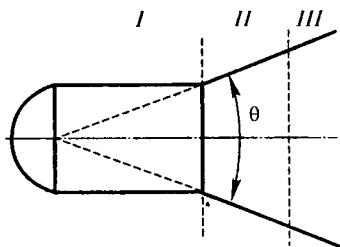


Рис. 7.1. Зоны электромагнитного поля антенны с параболическим отражателем

Для передающих радиостанций, оборудованных антеннами направленного действия, санитарно-защитные зоны и зоны ограничения застройки устанавливаются в направлении излучения электромагнитной энергии, однако при этом должны учитываться также боковые и задние лепестки характеристик излучения антенн.

Для передающих радиостанций, антенны которых излучают электромагнитную энергию под определенным углом к горизонту и уровень электромагнитного поля изменяется в зависимости от высоты, зона ограничения застройки устанавливается дифференцированно по вертикали в пределах высоты жилой застройки.

Санитарно-защитная зона и зона ограничения определяются расчетным путем и уточняются путем измерений интенсивности ЭМИ РЧ.

Для снижения степени облучения селитебных территорий и уменьшения размеров санитарно-защитных зон и зон ограничений антенны РТО следует устанавливать на естественных возвышенностях, насыпях, эстакадах и т. п., максимально ограничивая использование отрицательных углов наибольшего излучения антенн.

Пространство около антенны или другого проводника с переменным током, где существует электромагнитное поле, делится на ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны, обозначенные цифрами I, II и III (рис. 7.1).

В ближней зоне электрическое и магнитное поля сдвинуты по фазе на 90° . Энергия электромагнитного поля сосредоточена около проводника. Поле характеризуется напряженностями составляющих его электрического и магнитного полей:

$$E = \frac{II}{2\pi\epsilon\omega r^2}, \quad H = \frac{II}{4\pi r^2}, \quad (7.1)$$

где I — ток в проводнике (антенне), А; l — длина проводника (антенны), м; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; ω — круговая частота поля.

Координаты точек, в которых напряженность поля равна предельно допустимой, могут быть найдены аналитически по следующим формулам, вытекающим из соотношений (7.1):

для электрического поля

$$r_n = r \sqrt[3]{E_n / E_{\text{доп}}}, \quad (7.2)$$

для магнитного поля

$$r_n = r \sqrt{H_n / H_{\text{доп}}}, \quad (7.3)$$

где r_n — расстояние от источника излучения до точки, где $E = E_{\text{доп}}$, м; r — расстояние от источника излучения до точки, в которой производилось измерение, м; E_n и H_n — измеренные напряженности полей, В/м или А/м; $E_{\text{доп}}$ и $H_{\text{доп}}$ — предельно допустимые напряженности полей.

Пример 7.1. Согласно результатам измерений напряженность электрического поля на расстоянии $r_n = 0,3$ м от рабочего индуктора электротермической установки составляет 90 В/м. Рабочая частота установки $\nu = 250$ кГц. По условиям производства установку можно оборудовать дисковым питателем для подачи заготовок в зону нагрева индуктора. Требуется вычислить минимальный диаметр диска, при котором рабочий, устанавливающий заготовку в гнездо на дальней от индуктора стороне диска, оказывается в электрическом поле с напряженностью не более предельно допустимой.

Решение. При $\nu = 250$ кГц ($\lambda = 1,2$ км) величина $\lambda/(2\pi) = 1200/(2 \cdot 3,14) = 191$ м, т. е. значительно больше протяженности рабочей зоны около установки. Следовательно, рабочая зона находится в ближней зоне излучения индуктора. Поэтому для вычисления минимального расстояния, где напряженность поля не превышает допустимую величину $E_{\text{доп}} = 20$ В/м, будет правильным воспользоваться формулой (7.2), из которой находим

$$r_n = r_n (E_n / E_{\text{доп}})^{1/3} = 0,3(90/20)^{1/3} = 0,5 \text{ м.}$$

Таким должен быть и минимальный диаметр диска.

Плотность потока мощности J в свободном пространстве связана с напряженностями электрического и магнитного полей. На практике она определяется через мощность излучения радиотехнического устройства P (среднюю по времени для радиолокационных станций), а если антенна направленная, то и через коэффициент ее усиления K_G , а также через расстояние r между антенной и точкой наблюдения:

$$J = \frac{PK_G}{4\pi r^2}. \quad (7.4)$$

7.3. ЗАЩИТА ОТ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭМП И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Постоянное и низкочастотное магнитное поле. Защита от воздействия магнитного поля сводится к защите расстоянием и экранированием. При работе с постоянными магнитами, магнитными дефектоскопами, станками с магнитным креплением обрабатываемых деталей защита заключается в выведении работающего из зоны повышенного уровня магнитного поля. Установки намагничивания и размагничивания при внесении в них деталей следует обессточивать.

Электромагнитное поле промышленной частоты. Вдоль трассы ВЛ, проходящей через населенную местность, границу санитарно-защитной зоны выбирают в соответствии с размерами, представленными в табл. 7.1.

Электростатические поля. Методы, исключаящие или снижающие интенсивность генерации зарядов:

- увлажнение воздуха до относительной влажности 65...75 %;

- химическая обработка поверхности электропроводными покрытиями;

- нанесение на поверхность антистатических веществ;

- нейтрализация зарядов с применением индукционных, высоковольтных, высокочастотных, радиоактивных нейтрализаторов;

- очистка жидкостей от нерастворимых твердых и жидких примесей;

- уменьшение скоростей обработки, транспортирования и слива.

Методы, устраняющие образующиеся заряды:

- заземление электропроводных частей оборудования с сопротивлением заземления не более 100 Ом;

- применение средств индивидуальной защиты (электростатические халаты и обувь, антистатические браслеты);

- изготовление полов во взрывоопасных помещениях электропроводными с удельным электрическим сопротивлением не более $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Для защиты от атмосферного статического электричества, достигающего потенциала в несколько миллионов вольт и силы тока в разряде молнии 10 000 А, применяют одиночные или групповые заземленные молниеотводы.

Бытовые электроприборы и персональные компьютеры. Электромагнитная безопасность электробытовых приборов и компью-

теров (ПК) должна быть подтверждена гигиеническим сертификатом. Общие рекомендации по безопасности этого класса оборудования и приборов в общем виде могут быть выражены следующим образом:

- использовать модели электроприборов и ПК с меньшим уровнем электропотребления (они создают ЭМП меньшего уровня);

- размещать приборы, работающие длительное время (холодильник, телевизор, СВЧ-печь, электропечь, электрообогреватели, ПК, воздухоочистители, аэроионизаторы), на расстоянии не менее 1,5 м от мест постоянного пребывания или ночного отдыха, особенно детей;

- в случае большого числа электробытовой техники в жилом помещении одновременно включать как можно меньше приборов;

- использовать монитор ПК, излучающий ЭМП во всех направлениях, с пониженным уровнем излучения;

- заземлять ПК и приборы на контур заземления здания (нельзя заземлять на батарею отопления, водопроводные трубы, «ноль» розетки);

- использовать при работе с ПК заземленные защитные фильтры для экрана монитора, снижающие уровень ЭМП;

- по возможности использовать приборы с автоматическим управлением, позволяющие не находиться рядом с ними во время работы.

Требования безопасности при работе на персональных электронно-вычислительных машинах сформулированы в СанПиН 2.2.2.542—96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

Конструкция видеодисплейного терминала (ВДТ), его дизайн и совокупность эргономических параметров должны обеспечивать надежное и комфортное считывание отображаемой информации в условиях эксплуатации.

В целях защиты от электромагнитных и электростатических полей допускается применять сертифицированные приэкранные фильтры, специальные экраны и другие средства индивидуальной защиты.

Режимы труда и отдыха при работе с ПЭВМ и ВДТ должны организовываться в зависимости от вида и категории трудовой деятельности.

Виды трудовой деятельности разделяются на три группы: группа А — работа по считыванию информации с экрана ВДТ или ПЭВМ с предварительным запросом; группа Б — работа по вводу информации; группа В — творческая работа в режиме диалога с ЭВМ. При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к разным видам трудовой деятельности, за основную работу с ПЭВМ и ВДТ следует принимать такую, которая занимает не менее 50 % времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Для видов трудовой деятельности устанавливаются три категории тяжести и напряженности работы с ВДТ и ПЭВМ, которые определяются: для группы А — по суммарному числу считываемых знаков за рабочую смену, но не более 60 000 знаков за смену; для группы Б — по суммарному числу считываемых или вводимых знаков за рабочую смену, но не более 40 000 знаков за смену; для группы В — по суммарному времени непосредственной работы с ВДТ и ПЭВМ за рабочую смену, но не более 6 ч за смену.

Продолжительность непрерывной работы с ВДТ без регламентированного перерыва не должна превышать 2 ч.

При работе с ВДТ и ПЭВМ в ночную смену (с 22 до 6 ч) независимо от категории и вида трудовой деятельности продолжительность регламентированных перерывов должна увеличиваться на 60 мин.

При 8-часовой рабочей смене и работе на ВДТ и ПЭВМ регламентированные перерывы следует устанавливать:

- для I категории работ — через 2 ч от начала рабочей смены и через 2 ч после обеденного перерыва продолжительностью 15 мин каждый;
- для II категории работ — через 2 ч от начала рабочей смены и через 1,5...2,0 ч после обеденного перерыва продолжительностью 15 мин каждый или продолжительностью 10 мин через каждый час работы;
- для III категории работ — через 1,5...2,0 ч от начала рабочей смены и через 1,5...2 ч после обеденного перерыва продолжительностью 20 мин каждый или продолжительностью 15 мин через каждый час работы.

При 12-часовой рабочей смене регламентированные перерывы должны устанавливаться в первые 8 ч работы аналогично перерывам при 8-часовой рабочей смене, а в течение последних 4 ч работы, независимо от категории и вида работ каждый час продолжительностью 15 мин.

В соответствии с СанПиН 2.2.2.542—96 время непрерывной и суммарное время работы за ПК представлено в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Нормативы продолжительности работы на ПЭВМ

Категория пользователей ПЭВМ	Продолжительность работы на ПЭВМ в течение дня	
	непрерывная	общая
Дети дошкольного возраста	—	7...10 мин
Школьники	10...30 мин	45...90 мин
Студенты	1...2 ч	2...3 ч
Взрослые	До 2 ч	До 6 ч

Профессиональные пользователи ВДТ и ПЭВМ должны проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические медицинские осмотры.

7.4. ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМИ РЧ

Проблема защиты является очень важной, так как в ряде случаев невозможно обойтись организационными мерами (образование санитарных зон вокруг объекта). Она предполагает в себе два направления: пассивная (экранирование, изменение технологических процессов) и активная (создание экологически «чистых» антенн, модернизация существующих и т. д.) защита.

Проектирование любой системы защиты начинается со сравнения допустимого уровня электромагнитного поля, определяемого в соответствии с принятыми нормативами ПДУ, с уровнями, полученными методами прогноза или измерения. В результате такого сравнения получают величину необходимого ослабления уровня электромагнитного поля (электромагнитной энергии).

Выбор метода защиты состоит в поиске оптимума по экономической целесообразности влияния на характеристики антенн, обеспечения заданного качества связи (вещания), эксплуатационных удобств и т. п.

К пассивным методам следует отнести организационные методы (в том числе защита временем и расстоянием), методы защиты с

использованием радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов.

Организационные методы защиты в зависимости от конкретных возможностей применяют «с трех сторон»: у излучателя, у защищаемого объекта (человека) и по пути распространения. Их классифицируют следующим образом:

ограничение работы станции по времени, что, как показывает практика, является вполне реальным путем защиты для многих типов излучающих устройств;

выбор рационального взаимного расположения радиотехнических средств, защищаемых объектов и естественных средств защиты;

исключение или ограничение облучения человека за счет рациональной организации труда (перераспределение времени облучения между одинаковыми исполнителями, проведение работ при неработающей станции); проведения инструктажа о правилах работ в электромагнитных полях, применения средств наглядной агитации и предупреждения с кратким перечнем основных мер предосторожности.

Наименее дорогостоящей является защита, использующая естественные экраны: существующие нежилые постройки, лесные полосы, насыпи и возвышенности. Правильный учет распространения радиоволн дает возможность сочетать защитные свойства, эстетику и гигиену, особенно, если речь идет о лесных полосах.

Методы и средства защиты удобно делить по объему (или масштабу) на *коллективные*, предполагающие защиту группы домов, жилых районов или даже целого населенного пункта, *локальные* (защита отдельных строений, квартир и помещений) и средства защиты *индивидуального пользования*.

При прочих равных условиях всегда предпочтительнее применять коллективные методы и средства, позволяющие решать задачу охраны целого жилого массива, включая людей, находящихся вне помещений. Эта система защиты допускает использование относительно простых методов контроля, обычно проще обслуживается и имеет ряд других достоинств. Между тем система коллективной защиты далеко не всегда реализуется, она нецелесообразна при защите небольших населенных пунктов, поэтому в таких случаях используют локальные методы защиты, т. е. прибегают к экранированию отдельных помещений и излучателей.

Источники ЭМИ РЧ должны размещаться в производственных помещениях с учетом недопустимости повышенного электромагнит-

ного воздействия на соседние рабочие места, помещения, здания и прилегающие территории. Допускается размещать антенны на крышах жилых, общественных и других зданий, если при этом внутри зданий и на прилегающей территории интенсивность ЭМИ РЧ не превышает предельно допустимых значений.

Проводить защиту людей от внутренних источников излучений наиболее целесообразно непосредственно в месте проникновения электромагнитной энергии из экранирующих кожухов улучшением методов радиогерметизации стыков и сочленений.

При защите помещений от внешних излучений с успехом применяются оклеивание стен специальными металлизированными обоями, засетчивание окон, применение специальных металлизированных штор и т. п.

В некоторых случаях наряду с обычными металлическими «окружающими» экранами рекомендуется применять дополнительные небольшие объемы радиопоглощающих материалов. Целесообразность применения радиопоглощающих объемов должна быть определена в каждом конкретном случае.

Широко распространены индивидуальные средства защиты (костюмы). Однако они стесняют движения работающего и несколько ухудшают гигиенические условия в «подзащитном» пространстве. Использовать костюмы рекомендуется только в некоторых случаях: для прохода через особо опасные зоны, при ремонтных работах в аварийных ситуациях, во время кратковременных настроечных и измерительных работ в антенном поле и т. п.

К активным методам защиты человека от воздействия электромагнитных полей относятся методы изменения энергетических параметров технических средств радиосвязи, радиовещания и телевидения. При применении этих методов можно управлять мощностью передатчиков, изменять характеристики направленности антенн на более «экологически чистые», изменять диаграмму направленности антенн в вертикальной плоскости путем изменения расстояния между этажами антенны. При этом резко уменьшается уровень боковых лепестков антенны и возрастает коэффициент усиления в главном направлении, что приводит к уменьшению уровней напряженности поля вблизи антенны и увеличивает зону уверенного приема радиостанции.

Защита персонала от воздействия ЭМИ РЧ осуществляется путем проведения организационных и инженерно-технических мероприятий, а также использования средств индивидуальной защиты.

К организационным мероприятиям относятся выбор рациональных режимов работы оборудования, ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМИ РЧ (защита расстоянием и временем) и т. п.

Инженерно-технические мероприятия включают рациональное размещение оборудования; использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии на рабочие места персонала (поглотители мощности, экранирование, использование минимальной необходимой мощности генератора); обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМИ РЧ.

К средствам индивидуальной защиты относятся защитные очки, щитки, шлемы, защитная одежда (комбинезоны, халаты и т. д.). Средства индивидуальной защиты применяют в случаях, когда снижение уровней ЭМИ РЧ с помощью общей защиты технически невозможно. Защитную одежду, изготовленную из материала, который содержит в своей структуре металлический провод, можно использовать только в условиях, исключающих прикосновение к открытым токоведущим частям установок.

Способ защиты в каждом конкретном случае определяется с учетом рабочего диапазона частот, характера выполняемых работ, необходимой эффективности защиты

В целях предупреждения, ранней диагностики и лечения нарушений в состоянии здоровья работники, связанные с воздействием ЭМИ РЧ, должны проходить предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в порядке, установленном соответствующим приказом Министерства здравоохранения.

7.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

Наиболее эффективным способом снижения интенсивности ЭМП является экранирование. Этот способ защиты от электромагнитных излучений использует процессы отражения и поглощения электромагнитных волн

Экранирование источников ЭМИ РЧ или рабочих мест осуществляется с помощью отражающих или поглощающих экранов (стационарных или переносных). Отражающие экраны выполняются из металлических листов, сетки, ткани с микропроводом и др. В поглощающих экранах используются специальные материалы, обеспечивающие поглощение излучения соответствующей длины волны. В зависимости от излучаемой мощности и взаимного расположения источника и рабочих мест конструктивное решение экрана может быть различным (замкнутая камера, щит, чехол, штора и т. д.).

Экраном электромагнитных полей называют конструкцию, предназначенную для ослабления электромагнитного излучения, создаваемого источниками в некоторой области пространства, не содержащей этих источников.

При испытаниях технологического, радиотехнического и СВЧ оборудования часто используют полностью экранированные помещения, стены и потолок которых покрыт металлическим листом, облицованным поглощающими материалами. Такое экранирование полностью исключает проникновение электромагнитных волн в окружающую среду. Обслуживающий персонал при этом пользуется индивидуальными средствами защиты.

Действие экрана электромагнитного излучения как линейной системы определяется несколькими характеристиками, основной из которых является эффективность экранирования $\Theta = E/E_0$ или $\Theta = H/H_0$, где E_0 , H_0 и E , H — напряженности электрического и магнитного полей в какой-либо точке экранированного пространства при наличии экрана и при отсутствии его.

Эффективность экранирования показывает, во сколько раз уменьшается напряженность поля на данном участке при экранировании источника.

Часто эффективность экранирования выражают в децибелах: $\Theta_{\text{дБ}} = 20 \lg \Theta$. Эффективность экранирования рассчитывают исходя из требований норм на уровни облучения людей. По найденному значению эффективности экранирования определяют материал и геометрические размеры экрана.

Эффективность экрана существенно зависит от характера источника поля. В свободном пространстве при $r \gg \lambda/2\pi$, где r — расстояние от источника; λ — длина волны (так называемая «дальняя зона»), E и H практически синфазны, и в этом случае говорят об электромагнитном экранировании. При $r \ll \lambda/2\pi$ имеет место так называемая «ближняя зона», в которой E и H оказываются почти в квадратуре и поля в зависимости от источника рассматриваются как квазиэлектростатические и квазимагнитостатические.

Экранирование электромагнитного поля. При нормальном падении плоской электромагнитной волны на однородный плоский бесконечный экран, изготовленный из металла, эффективность экранирования:

$$\Theta = \frac{Z_d \Delta \sigma \operatorname{Sh}(\sqrt{2d/\Delta})}{2\sqrt{2}}, \quad (7.5)$$

где Z_d — модуль импеданса воздушного диэлектрика, Ом, определяемый из табл. 7.5; σ — удельная проводимость материала экра-

на, См/м; d — толщина экрана, м; $\Delta = 1/\sqrt{\mu\mu_0\sigma\nu}$ — глубина проникновения поля в экран, м; μ — относительная магнитная проницаемость материала экрана; $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; ν — частота поля, Гц.

Таблица 7.5. Модуль импеданса воздушного диэлектрика для экранов разной формы

Поле	Сферический экран радиусом $R_{ш}$	Цилиндрический экран радиусом $R_{ц}$
Электромагнитное	120π	120π
Магнитное	$240\pi^2 R_{ш}/\lambda\sqrt{2}$	$240\pi^2 R_{ц}/\lambda$
Электрическое	$60\lambda\sqrt{2}/R_{ш}$	$60\lambda/R_{ц}$

Эффективность экранирования в первую очередь определяется экранирующими свойствами материала (табл. 7.6), видом экрана, методом его установки.

Таблица 7.6. Электрические характеристики металлов

Материал	Удельная проводимость $\sigma \times 10^{-7}$, См/м	Относительная магнитная проницаемость μ
Медь отожженная	5,7	1
Медь холоднокатаная	5,53	1
Алюминий	3,47	1
Алюминиевые сплавы	1,2...2,0	1
Латунь	1,48	1
Никель	1,14	1
Бронза	1,03	1
Олово	0,85	1
Свинец	0,46	1
Сталь нержавеющая	0,11	1
Сталь автомобильная	0,57	1000
Железо	0,96...0,15	100...1000
Пермаллой	0,17	80 000

Для практических расчетов могут быть рекомендованы следующие приближенные выражения:

$$\Theta = \frac{Z_d d \sigma}{2} \quad \text{при} \quad \frac{d}{\Delta} < 0,1; \quad (7.6)$$

$$\Theta = \frac{Z_d d \sigma \exp(d/\Delta)}{4\sqrt{2}} \quad \text{при} \quad \frac{d}{\Delta} > 0,1, \quad (7.7)$$

Пример 7.2. Определить эффективность экранирования электромагнитного защитного экрана из отожженной меди толщиной 0,08 мм (удельная проводимость среды $\sigma = 5,7 \cdot 10^7$ См/м, магнитная проницаемость среды $\mu = 1\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), обеспечивающего защиту от электромагнитного поля частотой $\nu = 300$ МГц.

Решение. Эффективность экранирования можно определить по формулам (7.6) и (7.7):

$$\Theta = \frac{Z_d d \sigma}{2} \quad \text{при} \quad \frac{d}{\Delta} < 0,1;$$

$$\Theta = \frac{Z_d \Delta \sigma \exp(d/\Delta)}{4\sqrt{2}} \quad \text{при} \quad \frac{d}{\Delta} > 0,1.$$

Определим глубину проникновения поля в экран:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma \nu}} = \frac{1}{\sqrt{3,14 \cdot 1 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 5,7 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^8}} = 0,385 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

Определим отношение

$$\frac{d}{\Delta} = \frac{8 \cdot 10^{-5}}{0,385 \cdot 10^{-5}} = 20,7.$$

Эффективность экранирования определим по формуле (7.7):

$$\Theta = \frac{Z_d \Delta \sigma \exp(d/\Delta)}{4\sqrt{2}} = \frac{120\pi 0,385 \cdot 10^{-5} 5,7 \cdot 10^7 \exp(20,7)}{4\sqrt{2}} = 1,46 \cdot 10^{13}.$$

Выразим эффективность экранирования в децибелах:

$$\Theta_{\text{дБ}} = 20 \lg \Theta = 20 \lg (1,46 \cdot 10^{13}) = 20 \cdot 13 \cdot 0,165 = 43 \text{ дБ}.$$

В области высоких частот эффективность экранирования магнитными металлами любого из рассматриваемых видов полей оказывается выше эффективности экранирования немагнитными ме-

таллами. Вместе с тем применение магнитных металлов приводит к большим электрическим потерям в экранируемой цепи.

При расчете экранных конструкций произвольной формы можно пользоваться формулами экранирования плоского, сферического и цилиндрического экранов, приводя исходные геометрические конструкции с некоторыми допущениями к эквивалентным экранам идеальной формы.

Экран, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием, при расчетах следует заменять цилиндрическим. При этом диаметр цилиндра принимается равным стороне квадрата. Экран в виде камеры с соразмерными сторонами следует заменять эквивалентным шаровым экраном радиусом $R_{ш} = \sqrt[3]{3V/4\pi}$, м, где V — объем камеры, м³.

Негерметичные экраны. Эффективность экранирования замкнутого экрана может быть сколь угодно высокой при соответствующем выборе материала и его толщины. Однако на практике экраны не бывают полностью сплошными из-за наличия крышек, швов, разъемов, смотровых окон и т. д., образующих дополнительные каналы проникновения электромагнитного поля.

Эффективность негерметичного экрана

$$\Theta = \Theta_3 \Theta_{\text{отв}} / (\Theta_3 + \Theta_{\text{отв}}),$$

где Θ_3 — эффективность замкнутого экрана из того же материала с той же толщиной стенок и той же формы, что и реальный экран; $\Theta_{\text{отв}} = 0,25(S_{\text{экр}}/S_{\text{отв}})^{3/2}$ — эффективность экрана той же формы, с теми же отверстиями и щелями и с той же толщиной стенок, что и реальный экран, но изготовленного из идеально проводящего материала; $S_{\text{экр}}$ и $S_{\text{отв}}$ — полная площадь поверхности экрана и эквивалентная площадь отверстия, м²; $S_{\text{отв}} = S_0 \alpha(b/a)$; S_0 — фактическая площадь отверстия, м; $\alpha(b/a)$ — функция отношения размеров отверстия (рис. 7.2); b и a — соответственно больший и меньший размеры отверстия, м, причем предполагается, что вихревые токи в экране протекают в направлении размера a .

Если количество отверстий n больше одного, то эффективность экранирования определяется из выражения

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{1}{\Theta_3} + \dots + \frac{1}{\Theta_n},$$

где $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_n$ — эффективности экранирования, определенные для экрана с каждым отверстием в отдельности.

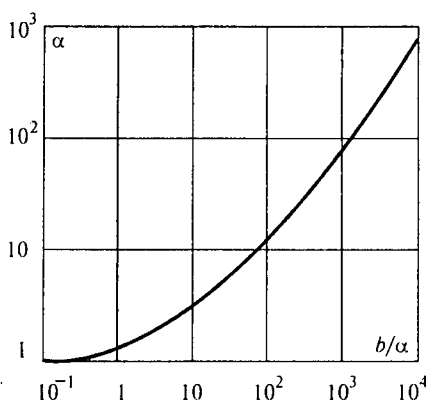


Рис. 7.2. Функция $\alpha(b/a)$

Если в экране n одинаковых отверстий, то эффективность экранирования определяется как $\Theta = \Theta_3 \Theta_{\text{отв}} / [n(\Theta_3 + \Theta_{\text{отв}})]$.

Материалы для электромагнитных экранов. Для металлических листов расчет эффективности экранирования производится по приведенным формулам.

Преимуществами *проволочных сеток* по сравнению со сплошными металлическими листами являются сниженные массогабаритные параметры; улучшенный теплообмен экранированной камеры с внешней средой; возможность визуального наблюдения за индикаторами установок.

Эффективность плоского экрана из сетки рассчитывают следующим образом:

$$\Theta_c = \frac{\lambda}{2S \left[\ln(2S/D) - 1, 2 + \lambda R \left[(\alpha(u) + j\beta(u)) / Z_n \right] \right]},$$

где D — диаметр проволоки, м; S — шаг сетки, м; $R = 1/[\pi\sigma(0,5D)^2]$ — сопротивление 1 м одной проволоки постоянному току, Ом; σ — удельная проводимость материала проволоки, См/м; $u = D/(\Delta/\sqrt{2})$;

$$\alpha(u) = \beta(u) = u/(2\sqrt{2}) \quad \text{при} \quad u > 50;$$

$$\alpha(u) = 0,25(u\sqrt{2} + 1), \quad \beta(u) = u/(2\sqrt{2}) \quad \text{при} \quad 50 > u > 6;$$

$$\alpha(u) = 0,233u + 1, \quad \beta(u) = 0,35u \quad \text{при} \quad u < 6.$$

Для сетчатых экранов справедливо следующее:

с увеличением частоты уменьшается эффективность экранирования сеток;

эффективность экранирования медных сеток при прочих равных условиях выше, чем стальных, особенно для частот до 1 МГц;

для частот ниже 50 кГц более эффективны редкие сетки из толстой проволоки, для более высоких частот — густые сетки из более тонкой проволоки.

Эффективность экранирования сплошного экрана с отверстиями, затянутыми сеткой, можно приближенно рассчитать по формуле $\Theta_c = \Theta \sqrt{N}$, где Θ — эффективность экранирования, определенная по формуле для экрана с отверстиями; N — количество ячеек сетки, уместяющееся на площади отверстия.

Если установленная на отверстиях сетка не обеспечивает требуемой эффективности экранирования, а заменить ее более густой сеткой невозможно, то следует применять двухслойные сетки. В этом случае вычисленное значение эффективности экранирования Θ_c домножается на $\Theta_c^* = 4\pi D_{12}/\lambda$, где D_{12} — расстояние между слоями сетки, м; λ — длина волны, м.

Радиозащитное стекло применяют для изготовления смотровых отверстий и очков как средств индивидуальной защиты (табл. 7.7).

Таблица 7.7. Материалы для эластичных экранов

Материал	ГОСТ, ТУ	Толщина, мм	Ослабление, дБ
Фольга алюминиевая	ГОСТ 618—73	0,08	До 80 (30 МГц...40 ГГц)
Фольга медная	ГОСТ 5638—75	0,08	До 80 (30 МГц...40 ГГц)
Радиозащитное стекло	ТУ 21-54-41—73	6	20...40 (30 МГц...30 ГГц)
Ткань хлопчатобумажная с микропроводом	ОСТ 17-28—70	—	20...40 (30 МГц...30 ГГц)
Ткань металлизированная «Восход»	—	—	40...65 (10 кГц...30 ГГц)
Ткань полиамидная с вплетенной проволокой	ТУ6-06-С202—90	—	15...40 (300 кГц...30 МГц)

Эластичные экраны представляют собой либо материалы из фольги, наклеенной на ткань, либо радиозащитные ткани, либо специальные поглощающие материалы (резина, поролон). Применяются для изготовления эластичных экранов, халатов и фартуков как средств индивидуальной защиты (см. табл. 7.7).

Экранирующие свойства некоторых *строительных материалов* приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8. Экранирующие свойства некоторых строительных материалов, дБ

Материал или конструкция	Сантиметровые волны	Метровые волны
Кирпичная стена толщиной 70 см	20	12
Внутренняя оштукатуренная стена толщиной 15 см	10...12	2...2,5
Сосновая доска толщиной 30 мм	2...2,5	1...1,5
Оконное стекло толщиной 3 мм	1...3	—
Окно с целой одинарной рамой	4...6	2...4
Окно с двойной рамой	6...8	3...5

Расчет экранирующей защиты от ЭМП осуществляется в таком порядке:

определение параметров источника ЭМП, его характеристики, назначения, частоты излучения;

определение допустимых норм ЭМП;

определение способа защиты от ЭМП в зависимости от размещения источника излучения, расположения рабочего места или жилой территории;

определение типа экрана и его возможной эффективности;

выбор или расчет устройства защитного заземления;

схема экрана, его размещение.

Эффективность экранирования помещений (кабин) в заданном диапазоне частот при $\lambda > 2\pi R$ рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{э}} &= \Theta_{\text{пл}} 0,21\lambda/R \text{ (раз) или} \\ \Theta_{\text{э}} &= 20 \lg \Theta_{\text{пл}} + 20 \lg (0,21\lambda/R), \text{ дБ;} \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{м}} &= \Theta_{\text{пл}} 4,2R/\lambda \text{ (раз) или} \\ \Theta_{\text{м}} &= 20 \lg \Theta_{\text{пл}} + 20 \lg (4,2R/\lambda), \text{ дБ,} \end{aligned} \quad (7.9)$$

где $\mathfrak{E}_3$ и $\mathfrak{E}_m$ — эффективность экранирования для электрической и магнитной составляющих ЭМП соответственно; $\mathfrak{E}_{пл}$ — эффективность экранирования полупространства от падающей плоской волны бесконечным экраном $\mathfrak{E}_{пл} = \mathfrak{E}_n + \mathfrak{E}_{от}$; $\mathfrak{E}_n$ — эффективность экранирования, полученная за счет поглощения энергии в толще экрана; $\mathfrak{E}_{от}$ — эффективность экранирования, полученная за счет отражения энергии от экрана; λ — длина волны, м; $R = \sqrt{3V/4\pi}$ —

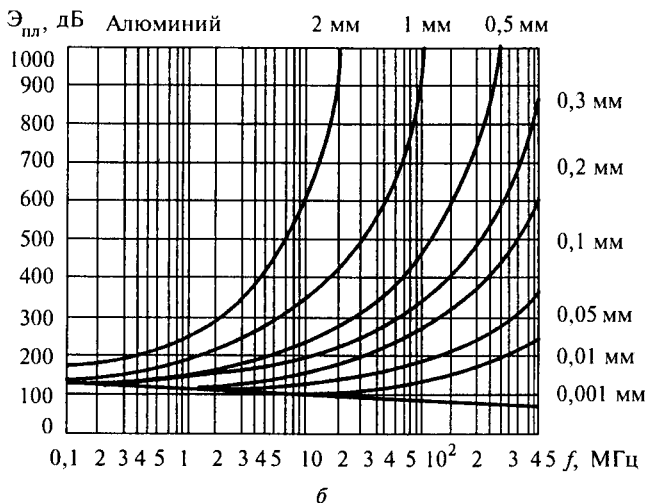
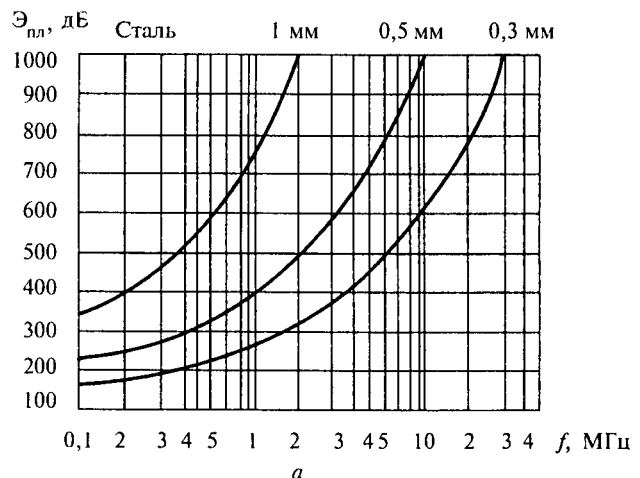


Рис. 7.3. Зависимость $\mathfrak{E}_{пл}$ от частоты:

a — для стали; b — для алюминия

эквивалентный радиус экрана, м, где $V = a \times b \times c$; a, b, c — линейные размеры экрана, м.

Формулы (7.8) и (7.9) могут быть представлены в виде

$$\Theta = \Theta_{\text{пл}} \pm \Theta_{\text{доб}}, \quad (7.10)$$

где $\Theta_{\text{доб}} = 20 \lg (0,21\lambda/R)$.

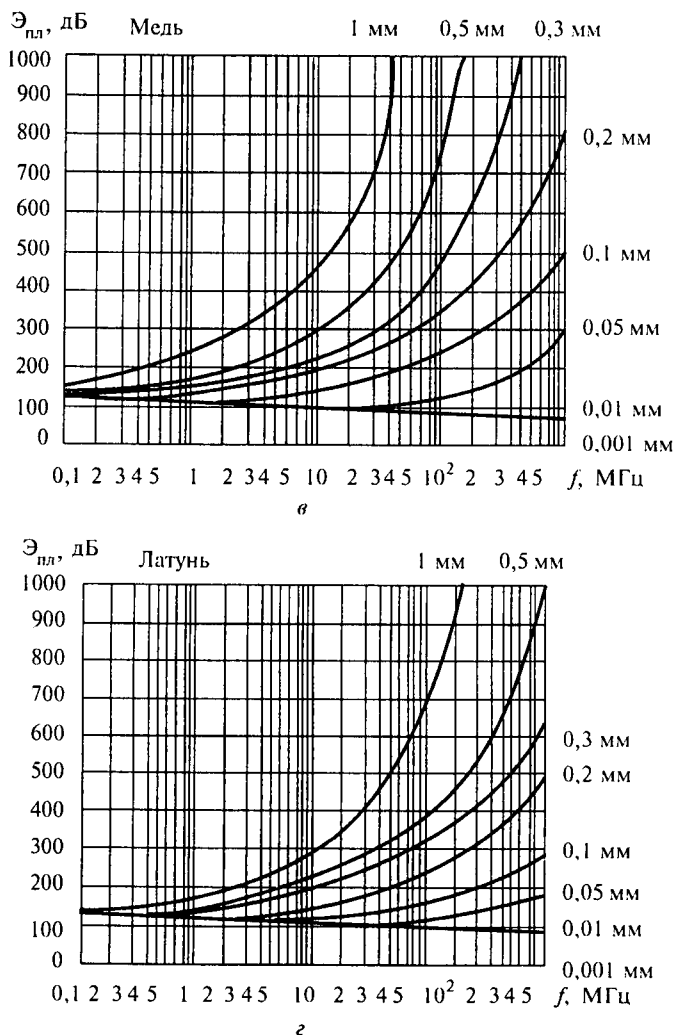


Рис. 7.3. Зависимость $\Theta_{\text{пл}}$ от частоты:

а — для меди; б — для латуни

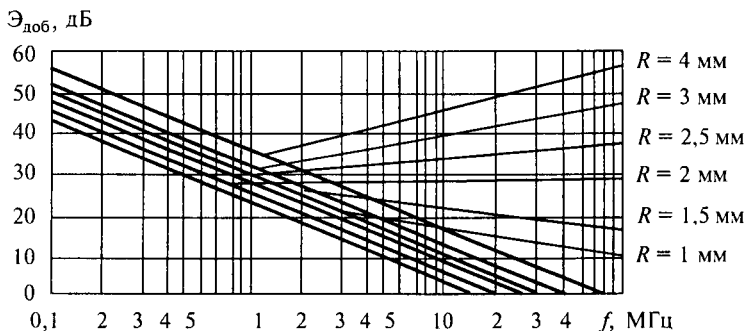


Рис. 7.4. Зависимость $\Theta_{доб}$ от частоты

Знак плюс в формуле (7.10) берется, если вычисляется Θ_3 , и минус, если вычисляется Θ_m .

Зависимость $\Theta_{пл}$ от частоты для разных металлов при различной их толщине показана на рис. 7.3, а значения $\Theta_{доб}$ для экранированных помещений с наиболее часто встречающимся эквивалентным радиусом R для различных частот могут быть получены из кривых рис. 7.4.

Эффективность экранирования при $\lambda < 2\pi R$ определяется по формуле

$$\Theta = \Theta_{пл}. \quad (7.11)$$

Для случаев, когда $\lambda = 2\pi R$, в экранированных помещениях могут наблюдаться резонансные явления. Эффективность экранирования может изменяться от $\Theta_1 = \Theta_n = 8,7d/\delta$, дБ, до величины $\Theta_2 = \Theta_{пл}$, где Θ_n — эффективность экрана, определяемая потерями только за счет поглощения (без учета отражения); d — толщина экрана; δ — глубина скин-слоя.

Значения Θ_n для различных материалов толщиной 1 мм в зависимости от частоты приведены в табл. 7.9.

Для любой другой толщины d_i (мм) $\Theta_{ni} = \Theta_n d_i$, дБ.

Самая низкая резонансная частота, МГц, в зависимости от размеров помещений может быть определена из формулы

$$f_{p\min} = 150 \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}, \quad (7.12)$$

или по кривым графика (рис. 7.5).

Резонанс должен определяться для самой низкой частоты, так как эффективность экранирования за счет поглощения растет с увеличением частоты согласно табл. 7.10.

Таблица 7.9. Эффективность экранирования материалов

Частота, МГц	Значение $\mathcal{E}_n$, раз, при $d = 1$ мм				
	Сталь	Медь	Алюминий	Цинк	Латунь
0,1	24	41	30	21	19
0,3	400	72	52	36	33
1,0	670	130	94	35	60
3,0	1100	230	160	110	100
10,0	1900	410	300	210	190
30,0	3000	720	520	360	330
100,0	6000	1300	940	650	600
300,0	7400	2400	1600	1100	1000
1000,0	12000	4100	3000	2100	1900

Явление резонанса следует учитывать при использовании «электрически тонких материалов», так как из кривых на рис. 7.5 для наиболее часто встречающихся размеров экранов можно заключить, что резонансы могут иметь место на частотах 30...100 МГц, а $\mathcal{E}_n$ для этих частот при толщинах экрана 1 мм не бывает ниже 300 дБ.

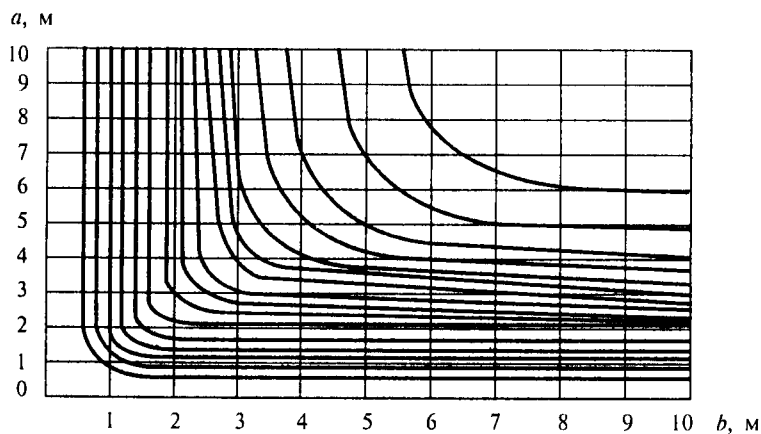


Рис. 7.5. Зависимость резонансной частоты от размеров помещения

**Таблица 7.10. Рекомендации по выбору размеров
предельных волноводов**

Диапазон частот (длин волн)	Размер стороны квадратного, широкой стороны прямоугольного или диаметра круглого волно- вода, м	Ослабление излучения μ , дБ/см, волновода	
		квадратного или прямоугольного	круглого
До 20 МГц ($\lambda \geq 15$ м)	$a \leq \lambda_{\min}/20$; $D \leq \lambda_{\min}/17$	27,3/ a	32/ D
От 20 до 150 МГц ($\lambda = 2 \dots 15$ м)	$a \leq \lambda_{\min}/10$; $D \leq \lambda_{\min}/8,5$	26,6/ a	31,2/ D
От 150 до 1000 МГц ($\lambda = 30 \dots 200$ см)	$a \leq \lambda_{\min}/5$; $D \leq \lambda_{\min}/4,3$	25/ a	29,3/ D
От 1000 до 10 000 МГц ($\lambda = 3 \dots 30$ см)	$a \leq \lambda_{\min}/3,5$; $D \leq \lambda_{\min}/3$	21,5/ a	25,2/ D

Материал для экранирования необходимо выбирать так, чтобы были обеспечены:

заданное значение ослабления ЭМП или его составляющих в рабочем диапазоне частот;

устойчивость против коррозии и механическая прочность;

экономическая целесообразность;

возможность практического выполнения выбранного варианта экрана.

Тонколистовые и фольгированные материалы толщиной от 0,01 до 0,05 мм могут быть применены для экранирования электрической составляющей ЭМП. Магнитную составляющую эти материалы ослабляют недостаточно. Кроме того, на частотах резонанса эффективность экранирования помещения этими материалами может оказаться недостаточной.

Эффективность экрана из тонколистовых материалов должна быть проверена по формуле (7.10) или по рис. 7.3—7.4. Исходя из размеров экрана по формуле (7.12) или рис. 7.5 следует рассчитать резонансную частоту f_p , а по табл. 7.10 определить эффективность экранирования на резонансной частоте при толщине материала экрана, равной 1 мм.

Выражение для определения толщины металлического листа, обеспечивающего заданное ослабление, имеет вид

$$\delta = \frac{|L|}{15,4\sqrt{\mu\sigma f}} \quad (7.13)$$

(здесь взято абсолютное значение величины ослабления L). По этой формуле, например, минимальная толщина алюминиевого экрана ($\mu = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м, $\sigma = 3,54 \cdot 10^7$ 1/Ом·м), обеспечивающая ослабление излучения с частотой $f = 3 \cdot 10^9$ Гц на $L = 30$ дБ, равна $5,3 \cdot 10^{-3}$ мм.

Световые, смотровые и вентиляционные окна и отверстия, а также отверстия для ввода в экранируемое пространство электрических кабелей и проводов и вывода органов дистанционного управления и другие могут существенно уменьшить экранирующую способность экрана. Степень этого уменьшения зависит от числа отверстий и от соотношения между их размерами и длиной волны экранируемого излучения.

Световые, смотровые и вентиляционные отверстия могут быть заполнены патрубками с сетками на обоих концах или патрубками в виде отдельных отрезков труб или сотовых конструкций. Применение труб для этой цели основано на закономерностях распространения радиоволн в волноводах. Каждый волновод в зависимости от формы и размеров его поперечного сечения характеризуется определенным типом основной волны и определенной длиной критической волны. Критической длиной волны называется наибольшая длина волны, которая может без затухания распространяться по волноводу. Основной волной называется волна такого типа, для которой критическая длина в данном волноводе является наибольшей из длин волн всех типов. Наиболее распространены прямоугольные и в меньшей степени круглые волноводы.

Для прямоугольного волновода критическая длина волны $\lambda_{кр} = 2a$, где a — размер большей стороны поперечного сечения волновода; для круглого волновода $\lambda_{кр} = 3,413 R$, где R — радиус волновода.

Волноводы, поперечные размеры которых равны или меньше размеров, соответствующих критическим длинам волн, называются предельными. Ослабление излучения на 1 см длины предельного волновода (коэффициент линейного ослабления) можно определять по следующим приближенным формулам:

в общем случае

$$\mu = \frac{17,2\pi\sqrt{\epsilon_{отн}}}{\lambda_{кр}}, \quad (7.14)$$

для волновода, заполненного воздухом,

$$\mu = \frac{17,2\pi}{\lambda_{кр}}, \quad (7.15)$$

где $\epsilon_{отн}$ — относительная диэлектрическая постоянная диэлектрика, заполняющего волновод.

Сотовая конструкция патрубка из нескольких предельных волноводов обладает большей эффективностью экранирования, чем суммарная эффективность от всех этих волноводов, рассматриваемых отдельно. Дополнительное ослабление излучения в таких случаях можно вычислять, пользуясь следующими формулами:

при *квадратных патрубках*

$$L = 20 \lg \sqrt{n_1}, \quad (7.16)$$

при *прямоугольных патрубках*

$$L = 20 \lg \sqrt{n_2},$$

где n_1 и n_2 — числа, показывающие, сколько раз длинная сторона сечения соты волновода укладывается соответственно на стороне квадратного и широкой стороне прямоугольного патрубка. Дополнительное ослабление сотовым патрубком должно вычитаться из заданного ослабления при определении по величине μ минимально необходимой длины предельных волноводов — сот.

Пример 7.3. В лабораторном помещении предполагается смонтировать установку для определения частоты электромагнитных колебаний, которые генерируются проверяемыми передатчиками.

Средняя мощность излучения такого передатчика $P = 20$ Вт в диапазоне длин волн около 3 см (частота f около 10^{10} Гц), коэффициент усиления антенны $K_G = 1000$. В процессе проверки главный максимум излучения может быть длительно направлен на отдельные рабочие места, расположенные на расстоянии 2 м и более. Для защиты персонала антенна должна быть ограждена радионепроницаемым кожухом с поглощающим покрытием облучаемых участков внутренней поверхности.

Определить минимальную толщину листа из алюминиевого сплава, при которой проникающее через кожух излучение по интенсивности не превышает допустимое при полной рабочей смене. Вычислить величину нахлеста листов кожуха, расстояние между точками сварки и размеры квадратного патрубка с квадратными сотами для вентиляции во внутриэкранном пространстве. Подобрать соответствующий поглощающий материал.

Решение. На расстоянии 2 м от антенны максимальная плотность потока мощности по формуле (7.4) $J_{\max} = 8 \cdot 10^4$ мкВт/см² при предельно

допустимой $J_{0\text{ доп}} = 10 \text{ мкВт/см}^2$. Необходимо ослабить излучение в $8 \cdot 10^3$ раз, т. е. на $L = 10 \lg J_{\text{max}}/J_0 = 39 \text{ дБ}$. По формуле (7.13) такое ослабление обеспечивается при толщине экрана $\delta = 0,004 \text{ мм}$. Такой толщины экран был бы непрочен и неудобен в пользовании, поэтому выбираем конструктивно более подходящий лист толщиной $\delta = 0,3 \dots 0,5 \text{ мм}$.

Принимаем размер стороны квадрата сечения отдельной соты вентиляционного патрубка $a = 0,8 \text{ см}$, отношение стороны сечения патрубка к стороне сечения соты $n_1 = 16$. Дополнительное ослабление, создаваемое сотовой конструкцией по сравнению с одиночной трубкой, по (7.16) $L_{\text{доп}} = 6 \text{ дБ}$. Следовательно, основное ослабление должно быть не менее 33 дБ . По табл. 7.10 и формуле (7.15) находим, что 1 см такого патрубка дает ослабление $\mu = 27 \text{ дБ}$, так что патрубок длиной $1,25 \text{ см}$ обеспечивает заданное ослабление.

Принимаем окончательную длину патрубка исходя из иных соображений, но не менее $1,25 \text{ см}$. Величина нахлеста листов экрана также не должна быть меньше $1,25 \text{ см}$.

При экранировании рабочих контуров электротермических установок необходимо учитывать их типы и назначение. В установках для индукционного нагрева экранированию подлежат подводящий фидер и индукционная катушка (индуктор плавильной печи, нагревательный трансформатор) (рис. 7.6, а). В установках для диэлектрического нагрева экранируются подводящий фидер и рабочий конденсатор (рис. 7.6, б).

Эффективность экранирования Θ , т. е. величина, показывающая, во сколько раз интенсивность поля на данном месте уменьшилась в результате экранирования источника излучения, может быть приближенно определена по формуле

$$\Theta = e^{3,6l/D}, \quad (7.17)$$

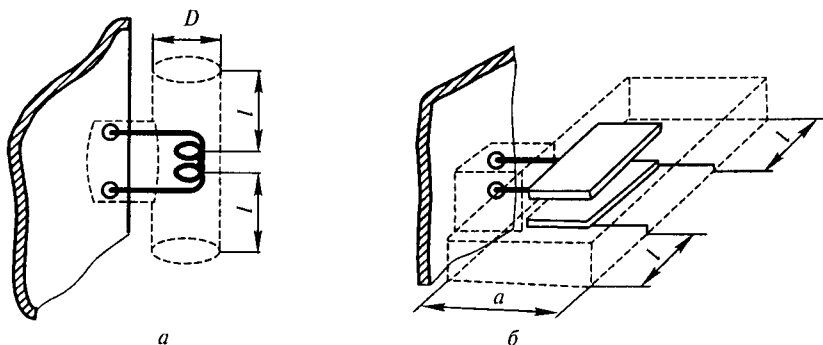


Рис. 7.6. Экранирование волноводными фильтрами индуктора (а) и конденсатора (б)

где l — расстояние по оси индуктора от его крайних витков до краев цилиндра; D — диаметр цилиндра.

Из формулы видно, что для достижения лучшей эффективности экранирования отношение l к D должно быть возможно большим.

При диэлектрическом нагреве рабочие конденсаторы, как правило, помещают в специальные камеры, которые следует экранировать. Если же рабочий конденсатор должен находиться в помещении открыто, его экранируют аналогично нагревательному индуктору — прямоугольной полый трубой из тех же материалов (см. рис. 7.6, б). Расстояние между трубой и пластинами конденсатора должно быть не менее расстояния между пластинами. Эффективность такого экранирования приближенно определяют по формуле

$$\Theta = e^{\pi l/a}, \quad (7.18)$$

где l — расстояние от концов пластин конденсатора до концов трубы; a — ширина трубы.

Пример 7.4. Измерения показали, что рабочий конденсатор электро-термической установки создает вокруг себя электрическое поле, напряженность которого на рабочем месте на расстоянии 0,3 м равна 45 В/м. Рабочая частота установки $f = 3,5 \cdot 10^7$ Гц. Толщина конденсатора $\delta = 5$ см, размеры пластин 15×40 см.

Определить длину и ширину прямоугольного трубчатого экрана для конденсатора, при которых напряженность поля не превышает допустимой величины.

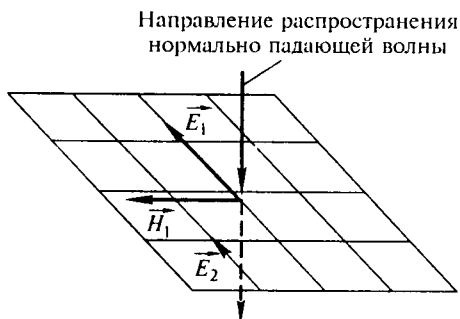
Решение. Поскольку $E_{\text{доп}} = 5$ В/м, то необходимая эффективность экранирования $\Theta = E_{\text{н}}/E_{\text{доп}} = 45/5 = 9$. Отсюда отношение l/a по (7.18) должно быть: $l/a = \ln \Theta/\pi = 2,3 \lg 9/3,14 = 0,7$.

Ширина трубы a должна быть не менее тройной ширины конденсатора, т. е. $a \geq 3 \cdot 15 \geq 45$ см, высота — не менее тройной его высоты, т. е. $h \geq 3 \cdot \delta = 3 \cdot 5 \geq 15$ см. Размер l трубы должен быть не менее $0,7a$, т. е. $l \geq 0,7 \cdot 45 \geq 31,5$ см, а общая длина трубы — не менее $L = 2l + 40 = 2 \cdot 31,5 + 40 = 103$ см. Таким образом, минимальные размеры трубы-экрана равны $103 \times 45 \times 15$ см.

На открытых территориях, расположенных в зонах с повышенными уровнями ЭМП, применяют экранирующие устройства в виде железобетонных заборов, экранирующих сеток, высоких деревьев и т. п. С этой целью для снижения уровня ЭМП промышленных источников используют стандартизированные средства в соответствии с ГОСТ 12.1.006—84.

При необходимости защиты общественных и производственных зданий от ЭМИ РЧ ограждающие конструкции и кровли выполняют из материалов с высокими радиоэкранирующими свойствами

Рис. 7.7. Нормальное падение волны на сетку



(железобетон и др.) или покрывают ограждающие конструкции заземленной металлической сеткой (табл. 7.11).

Но через сетку проникает гораздо больше энергии излучения, чем через сплошной лист. Ослабление излучения сетками при линейной поляризации волн можно вычислять по следующим формулам:

1) при нормальном падении волны и векторе $\vec{E}$, параллельном проволокам сетки одного из направлений (рис. 7.7),

$$L = 10 \lg \frac{4 \left[\frac{d}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r_0} \right) \right]^2}{1 + 4 \left[\frac{d}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r_0} \right) \right]^2}, \quad (7.19)$$

где $\vec{E}_1$ и $\vec{H}_1$ — векторы направленностей полей падающей волны; $\vec{E}_2$ — вектор напряженности электрического поля прошедшей волны;

2) при наклонном падении волны и векторе $\vec{E}$, остающемся в процессе изменения угла падения параллельным проволокам сетки одного из направлений (рис. 7.8),

$$L = 10 \lg \frac{4 \left[\frac{d \cos \beta}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r_0} \right) \right]^2}{1 + 4 \left[\frac{d \cos \beta}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r_0} \right) \right]^2}; \quad (7.20)$$

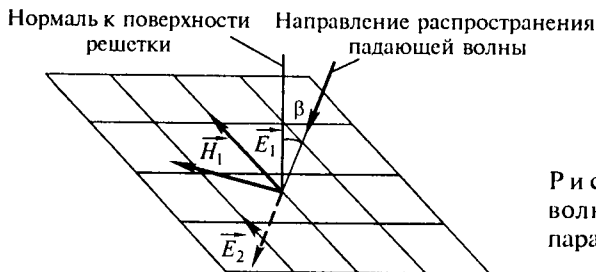


Рис. 7.8. Наклонное падение волны на сетку, вектор $\vec{E}_1$ параллелен проволокам одного из направлений

Таблица 7.11. Экранирующая способность некоторых

Материал	Номер	Шаг, мм	Диаметр проволок, мм	Ослабление			
				3,2		6,3	
				парал. поляриз.	перпен. поляриз.	парал. поляриз.	перпен. поляриз.
Латунь (ГОСТ 3584—53)	01	0,17	0,07	> 40	> 40	> 40	> 40
	02	0,33	0,13				
	04	0,55	0,15				
	05	0,72	0,22	38...40			
	08	1,1	0,30	35...40	35...28		
	09	1,25	0,35	36...40	36...30		
	1	1,35	0,35	34...40	34...26		
	1,25	1,65	0,40	30...40	30...23		
	2,0	2,5	0,50	24...30	24...20	30...36	30...25
	2,6	3,1	0,50	19...25	19...15	25...31	25...19
Сталь (ГОСТ 3826—47)	1,2	1,4	0,35	29...39	29...25	39...46	
	1,4	1,5	0,35	27...37	27...22	36...42	
	1,8	1,8	0,35	25...31	25...21	31...37	
	2,5	2,3	0,5	25...31	25...21	31...37	31...27
	3,2	3,45	0,5	15...21	15...12	21...27	21...18
	3,2	4,3	0,9	19...25	19...16	24...30	24...21
	3,2	4,35	1,1	24...30	24...22	30...36	30...27
	5	5,7	0,7	9...12	9...6	15...18	15...12
	5	6,4	1,4	17...22	17...13	20...26	20...16
	8	8,7	0,7	4,5...9	4,5...3	10...15	10...8
	10	10,7	0,7			8...14	8...6
	14	15,4	1,4			5,5...10	5,5...3,5
	20	21,5	1,4			3,5...7	3,5...2,5

Примечания: 1. Слова «параллельная поляризация» и «перпендикулярная поляризация» означают, что плоскость поляризации падающей волны (плоскость вектора E) при изменении угла падения остается соответ-

тканых сеток при углах падения радиоволн от 0 до 60°

потока мощности, дБ, при длине волны, см									
10,6		35,0		50,0		70,0		100,0	
парал. поляр.	перпен. поляр.	парал. поляр.	перпен. поляр.	парал. поляр.	перпен. поляр.	парал. поляр.	перпен. поляр.	парал. поляр.	перпен. поляр.
> 40	> 40								
35...41	35...29								
30...36	30...23								
> 40									
> 40									
36...42									
35...41	35...31								
26...32	26...20								
29...36	29...25	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40
34...40	34...30	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40
20...22	20...17	30...33	30...33	33...36	33...24	36...39	36...27	39...42	39...32
27...33	27...23	37...43	37...43	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40	> 40
13...19	13...10	21...29	21...29	26...32	26...20	30...35	30...20	32...38	32...21
11...17	11...8,5	21...28	21...28	25...31	25...20	29...35	29...20	31...37	31...21
9...16	9...6,5	19...25	19...25	22...28	22...17	26...31	26...20	28...34	28...20
5,5...10	5,5...4	15...20	15...20	17...23	17...13	19...26	19...13	23...30	23...13

ственно параллельной и перпендикулярной проволокам сетки одного из направлений. 2. В интервалах величин ослабления первое число относится к углу падения 0, второе — 60°.

3) при наклонном падении волны, векторе $\vec{E}$, перпендикулярном проволокам сетки одного из направлений, и векторе $\vec{H}$, остающемся в процессе изменения угла падения параллельным плоскости сетки (рис. 7.9):

$$L = 10 \lg \frac{(1 - \cos \beta)^2 + 4 \left[d/\lambda \ln(d/2\pi r_0) \right]^2}{1 + 4 \left[d/\lambda \ln(d/2\pi r_0) \right]^2}, \quad (7.21)$$

где β — угол падения волны на сетку; d — расстояние между соседними проволоками сетки (шаг сетки), мм; r_0 — радиус проволоки, мм.

Формулы (7.19)—(7.21) действительны при соблюдении следующих условий:

отношение шага сетки к длине волны должно отвечать неравенству $d/\lambda < 1$;

отношение радиуса проволоки к длине волны должно отвечать неравенству $r_0/\lambda < 0,04$;

отношение радиуса проволоки к шагу сетки должно отвечать неравенству $r_0/d < 0,1$;

сетка должна находиться в волновой зоне облучающей антенны;

длина и ширина плоского сетчатого экрана должны превышать длину волны более чем в 5 раз.

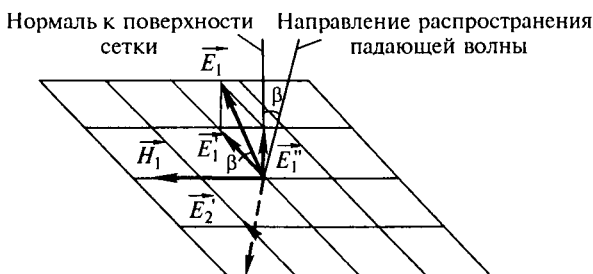


Рис. 7.9. Наклонное падение волны на сетку; вектор $\vec{H}_1$ параллелен плоскости сетки, вектор $\vec{E}_1$ перпендикулярен проволокам одного из направлений; $\vec{E}_1'$ — составляющая вектора, параллельная проволокам одного из направлений, $\vec{E}_1''$ — составляющая вектора $\vec{E}_1$, перпендикулярная плоскости сетки; $\vec{E}_2$ — вектор напряженности электрического поля прошедшей волны

Пример 7.5. На аэродроме с травяным покрытием высотой 10 см для дальнего обнаружения самолетов используется радиолокационная станция, имеющая следующие характеристики излучения: импульсная мощность излучения $P_{\text{и}} = 500$ кВт, длительность импульса $\tau = 2,5$ мкс, частота повторения импульсов $f = 400$ Гц, длина волны $\lambda = 6$ см. Отражатель антенны параболический с максимальным размером по вертикали $2R = 3$ м. Коэффициент усиления антенны $K_G = 20000$, ширина диаграммы направленности по половинной мощности в вертикальной плоскости $\theta_{0,5\text{в}} = 4^\circ$. Центр антенны находится на высоте $h_A = 3$ м от земли. При наибольшем наклоне антенны к земле главный максимум ее излучения находится под углом $\alpha = 0,5^\circ$. На расстоянии $r = 400$ м от станции располагается двухэтажное служебное здание длиной 30 м, высота его стен 5 м, главный фасад обращен к станции. Местность, где расположена станция, на $\Delta H = 2$ м выше местности в районе здания. Максимальная плотность потока мощности на расстоянии 400 м от станции $J_{\text{max}} = 500$ мкВт/см².

Подобрать по шагу и диаметру проволоки металлическую сетку для экрана, защищающего служебное здание от излучения РЛС. Излучение должно ослабляться до $J \leq J_{\text{доп}} = 10$ мкВт/см². Экран в виде плоской стенки будет установлен между станцией и зданием на расстоянии $r_s = 50$ м от последнего перпендикулярно излучению. Вычислить размеры экрана с учетом влияния краевой дифракции.

Решение. Наибольшая интенсивность излучения выявлена на рабочих местах у окон второго этажа здания, $J_2 = 214$ мкВт/см². Следовательно, необходимо ослабить излучение по крайней мере в 22 раза, или на 14 дБ. По табл. 7.11 предварительно подбираем стальную тканую сетку № 3,2, у которой шаг $d = 3,45$ мм, радиус проволоки $r_0 = 0,25$ мм. Подставляя известные величины в формулу (7.19), получаем ослабление в 28 раз, т. е. вполне достаточное.

Без учета дифракции длина и высота экрана были бы в такой же пропорции с длиной и высотой здания, как отношение расстояния от экрана до станции к расстоянию от здания до станции, равное 0,875. Следовательно, длина экрана равна 26,3, а высота 4,4 м.

При проектировании жилых и административных зданий, расположенных в зонах действия ЭМП, следует принимать во внимание экранирующую способность S_s (дБ) самих строительных конструкций:

$$S_s = 20 \lg \frac{J_{S0}}{J_{Sn}}, \quad (7.22)$$

где J_{S0} , J_{Sn} — соответственно интенсивности падающей и прошедшей электромагнитной волны.

Экстинкция (ослабление) электромагнитного излучения строительными конструкциями приведена в табл. 7.12 (для длин волн 3 и 10 см).

**Таблица 7.12. Ослабление электромагнитного излучения
строительными конструкциями**

Материалы и элементы конструкция	Экстинкция, дБ	
	$\lambda = 3 \text{ см}$	$\lambda = 10 \text{ см}$
Кирпичная стена толщиной 70 см	21	16
Междуэтажное перекрытие	22	2
Оштукатуренная стена здания	12	8
Окна с двойными рамами	18	7

Напряженность электрического поля в зданиях, оставляемых в санитарно-защитных зонах ВЛ напряжением 330...500 кВ и имеющих неметаллическую кровлю, может быть снижена установкой заземленной металлической сетки на крыше этих зданий (заземлять сетку нужно в двух местах). В табл. 7.13 приведены значения ослабления (в раз) в зависимости от длины волны и шага такой сетки.

**Таблица 7.13. Экранирующее действие
сетки из медных проводов диаметром 2 мм**

Длина волны, м	Значение ослабления (раз) при шаге сетки, м					
	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
16	1,868	2,29	3,1	3,79	4,92	6,97
20	2,21	2,77	3,8	4,68	6,1	8,68
30	3,4	4,37	6,12	7,6	9,59	14,27
50	5,03	6,54	9,21	11,47	15,1	21,59

Металлические кровли должны быть заземлены не менее чем в двух местах, сопротивление заземления не нормируется. На открытых территориях, расположенных в этих зонах, напряженность электрического поля можно снизить установкой экранирующих перегородок (железобетонных заборов, тросовых экранирующих устройств) или посадкой деревьев и кустарника высотой не менее 2 м.

7.6. РАДИОПОГЛОЩЕНИЕ

Радиопоглощающие материалы (РПМ) используют для поглощения электромагнитных волн и в средствах защиты от воздействия ЭМП.

При взаимодействии падающей электромагнитной волны с РПМ происходит ее поглощение, рассеяние, а в некоторых типах РПМ — интерференция. В результате этих процессов происходит диссипация энергии падающей волны в поглощающем покрытии и отраженная волна становится незначительной. Для обеспечения малого отражения падающей волны от поглощающего покрытия требуется, чтобы его свойства не сильно отличались от свойств свободного пространства, т. е. среды, в котором распространяется волна. Иными словами, на границе раздела среда — поверхность РПМ не должно быть заметного скачка коэффициентов преломления. При этом падающая волна без заметных отражений на границе раздела «втянется» в поглощающее покрытие с последующим поглощением и рассеянием.

Таким образом, для выполнения этого требования необходимо, чтобы комплексное волновое сопротивление Z поглощающего покрытия стремилось по абсолютной величине к полному сопротивлению свободного пространства, равному $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \cong 377$ Ом, т. е. $|Z| \rightarrow Z_0$. При этом коэффициент отражения R , равный $(Z - Z_0)/(Z + Z_0)$, стремится к нулю.

По принципу действия РПМ делятся на две группы: объемные поглотители и резонансные (интерференционные) поглотители.

В объемных поглотителях используется объемное поглощение электромагнитной энергии за счет внесения электрических или магнитных потерь. Поглощающие материалы этого типа состоят из основы и наполнителя. В качестве основы используются различные каучуки, пенопласты и другие органические связующие, в качестве наполнителей — порошки графита, угольной и ацетиленовой сажи, карбонильного железа, ферриты, тонкие металлические волокна и т. п. Количество наполнителя достигает 40 % (массовых). При дальнейшем увеличении концентрации металлических частиц мощность поглощенной энергии уменьшается из-за увеличения отражения от металлических образований. Для уменьшения эффекта отражения внешние слои поглотителя имеют незначительные концентрации наполнителя по сравнению с более глубокими слоями. Внешнюю поверхность объемных поглотителей часто выполняют в виде шипов, имеющих форму конуса или пирамиды (ана-

логично конструкции, изображенной на рис. 2.25). Для защиты от внешних источников ЭМП стены зданий можно покрывать пористым бетоном с примесью графита, волосяными матами, пропитанными неопреном и угольной сажой, многослойными строительными материалами и т. п.

К достоинствам объемных поглотителей относится высокое поглощение энергии ЭМП с малым коэффициентом отражения в широком диапазоне частот, к недостаткам — относительно большие массогабаритные параметры.

Резонансные (интерференционные) поглотители представляют собой композицию из чередующихся слоев диэлектрика и проводящих пленок металла. Толщина диэлектрика составляет четверть длины волны падающего излучения или кратна нечетному числу $\lambda/4$. Принцип действия таких систем основан на интерференции падающей волны и образовании в них стоячих волн. Такие поглотители обладают низким коэффициентом отражения, малой массой, компактностью, но недостаточной широкополосностью.

В ряде случаев применяют комбинированные РПМ, представляющие собой сочетание резонансных и объемных поглотителей.

В настоящее время ведутся разработки различных типов РПМ как с точки зрения совершенствования свойств существующих композиций в части увеличения поглощающей способности, значительного снижения отражательной способности и массогабаритных характеристик, увеличения диапазона частот, повышения устойчивости и прочности, так и с точки зрения принципиально новых типов РПМ. В равной степени при этом уделяется внимание видам РПМ как коллективного, так и индивидуального пользования.

Глава 8

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

8.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучения оптического диапазона характеризуются длинами волн примерно от субмиллиметрового до дальнего ультрафиолетового излучений.

Границы инфракрасного диапазона (невидимые тепловые лучи) определяются примерно от длинноволнового участка видимого диапазона до субмиллиметровых волн включительно. За коротковолновой границей видимого диапазона простирается большая область ультрафиолетового диапазона (ближний, средний, дальний УФ) вплоть до рентгеновского диапазона.

Инфракрасное излучение (ИК-излучение) — это тепловое излучение, представляющее собой часть электромагнитного спектра с длиной волны $\lambda = 780 \text{ нм} \dots 1000 \text{ мкм}$ и обладающее волновыми и световыми свойствами, энергия которого при поглощении в веществе вызывает тепловой эффект.

Источником инфракрасного излучения является любое нагретое тело. Исследования показывают, что не менее 60 % всей теряемой теплоты распространяется в окружающей среде путем инфракрасного излучения. В практических условиях тепловое излучение является интегральным, поскольку нагретые тела излучают одновременно различные длины волн. Однако максимум излучения всегда соответствует волнам определенной длины, причем по мере увеличения температуры источника излучения максимум энергии излучения перемещается в спектре в сторону более коротких волн.

Среди ИК-спектров различают линейчатые, полосатые и непрерывные. Линейчатые (атомные) ИК-спектры испускают возбужденные атомы и молекулы при переходах между близко расположенными электронными уровнями энергии. Полосатые (молекулярные) ИК-спектры возникают при переходах между колебательными и вращательными уровнями энергии молекул. Колебательные и колебательно-вращательные спектры расположены в основном в средней области ИК-диапазона. Чисто вращательные спектры располагают-

ся главным образом в далекой области ИК-диапазона. Непрерывный ИК-спектр излучают все нагретые тела. Например, максимум теплового излучения тела человека приходится на длину волны 10 мкм, что соответствует средней области ИК-излучения. Непрерывный (сплошной) спектр обусловлен тем, что в конденсированном состоянии в жидкостях и твердых телах происходит сильное взаимодействие молекул и атомов, что приводит к размытию дискретных энергетических уровней и образованию сплошных спектров излучения.

В спектре инфракрасного излучения с учетом особенностей биологического действия в зависимости от длины волны излучения λ выделяют три области: коротковолновую *A* ($\lambda < 1,4$ мкм); средневолновую *B* ($\lambda = 1,4 \dots 3,0$ мкм); длинноволновую *C* ($\lambda > 3$ мкм).

Наиболее активно коротковолновое ИК-излучение, так как оно обладает наибольшей энергией фотонов, способно глубоко проникать в ткани организма и интенсивно поглощаться водой, содержащейся в тканях.

Полная энергия, испускаемая в единицу времени с единицы площади стенок полости, т. е. величина отдачи теплоты излучением, зависит от абсолютной температуры поверхности тела (прямо пропорциональна четвертой степени ее температуры) и определяется законом Стефана—Больцмана: $W_s = \sigma T^4$, где W_s — интенсивность излучения (теплоотдача), Вт/м²; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана; T — абсолютная температура тела, К.

Эта энергия излучается в телесном угле Ω , равном 2π ($\Omega = S/r^2$; S — площадь, вырезанная конусом на сфере радиусом r ; единица измерения телесного угла во всех системах — стерадиан). Для каждой температуры имеется свое спектральное распределение, причем при увеличении температуры максимум энергии излучения сдвигается в ультрафиолетовую область спектра. При этом величина $\lambda_{\max}$, соответствующая максимуму излучения для данного распределения, связана с T соотношением

$$\lambda_{\max} T = 0,014 \frac{hc}{k},$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — фундаментальная константа природы (постоянная Планка); c — скорость света; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана.

Строгая зависимость энергии излучения нагретых тел от температуры существует только для абсолютно черного тела. Спектральные распределения излучений человека и Солнца близки к излучению абсолютно черного тела.

При прохождении инфракрасного излучения через воздух он почти не нагревается. Между двумя телами, имеющими разную температуру нагрева, устанавливается радиационный теплообмен с отдачей теплоты от более нагретой поверхности менее нагретой:

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

где E — теплоотдача, Вт; C_1 и C_2 — константы излучения с поверхностей; T_1 и T_2 — температуры поверхностей, К.

8.2. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Источники ИК-излучения можно разделить на две группы: естественного и техногенного происхождения.

Главным естественным источником ИК-излучения в биосфере является Солнце. При температуре внешней поверхности Солнца 6000 К примерно 50 % энергии излучения приходится на ИК-диапазон. К числу естественных источников ИК-излучения относятся действующие вулканы, термальные воды, процессы тепломассопереноса в атмосфере, все нагретые тела, лесные пожары и т. п. Поверхность Земли испускает тепловое излучение в диапазоне длин волн примерно от 3 до 80 мкм, т. е. захватывает всю среднюю ИК-область.

Основным источником энергии для всех процессов, происходящих в биосфере, является солнечное излучение. Атмосфера, окружающая Землю, слабо поглощает коротковолновое излучение Солнца, которое в основном достигает земной поверхности. Некоторая часть солнечного излучения поглощается и рассеивается атмосферой. Поглощение падающей солнечной радиации обусловлено наличием в атмосфере озона, углекислого газа, паров воды, аэрозолей.

Рассеяние падающей радиации Солнца обусловлено процессами взаимодействия излучения с атомами, молекулами газов и аэрозольными частицами. Прямая и рассеянная компоненты солнечного излучения, достигая земной поверхности, частично поглощаются ею, а часть падающего излучения отражается от нее в зависимости от характера поверхности. Отражательная способность тел характеризуется величиной альбедо, оценивающей отражательные или рассеивающие свойства.

Под действием падающего солнечного потока в результате его поглощения земная поверхность нагревается и становится источни-

ком длинноволнового (ДВ) излучения, направленного к атмосфере. Атмосфера, с другой стороны, также является источником ДВ-излучения, направленного к Земле (так называемое противоизлучение атмосферы). При этом возникает взаимный теплообмен между земной поверхностью и атмосферой.

Главная особенность радиационного режима атмосферы — парниковый эффект, который заключается в том, что коротковолновая (КВ) радиация большей частью доходит до земной поверхности, вызывая ее нагрев, а ДВ-излучение от Земли задерживается атмосферой, уменьшая при этом теплоотдачу Земли в космос. Атмосфера является своего рода теплоизолирующей оболочкой, которая препятствует охлаждению Земли. Увеличение процентного содержания CO_2 , паров H_2O , аэрозолей и т. п. будет усиливать парниковый эффект, что приведет к увеличению средней температуры нижнего слоя атмосферы и потеплению климата. Основным источником теплового излучения атмосферы является земная поверхность.

Интенсивность солнечного излучения, поглощенного земной поверхностью и атмосферой, составляет 237 Вт/м^2 , из них 157 Вт/м^2 поглощается земной поверхностью, а 80 Вт/м^2 — атмосферой.

Радиационный баланс земной поверхности составляет 105 Вт/м^2 , а эффективное излучение с нее равно разности поглощенной радиации и радиационного баланса и составляет 52 Вт/м^2 . Энергия радиационного баланса затрачивается на турбулентный теплообмен Земли с атмосферой, что составляет 17 Вт/м^2 , и на процесс испарения воды, что составляет 88 Вт/м^2 .

Помимо роли атмосферы как теплозащитной оболочки и действия парникового эффекта, усугубляемого хозяйственной деятельностью человека, определенное влияние на тепловой баланс нашей планеты оказывают тепловые загрязнения в виде сбросового тепла в водоемы, реки, атмосферу, главным образом топливно-энергетического комплекса и в меньшей степени от промышленности.

Человеческая цивилизация, являясь сложной диссипативной структурой, неизбежно связана с тепловым излучением.

Известно, что потребность населения в энергии удовлетворяется за счет электрической энергии. Большая часть электрической энергии получается от преобразования тепловой энергии, выделяющейся при сгорании органического топлива. Доля электрической энергии, получаемой за счет атомных станций и других нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в большинстве стран невелика.

Путем преобразования энергии органического топлива примерно 30 % энергии топлива превращается в электрическую энергию, а 2/3 энергии поступают в окружающую среду в виде теплового загрязнения и загрязнения атмосферы продуктами сгорания. При увеличении энергии потребления будет увеличиваться загрязнение окружающей среды, если не принимать специальных мер. Тепловое загрязнение водоемов и атмосферы имеет место и при эксплуатации атомных электростанций. В настоящее время установлена закономерность общего повышения температуры водоемов, рек, атмосферы, особенно в местах нахождения электростанций, промышленных предприятий в крупных индустриальных районах. В свою очередь, это приводит к изменению теплового режима водоемов, что сказывается на жизни биоорганизмов, к возникновению нежелательных воздушных потоков из-за повышения температуры в атмосфере, изменению влажности воздуха и солнечной радиации и, как следствие, к изменению микроклимата.

Наиболее распространенным источником ИК-излучения техногенного происхождения является лампа накаливания. При температуре нити лампы накаливания 2300...2800 К максимум излучения приходится на длину волны 1,2 мкм и около 95 % энергии излучения приходится на ИК-диапазон. Используемые для сушки и нагрева лампы накаливания с вольфрамовой нитью мощностью 1 кВт излучают в ИК-диапазоне около 80 % всей энергии. При понижении температуры общее содержание ИК-излучения источника уменьшается. При падении интенсивности в 70 раз максимум интенсивности соответствует $\lambda = 10$ мкм, а при $\lambda = 18$ мкм интенсивность уменьшится в 700 раз.

К числу спонтанных источников ИК-излучения техногенного происхождения относятся также газоразрядные лампы, угольная электрическая дуга, электрические спирали из нихромовой проволоки, нагреваемые пропускаемым током, электронагревательные приборы, плазменные установки, печи различного назначения с использованием разного топлива (газа, угля, нефти, мазута, торфа и т. д.), электропечи, электротехнические устройства с неизбежным превращением доли электрической энергии в тепловую, двигатели внутреннего сгорания, электродвигатели, ракетные и авиационные двигатели, МГД-генераторы, реакторы атомных станций и т. д.

К числу когерентных техногенных источников с узкой полосой ИК-излучения относятся ИК-лазеры.

Тепловое излучение в производственных условиях встречается в диапазоне волн от 100 нм до 500 мкм.

В производственных условиях на человека может воздействовать тепловое излучение Солнца, открытого пламени, нагретого и расплавленного металла, стекла, поверхностей оборудования.

Микроклимат производственных помещений характеризуется уровнем температуры и влажности воздуха, скоростью его движения, а также интенсивностью тепловых излучений (радиацией) преимущественно в инфракрасной и частично ультрафиолетовой областях спектра электромагнитных волн.

Интенсивность теплового излучения на рабочих местах может колебаться от 175 до 13 956 Вт/м². К горячим цехам относят цеха, в которых тепловыделение превышает 23 Дж/м². В литейных цехах при нагреве и обработке деталей интенсивность теплового излучения составляет 1392...3480 Вт/м².

В производственных помещениях с большим тепловыделением (горячие цеха) на долю ИК-излучения может приходиться до 2/3 выделяемой теплоты и только 1/3 — на конвекционную теплоту.

Интенсивность облучения от нагретой поверхности при $L \geq \sqrt{S}$ определяют по формуле

$$J = \frac{0,91 \cdot S \left[(T/100)^4 - A \right]}{L^2},$$

где J — интенсивность облучения, Вт/м²; S — площадь излучаемой поверхности, м²; L — расстояние от центра излучающей поверхности до облучаемого объекта, м; $A = 85$ — коэффициент для кожи человека и хлопчатобумажной ткани; $A = 100$ — постоянный коэффициент для сукна.

8.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лучистое тепло имеет ряд особенностей. Инфракрасное излучение помимо усиления теплового воздействия на организм человека обладает и специфическим влиянием, зависящим от интенсивности энергии излучения отдельных участков его спектра.

В области A ИК-излучение обладает следующими вредными воздействиями:

- большая проникающая способность через поверхность кожи;
- поглощение кровью и подкожной жировой клетчаткой;
- на органы зрения (помутнение хрусталика).

ИК-излучения играют важную роль в теплообмене человека с окружающей средой — терморегуляции организма человека. Чрезмерное увлечение ИК-излучением, особенно ближней зоны, может привести к ожогам кожи, расстройствам нервной системы, общему перегреву тела человека, нарушению солевого баланса, работы сердца, тепловому удару и т. д. Наиболее поражаемые у человека органы — кожный покров и органы зрения.

Эффект действия тепловых излучений на организм человека зависит от длины волны, которая обуславливает глубину их проникновения. Длинно- и средневолновые ИК-излучения поглощаются в основном кожным покровом человека, видимые излучения и коротковолновые ИК-излучения проникают в организм человека и воздействуют на его внутренние органы. Действие ИК-излучений при поглощении их различными слоями кожи сводится к ее нагреванию и усилению обмена веществ.

Коротковолновые ИК-излучения, интенсивно поглощаясь хрусталиком глаза, являются причиной профессиональной катаракты (помутнение хрусталика). При интенсивном воздействии этих излучений на незащищенную голову может произойти тепловой удар — потеря сознания, нарушение координации движений, тяжелое поражение мозговых тканей.

При длительном пребывании человека в зоне тепловых излучений, как и при систематическом воздействии высокой температуры окружающей среды, происходит значительное нарушение теплового баланса в организме. Нарушается работа механизма терморегуляции, поддерживающего температуру тела на уровне $36,6...37,2^{\circ}\text{C}$, усиливается деятельность сердечно-сосудистой и дыхательной систем, усиливается потоотделение, происходит нарушение солевого баланса организма. При потере организмом солей в крови плохо удерживается вода, что приводит к быстрому выделению из организма вновь выпитой жидкости (в особо жарких условиях потеря организмом жидкости может достигать $1,0...1,5$ л/ч. Нарушение водно-солевого баланса вызывает судороги.

8.4. НОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Нормирование теплового излучения в производственных условиях регламентируется в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005—88 «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и Санитарных правил и

норм СанПиН 2.2.4.548—96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Нормирование ИК-излучения осуществляется по интенсивности допустимых интегральных потоков излучения с учетом спектрального состава, размера облучаемой площади, защитных свойств спецодежды для продолжительности действия более 50 % смены.

Показатели производственного микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма. Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Для оценки одновременного воздействия всех параметров микроклимата (температуры, влажности, скорости движения воздуха, теплового облучения) в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания рекомендуется использовать интегральный показатель тепловой нагрузки среды (ТНС), выраженный одночисловым показателем в °С.

Индекс тепловой нагрузки среды (ТНС-индекс) является эмпирическим показателем, характеризующим сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата. Значения ТНС-индекса не должны выходить за пределы величин, рекомендуемых в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Рекомендуемые величины ТНС-индекса для профилактики перегревания организма

Категория работ по уровню энергозатрат, Дж/с	Величины интегрального показателя, °С
Ia (до 139)	22,2...26,4
Iб (140..174)	21,5...25,8
IIa (175...232)	20,5...25,1
IIб (233...290)	19,5...23,9
III (более 290)	18,0...21,8

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочих местах не должна превышать в зависимости от категории работ следующих величин:

Температура, °С	25	24	22	21	20
Категория работ	Ia	Iб	IIa	IIб	III

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.), должны соответствовать значениям, приведенным ниже:

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

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.), не должны превышать 140 Вт/м². 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.

По СНиП 2.04.14—88 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» температура наружных поверхностей технологического оборудования и ограждений на рабочем месте не должна превышать 45 °С.

8.5. ЗАЩИТА ОТ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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, регламентация времени работы, в частности, перерывы в работе, сокращение рабочего дня, увеличение продолжительности отпуска, уменьшение стажа работы и др.).

Основными методами защиты от тепловых излучений являются: снижение ИК-излучения в источнике;
механизация трудовых процессов;

экранирование источников излучений путем использования теплоизомерных материалов;
теплоизоляция нагретых поверхностей;
применение воздушного душирования;
рациональная вентиляции и кондиционирование;
водяные завесы и водяное охлаждение нагретых поверхностей;
ограничение времени пребывания;
защита расстоянием;
использование средств индивидуальной защиты;
организация рационального режима труда и отдыха.

Коэффициент пропускания $K_{\text{пр}}$ оптического излучения в какой-либо среде можно в общем виде определять по формуле $K_{\text{пр}} = \exp(\chi L)$, где χ — коэффициент экстинкции (ослабления); L — длина пути, пройденного излучением, м.

Коэффициент экстинкции равен сумме коэффициентов поглощения и рассеяния, измеряется в обратных единицах длины (см^{-1} , м^{-1} и т. п.). При взаимодействии излучения со средой происходят в основном процессы поглощения (селективные и неселективные) и рассеяния (резонансные и диффузные).

Пары воды, молекулы углекислого газа, озона и другие примеси, имеющиеся в атмосфере, селективно поглощают ИК-излучение. Особенно интенсивно поглощают ИК-излучение пары воды. Например, слой воды в несколько сантиметров является непрозрачным для ИК-излучения с длиной волны более 1 мкм. Поэтому слой воды можно использовать в качестве теплозащитного экрана (филтра), что традиционно применяется при тушении пожаров.

Экранирование источников излучений — наиболее распространенный и эффективный способ защиты от тепловых излучений. Экраны применяют как для экранирования источников излучения, так и для защиты рабочих мест от воздействия потока теплоты. В зависимости от возможности наблюдения за рабочим процессом экраны можно разделить на три типа.

Непрозрачные экраны, применяемые при температуре 800...2000 °С. Они могут быть отражающими, теплопоглощающими и теплоотводящими.

В качестве теплоотражающих материалов используют алюминиевую фольгу, алюминий листовой, белую жемчужную, алюминиевые краски. Достоинства отражающих экранов — высокая эффективность, малая масса, экономичность. Однако применение их ограничивается, так они не выдерживают высоких температур и механических

воздействий. Эффективность экранов ухудшается при отложении на них пыли и при окислении.

Теплопоглощающие экраны можно применять в условиях интенсивных тепловых излучений, высоких температур, механических ударов и запыленной среды. В теплопоглощающем экране вследствие термического сопротивления тепловой поток уменьшается и температура наружной поверхности экрана остается низкой. В качестве таких экранов используют металлические заслонки и щиты, футерованные огнеупорным или изоляционным кирпичом, асбестовые щиты и др.

Теплоотводящие экраны представляют собой сварные или листовые конструкции, охлаждаемые внутри водой. При достаточном охлаждении эти экраны являются практически теплонепроницаемыми, поэтому их используют для защиты от тепловых излучений высокой интенсивности.

Полупрозрачные экраны применяют при температурах 800...1200 °С. Они могут быть теплопоглощающими и теплоотводящими. К этим экранам относятся металлические сетки с размером ячейки 3...3,5 мм, цепные завесы и армированное стальной сеткой стекло. Их эффективность увеличивается при орошении водяной пленкой или установке двойных экранов.

Прозрачные экраны используют при температуре 800...1800 °С, и они также могут быть теплоотводящими и теплопоглощающими. Теплопоглощающие прозрачные экраны изготавливают из различных стекол (силикатных, кварцевых, органических) бесцветных или окрашенных. Высокой эффективностью обладают также экраны в виде водяной пленки на стекле и аквариальные экраны, представляющие собой коробку из двух стекол, заполненную проточной водой.

Из теплоотводящих экранов наибольшее распространение получили водяные завесы, устанавливаемые у рабочих окон печей. Эффективность защиты от тепловых излучений водяной завесы возрастает при увеличении толщины слоя воды. Как правило, наиболее эффективны водяные завесы с толщиной слоя от 15 до 20 мм.

Комбинированные экранирующие средства защиты от тепловых излучений могут быть отражательно-пористыми (перфорированный алюминиевый лист), поглотительно-пористыми (принудительно охлаждаемый пористый теплоизоляционный материал) и отражательно-пленочными (двойное отражательное и теплопоглощающее стекло, установленное с воздушной прослойкой и охлаждением).

Кратность ослабления теплового потока защитным экраном $m = q_{1,2}/q_{3,2}$, где $q_{1,2}$ — плотность теплового потока между параллельными плоскостями 1 и 2; $q_{3,2}$ — плотность теплового потока между экраном и плоскостью 2.

Кратность снижения температуры излучающей поверхности

$$\mu = \frac{T_1}{T_3} = \sqrt{\frac{m}{1 + (T_2/T_1)^4 + (T_3/T_1)^4}}.$$

Коэффициент пропускания теплового потока $\tau = 1/m$; коэффициент эффективности экрана $\eta = 1 - \tau = (m - 1)/m$.

Теплоизоляция — эффективное мероприятие не только по уменьшению интенсивности теплового излучения, но и общих тепловыделений, а также для предотвращения ожогов. Для теплоизоляции применяют самые разнообразные материалы и конструкции (специальные бетоны и кирпич, минеральную и стеклянную вату, войлок и др.).

Кроме мер, направленных на уменьшение интенсивности теплового излучения источников, предусматривают его снижение непосредственно на рабочем месте. Это осуществляется воздушным душированием, с помощью которого непосредственно на рабочее место направляется воздушный поток определенной температуры и скорости в зависимости от категории работ, сезона года и интенсивности инфракрасной радиации согласно ГОСТ 12.1.005—88.

Дистанционное управление трудовым процессом увеличивает расстояние между работающим и источником теплоты, что снижает интенсивность излучения. Вынос оборудования на открытые площадки также уменьшает тепловыделения в производственных помещениях.

Средства индивидуальной защиты предназначены для защиты глаз, лица и поверхности тела. Защита достигается снабжением работающих спецодеждой, выполняемой из невоспламеняемого, стойкого против теплового излучения, воздухонепроницаемого материала (сукно, брезент, ткань с металлическим покрытием). Для защиты глаз используют очки, щитки и маски со специальными светофильтрами.

При наличии источников лучистого тепла тепловое облучение на рабочем месте необходимо измерять от каждого источника, располагая приемник прибора перпендикулярно падающему потоку. Измерения следует проводить на высоте 0,5; 1,0 и 1,5 м от пола или рабочей площадки.

Глава 9

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение) — электромагнитное излучение оптического диапазона с длиной волны λ от 200 до 1000 нм и частотой ν от 10^{13} до 10^{16} Гц. УФ-излучение представляет собой невидимое глазом электромагнитное излучение, занимающее в электромагнитном спектре промежуточное положение между светом и рентгеновским излучением.

По способу генерации оно относится к тепловому излучению, по характеру воздействия на вещества — к ионизирующим излучениям. По биологическому воздействию в зависимости от длины волны λ выделяют три области УФ-излучения: *A* — 400...280; *B* — 315...280; *C* — 280...200 нм.

Ультрафиолетовое излучение более короткого диапазона (от 180 нм и ниже) сильно поглощается всеми материалами и средами, в том числе и воздухом, и поэтому может иметь место только в условиях вакуума.

Исходя из специфической биологической эффективности область УФ—*C* также называют бактерицидной областью спектра; УФ—*B* — эритемной и УФ—*A* — общеоздоровительной.

Ультрафиолетовые лучи обладают способностью вызывать фотоэлектрический эффект, проявлять фотохимическую активность, вызывать люминесценцию и значительную биологическую активность.

9.1. ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источники УФ-излучения можно разделить на естественные и искусственные.

Основным источником УФ-излучения естественного происхождения является Солнце. Из всего спектра УФ-излучения Солнца только небольшая длинноволновая часть достигает земной поверхности ($\lambda > 0,29$ мкм). Остальная часть всего УФ-спектра, в особенности коротковолновая, поглощается атмосферой, что оказывает

сильное влияние на атмосферные процессы. Общий поток УФ-излучения в областях *A* и *B* составляет 3...4 % общей энергии солнечных лучей.

Основными поглотителями УФ-излучения являются озон (на высоте 20...40 км), кислород, азот, водород и другие компоненты атмосферы (на высоте 30...200 км).

Большая часть энергии УФ-излучения в диапазонах $\Delta\lambda = 0,14...0,17$ и $\Delta\lambda = 0,2...0,24$ мкм поглощается на высотах 80...100 км с последующей диссоциацией кислорода. Излучение с $\lambda < 0,1$ мкм вызывает ионизацию верхних слоев атмосферы, что приводит к ее разогреву. Этот поток ионизирующего излучения на границе с земной атмосферой примерно равен 3...10 эрг/(см² · с), составляя $(0,3...1) \cdot 10^{-5}$ от полного потока солнечного излучения. Эта активная компонента в течение солнечного цикла может изменяться три раза и оказывать на верхние слои атмосферы активное воздействие.

Источниками УФ-излучения являются звезды и другие космические объекты. В диапазоне $\Delta\lambda = 0,09...0,02$ мкм излучения этих тел поглощаются межзвездным водородом и частично верхними слоями атмосферы.

Ультрафиолетовые излучения создаются техногенными источниками, имеющими температуру выше 2000 °С (лазерные установки, электрические дуги от сварочных работ, плазма, расплавленный металл, кварцевое стекло и т. п.), ртутными выпрямителями; люминесцентными источниками (лампы газоразрядные и ртутные), используемыми в полиграфии, химическом и деревообрабатывающем производстве, сельском хозяйстве, при кино- и телесъемках, дефектоскопии, в других отраслях производства, а также в здравоохранении.

Любое тело, нагретое до 3000 К и выше, имеет в своем спектре ультрафиолетовую компоненту. Чем выше температура тела, тем в большей степени проявляется ультрафиолетовая составляющая спектра.

Любая высокотемпературная плазма является источником УФ-излучения, имеющего и линейчатый, и непрерывный спектры. С увеличением электронной температуры увеличивается интенсивность УФ-излучения, а в некоторых случаях и рентгеновского излучения.

Выпускаемые для различных целей и, в частности, для оптической накачки лазеров импульсные источники света и газоразрядные лампы тоже являются мощными источниками УФ-излучения. В зависимости от вида газа в электрическом разряде электрическая энергия преобразуется в оптическое излучение.

Применяемые в промышленности и в современной технологии электроискровая обработка, плазменные установки, электродуговая сварка, лазерные методы обработки являются техногенными источниками УФ-излучения.

Интенсивным источником УФ-излучения с непрерывным спектром являются электронные потоки синхротронов, линейных ускорителей, мощных приборов СВЧ.

К техногенным источникам УФ-излучения относятся более 70 различных лазерных систем, работающих в ультрафиолетовом и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах, а также некоторые металлургические печи и домы по выплавке высокотемпературных металлов и сплавов с применением кислородного дутья, мощных электронных и плазменных потоков и т. п.

9.2. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Величины УФ-излучения характеризуются по энергетической природе и по эффективности воздействия на биологические объекты. Для биологических объектов оценивают бактерицидные и эритемные величины излучений.

Биологическое действие УФ-излучения солнечного света положительно влияет на организм человека. Ультрафиолетовое облучение малыми эритемными дозами оказывает стимулирующее действие на организм. Под воздействием УФ-излучения наблюдается более интенсивное выведение химических веществ (марганца, ртути, свинца) из организма и уменьшение их токсического действия.

Физиологическое действие УФ-излучения проявляется в следующем: в области *A* приводит к флюоресценции; в области *B* вызывает изменения в составе крови, кожи, воздействует на нервную систему; в области *C* действует на клетки, вызывает коагуляцию белков; действуя на слизистую оболочку глаз, приводит к электроофтальмии (может вызвать помутнение хрусталика).

В основе биологического действия УФ-излучения лежат фотохимические процессы молекул биополимеров, которые возникают в организмах при поглощении верхними слоями тканей растений или кожи животных и человека падающего излучения.

В зависимости от интенсивности и длины волны УФ-излучение действует двояко на живые организмы. С одной стороны, малые дозы УФ-облучения оказывают благотворное влияние на человека и животных, способствуя образованию витаминов группы D. С дру-

гой стороны, УФ-облучение оказывает вредное (губительное) действие на живые организмы. Установить границу дозволенного и губительного в ряде случаев бывает очень сложно.

Лечебное действие. Применение в медицине ИК-, видимых и УФ-излучений осуществляется в специальном ее разделе, называемом физиотерапией (светолечение). При этом используются как искусственные, так и естественные источники излучения. Среди искусственных источников используются тепловые (лампы накаливания, электросветовые ванны и т. д.) и люминесцирующие (ртутно-кварцевые лампы, люминесцентные эритемные и дуговые бактерицидные) лампы.

Действие оптических излучений на человеческий организм определяется интенсивностью, временем облучения (дозировкой), глубиной проникновения излучения в зависимости от его длины волны.

Наибольшей глубиной проникновения обладают СВЧ-излучения, затем в сторону уменьшения — ИК-излучения и видимый диапазон. Минимальная глубина проникновения наблюдается для УФ-лучей. В случае применения ИК-излучения эффект покраснения кожи — эритема — может появиться через несколько минут после начала облучения, при действии УФ-излучения — спустя 2...8 ч (скрытый, латентный период). Этот эффект зависит от спектральной чувствительности кожи на разных участках тела, возраста, состоянии организма и т. д.

Максимальным эритемным действием обладает УФ-излучение с длиной волны 0,2967 и 0,2537 мкм. Покраснение кожи (эритема) через 3...4 дня переходит в защитную пигментацию (загар) кожи. Ультрафиолетовое облучение (местное или общее) применяют в широком диапазоне действий:

- компенсация ультрафиолетовой недостаточности (в районах Севера);
- болеутоляющее и противовоспалительное средство (при невритах, невралгии, радикулитах, миозитах, бронхитах, плевритах, кожных заболеваниях и нарушениях обмена веществ, профилактике рахита, ОРЗ и т. д.);
- увеличение сопротивляемости к различным инфекциям (например, к гриппу и т. д.).

Вредное действие УФ-излучений. Учитывая большую энергию квантов УФ-излучения и их способность вызывать деструкцию молекулярных и межмолекулярных связей, а также непосредственно влиять на внутриклеточные ткани с образованием радикалов, УФ-лучи представляют серьезную опасность для живого организма.

Большие дозы УФ-излучения могут вызывать ожоги кожи и канцерогенные реакции, повреждения глаз и другие нежелательные процессы. Кванты УФ-диапазона непосредственно влияют на синтез пигментов, активность ферментов и гормонов, интенсивность процессов фотосинтеза и т. п. УФ-излучение в больших дозах оказывает губительное воздействие на микроорганизмы и культивируемые клетки высших животных и растений.

УФ-лучи с длиной волны 0,24...0,28 мкм оказывают летальное и мутагенное действие, так как этот спектр совпадает со спектром поглощения нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), что приводит к гибели клетки или изменению ее наследственных свойств, т. е. образованию мутаций.

Большинство живых клеток обладает способностью восстанавливаться от повреждений, вызванных УФ-излучением. Способность к выживанию в условиях сильной солнечной радиации на ранних стадиях эволюции у разных биологических объектов различная. Мутации некоторых генов существенным образом влияют на чувствительность клеток к УФ-излучению. Некоторые гены увеличивают чувствительность к УФ-излучению, а некоторые мутации генов нарушают синтез белка и строение клеточных мембран.

Механизм воздействия УФ-излучения на живые организмы до конца не изучен, тем более невозможно предсказать последствия выживаемости разных биообъектов при увеличении интенсивности УФ-излучения и смещению его спектра в сторону коротких волн. Этот процесс крайне нежелателен. Человечеству нужно позаботиться, чтобы атмосфера и озоновый слой оставались надежной защитой от губительного коротковолнового УФ-излучения.

УФ-излучение от производственных источников, в первую очередь электросварочных дуг, может стать причиной острых и хронических профессиональных поражений. Наиболее подвержен действию УФ-излучения зрительный анализатор.

Кожные поражения протекают в виде острых дерматитов с эритемой, отеком, образованием пузырей. Примером поражения кожи, вызванного УФ-излучением, является солнечный ожог.

Важное значение имеют профессиональные поражения организма, вызванные пек-содержащими материалами (асфальт, толь, рубероид, пропитанные шпалы, некоторые краски, пластмассы, брикетное топливо) и ультрафиолетовой радиацией солнечного спектра. При длительном контакте с пеком может возникать повышенная чувствительность организма к свету, что выражается в поражении кожи.

УФ-излучение от производственных источников способно изменять газовый состав атмосферного воздуха вследствие его ионизации. При этом в воздухе образуются высокотоксичные газы — озон и оксиды азота, представляющие большую профессиональную опасность, особенно при сварочных работах в ограниченных, плохо проветриваемых помещениях.

9.3. ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Критерием производственной и экологической безопасности любого негативного фактора является непревышение уровня воздействия данного фактора в соответствии с санитарно-гигиеническими нормами. Гигиеническое нормирование УФ-излучений регламентируется Санитарными нормами ультрафиолетового излучения в производственных помещениях (СН № 4557—88).

Нормативы интенсивности излучения установлены с учетом продолжительности воздействия на работающих, обязательного ношения спецодежды, защищающей от излучения, головных уборов и использования средств защиты глаз.

С учетом оптико-физиологических свойств глаза, а также волновых областей УФ-излучений установлены допустимые плотности потока энергии, которые обеспечивают защиту поверхностей кожи и органов зрения. 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: для области *A* — 50,0; для области *B* — 0,05; для области *C* — $0,01 \text{ Вт/м}^2$.

Допустимая интенсивность ультрафиолетового 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 длительности однократного облучения свыше 5 мин и более не должна превышать: для области *A* — 10,0; для области *B* — $0,01 \text{ Вт/м}^2$. Излучение в области *C* при указанной продолжительности не допускается.

При использовании специальной одежды и средств защиты лица и рук, не пропускающих излучение (спилок, кожа, ткани с пленочным покрытием), допустимая интенсивность облучения в областях *B* и *C* ($\lambda = 200...315 \text{ нм}$) не должна превышать 1 Вт/м^2 .

9.4. ЗАЩИТА ОТ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Снижение интенсивности облучения и защита от воздействия УФ-излучения достигаются защитой расстоянием, экранированием источников излучения, экранированием рабочих мест, использованием средств индивидуальной защиты, специальной окраской помещений и рациональным размещением рабочих мест.

Защита расстоянием заключается в удалении обслуживающего персонала от источников УФ-излучения на расстояние, на котором уровни УФ-излучения не представляют опасности для человека, что достигается рациональным расположением рабочих мест.

Наиболее рациональным методом защиты является экранирование (укрытие) источников излучений. В качестве защитных экранов используют различные материалы и светофильтры, не пропускающие или снижающие интенсивность излучений.

Стены в помещениях и на рабочих местах окрашивают в светлые тона (серый, желтый).

Для защиты от УФ-излучений обязательно применяют индивидуальные средства защиты: спецодежду (куртка, брюки), рукавицы, фартуки из специальных тканей, щитки со светофильтром, очки с содержанием свинца.

Для защиты кожи от УФ-излучений применяют специальные мази, содержащие вещества-светофильтры для этих излучений, а также спецодежду, изготавливаемую из льняных и хлопчатобумажных тканей с искростойкой пропиткой и из грубых сукон. Для защиты рук от воздействия УФ-излучений применяются рукавицы.

Глава 10

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Лазерное излучение представляет собой особый вид электромагнитного излучения, генерируемого в диапазоне длин волн $\lambda = 0,1 \dots 1000$ мкм. Лазеры применяют в самых различных областях человеческой деятельности благодаря таким уникальным свойствам, как высокая степень когерентности и монохроматичности излучения, малая расходимость луча, острая фокусировка излучения и возможность получения огромной плотности мощности излучения.

Уникальные свойства лазерных излучений позволили квантовым приборам получить широкое применение в различных областях науки и техники — от космических исследований до лазерной косметики.

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛАЗЕРОВ

Основной источник лазерного излучения — оптический квантовый генератор (лазер). Лазеры являются генераторами электромагнитных волн оптического диапазона, в которых используется вынужденное электромагнитное излучение молекул активного вещества, приводимого в возбужденное состояние источником накачки. Лазеры различаются видом активного вещества и способом накачки.

В твердотельных лазерах в качестве активного вещества используются кристаллы рубина, алюмоиттриевый гранат (АИГ) или стекло, активированное неодимом (Nd) или эрбием. Для возбуждения активного вещества применяются импульсные ксеноновые лампы. В режиме свободной генерации твердотельные лазеры генерируют импульсы длительностью $0,1 \dots 1$ мс, с энергией десятки джоулей и мощностью в импульсе, составляющей десятки или сотни киловатт ($10^9 \dots 10^{10}$ Вт). Угол расходимости луча в твердотельных лазерах составляет $20 \dots 30^\circ$.

В газовых лазерах активным веществом является газ или смесь газов, которые приводятся в возбужденное состояние с помощью газового разряда. Газовые лазеры характеризуются малым углом расхождения луча — всего $1 \dots 3^\circ$. Наибольшее распространение по-

Таблица 10.1. Характеристики лазеров

Активная среда	Длина волны, мкм	Мощность, Вт		Частота повторения импульсов, Гц	Примечание (КПД, %)
		импульсная	непрерывная		
Алюмоиттриевый гранат (АИГ + Nd)	1,06	—	250	—	Компактный, сравнительно недорогой
То же	1,06	10^5	—	5000	То же
Стекло + Nd	1,06	$(1...5) \cdot 10^9$ Импульсная		1...10	Дорогостоящий
То же	1,06	10^{12}	—	Низкая	Очень дорогостоящий
Рубин	0,6943	10^5	—	То же	Относительно дорогостоящий, сравнительно компактный, 1 %
То же	0,6943	10^9	—	То же	Дорогостоящий
CO ₂ — газоразрядный	10,6	—		—	Большие размеры, относительно дорогой, 5...10 %
CO ₂ — газодинамический	10,6	—	$(2...5) \cdot 10^5$	—	Сравнительно компактный, дорогостоящий
CO ₂ — прокатка поперечная	10,6	10^6	—	10^4	Компактный, сравнительно недорогой, 20 %, большие давления
N ₂	0,3371	10^5	—	10^2	Компактный, недорогой
Ar ⁺	0,4880	—	10^2	—	Дорогой
He—Ne	0,6328	—	0,1	—	Недорогой
GaAs	0,84...0,9	1...100	1...10	$10^2...10^3$	Компактный, сравнительно недорогой, 50 %

лучили лазеры на смеси гелия (He) и неона (Ne) с длиной волны генерации 0,63 мкм и лазеры на углекислом газе (CO₂) с длиной волны 10,6 мкм. Мощность гелий-неоновых лазеров невелика и составляет десятки или сотни милливатт. Лазеры на углекислом газе характеризуются большой мощностью — сотни ватт в непрерывном режиме и высоким КПД (20...30 %).

В полупроводниковых лазерах активным веществом является полупроводниковый кристалл. Возбуждение лазера осуществляется электрическим током, проходящим через кристалл. Максимальная мощность составляет около 100 Вт в импульсном режиме и несколько ватт — в непрерывном. Обладает углом расходимости луча в несколько градусов.

В жидкостных лазерах в качестве активного вещества используются органические красители. Возбуждение активного вещества осуществляется или когерентным излучением другого лазера, или некогерентным излучением импульсных ламп. В жидкостных лазерах при соответствующем выборе активного вещества можно получить когерентное излучение с длинами волн от 0,34 до 11,75 мкм. Энергия излучения в импульсе составляет до 10 Дж. Сравнительные характеристики некоторых лазеров приведены в табл. 10.1.

К числу когерентных техногенных источников с узкой полосой ИК-излучения относятся ИК-лазеры, некоторые из них перечислены в табл. 10.2.

Таблица 10.2. Длины волн генерации ИК-лазеров

Лазер	Длины волн генерации, мкм
Лазер на неодимовом стекле (твердотельный)	1,06
He-Ne-лазер (газовый)	1,15; 3,39
CO-лазер (газовый)	5,08...6,66
CO ₂ -лазер (газовый)	10,6 (9,12...11,28)
H ₂ O-лазер (на парах воды)	118,6
HCN-лазер (газовый)	773
Смесь H ₂ и Cl ₂ (химический лазер)	3,7...3,8
GaAs (полупроводниковый лазер)	0,83...0,92
InSb (полупроводниковый лазер)	4,8...5,3
(Pb, Sn) Te (полупроводниковые лазеры)	6,5...32

10.2. СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучение оптического квантового генератора распространяется в различных средах и взаимодействует с ними в соответствии с законами электродинамики.

Интенсивность излучения. В отличие от всех известных оптических источников излучение лазеров обладает чрезвычайно высокой интенсивностью. Мощность твердотельного оптического квантового генератора (ОКГ) может достигать 10^{12} Вт (это не рекордная цифра, но довольно высокая). При фокусировке это излучение можно сконцентрировать в малом пятне. Из оптики известно, что минимальный радиус пятна r_s при фокусировке пропорционален длине волны: $r_s \sim \lambda$. Предположим, что $\lambda = 1$ мкм. Учитывая, что на практике получить теоретический предел довольно трудно из-за несовершенства оптических систем, примем $r_s \cong 10$ мкм (на хороших оптических системах это значение может быть меньше). Тогда интенсивность излучения J_s составит $J_s = J/(4\pi r_s^2) \cong 3 \cdot 10^{17}$ Вт/см².

Таким образом, плотность мощности лазерного излучения может достигать чрезвычайно высоких значений порядка 10^{17} Вт · см⁻² и более. При воздействии такого излучения на вещество развиваются чрезвычайно высокие температуры порядка 10^6 К и выше. Естественно, что никакой тугоплавкий материал не выдержит такой плотности излучения. Если учесть, что время воздействия таких плотностей в случае импульсного действия гораздо меньше времени установления стационарного процесса, то при этом происходит взаимодействие интенсивного излучения с веществом в локальном объеме, т. е. в области облучения, не затрагивая соседние области.

При распространении лазерного излучения на большие расстояния в воздухе приходится учитывать ослабление, вносимое им. Так, коэффициент ослабления по мощности равен при длине волны 0,6943 мкм — $2,0 \cdot 10^{-4}$; 1,06 мкм — $1,15 \cdot 10^{-4}$; 10,6 мкм — $0,65 \cdot 10^{-4}$ 1/м.

С учетом этого коэффициента формула (7.4) принимает вид

$$J = \frac{PK_G}{4\pi r^2} e^{-2k''r}, \quad (10.1)$$

где k'' — коэффициент поглощения энергии поля в среде (коэффициент затухания).

Во многих практических случаях необходимо знать, какой интенсивностью обладает в данной точке пространства не только прямое, подчиняющееся (10.1) излучение оптического квантового генератора (ОКГ), но и излучение этого лазера, отраженное от ка-

кой-либо изотропно рассеивающей преграды (цели, стены помещения и т. д.). В таких случаях интенсивность излучения определяют по формуле

$$J = \frac{PK_G\sigma}{16\pi^2 r^4}, \quad (10.2)$$

в которую при необходимости добавляется множитель $e^{-2k \cdot r}$.

В эту формулу, кроме уже известных величин, входит σ — эквивалентная площадь плоской, диффузно отражающей преграды:

$$\sigma = \rho S_{\text{пр}}, \quad (10.3)$$

где ρ — коэффициент отражения данного излучения от преграды; $S_{\text{пр}}$ — проекция облучаемой поверхности преграды на плоскость, перпендикулярную прямому лучу лазера.

Формула (10.2) действительна, когда расстояние между точкой, в которой определяется интенсивность, и отражающей преградой равно или близко расстоянию r от этой преграды до источника излучения.

Ширина линии излучения и когерентность. Монохроматическая волна имеет строго определенную частоту колебаний:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 \cos[(\omega t - \bar{k} x) + \varphi],$$

где $\bar{E}_0$ — амплитуда вектора электрической напряженности поля; $\bar{k}$ — волновое число; x — координата оси распространения волны; φ — фаза ($\bar{E}_0$, ω , $\bar{k}$, φ не зависят от времени t).

При распространении в пространстве двух волн одинаковой частоты, но с разными фазами (φ_1 , φ_2) в любой момент времени разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ будет оставаться постоянной. Две волны когерентны, если амплитуда, частота, фаза, поляризация и направление распространения этих волн остаются постоянными или изменяются по определенному закону. Идеальных монохроматических колебаний в природе не существует, так как каждый энергетический уровень имеет конечную ширину, связанную с временем жизни уровня. Из соотношения неопределенности (соотношение Гейзенберга) следует, что неопределенность значения верхнего уровня $\Delta\epsilon$ при излучении связана с неопределенностью времени жизни этого уровня Δt соотношением $\Delta\epsilon\Delta t = h$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка.

Длительность процесса излучения τ и естественная ширина линии излучения $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ связаны выражениями

$$\Delta\omega \sim \frac{2\pi}{\tau}; \quad \Delta\nu \sim \frac{1}{\tau}.$$

Учитывая, что в лазере имеется оптический резонатор, в котором существуют собственные частоты (моды колебаний с шириной $\Delta\nu_p$), путем соответствующего выбора размеров резонатора и условий работы лазера можно получить высокую степень монохроматичности. В газовых лазерах сравнительно легко получить $\Delta\nu_p/\nu_0 = 10^{-10}$ (где ν_0 — резонансная частота перехода) и даже меньше. Это выполняется в том случае, если в интервале $\Delta\nu_d$ на резонансной частоте ν_0 находится одна мода $\Delta\nu_p$ колебания резонатора (одномодовый режим). У твердотельных ОКГ монохроматичность хуже монохроматичности газовых лазеров. Высокая степень монохроматичности лазерных источников облегчает получение меньшего пятна r_s при фокусировке. При этом хроматическая aberrация оптических линз практически не играет роли. Это свойство лазерных источников способствует получению значительных интенсивностей.

Лазерное излучение обладает высокой степенью временной и пространственной когерентности. Это свойство лазерного излучения способствует получению больших значений интенсивности J_s , так как малая расходимость лазерного потока способствует получению меньших значений r_s пятна при фокусировке. Понятие когерентности играет большое значение при использовании лазерного излучения в оптической локации.

Напряженность электрического поля. Лазерное излучение, обладая чрезвычайно высокой интенсивностью, позволяет получать высокие значения электрической напряженности в потоке. Эти значения сравнимы с внутриатомными полями. Максимальное значение электромагнитной связи электрона с протоном у водорода H определяется выражением $\bar{E}_H = e/r_0^2$, где e — заряд электрона; r_0 — радиус электронной орбиты.

При $r_0 \cong 10^{-8}$ см величина $\bar{E}_H = 10^9$ В/см. Для других веществ это значение составляет $10^7 \dots 10^8$ В/см.

Интенсивность поля (плотность мощности) связана с напряженностью электрического поля $\bar{E}$ соотношением $J_s = \epsilon_0 c \bar{E}^2$, где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; c — скорость света. При интенсивностях, например, 10^{14} Вт/м² величина $\bar{E}$ составляет примерно 10^8 В/см.

Возможность управления и модуляции. Лазерное излучение дает возможность относительно просто варьировать мощность лучевого потока, изменять направление его распространения с помощью фокусирующих линз, внешних коллиматоров, отражающих зеркал или специальных устройств.

Яркость. Свойства лазеров позволяют получить необычайно высокое значение яркости излучения. В табл. 10.3 приведены сравнительные значения яркости некоторых оптических источников, из которой видно, что яркость лазерного источника на много порядков превышает яркость Солнца и мощность искусственных источников спонтанного оптического излучения.

Таблица 10.3. Значения яркости некоторых источников

Источник	Мощность, Вт	Расходимость потока, ст. рад.	Площадь, см ²	Яркость, Вт·см ⁻² ·ст. рад ⁻¹
Ртутная лампа	10 ⁴	4π	1	~10 ³
Солнце	4 · 10 ²⁶	4π	2,5 · 10 ²³	1,3 · 10 ²
He-Ne-лазер	10 ⁻²	3 · 10 ⁻⁴	0,1	10 ⁶
Рубиновый лазер	10 ⁷	5 · 10 ⁻³	1	4 · 10 ¹¹
CO ₂ -лазер (непрерывный)	10 ²	10 ⁻⁴	1	~3 · 10 ⁹
Nd-стекло (лазер спец. конструкции)	4 · 10 ¹⁰	4 · 10 ⁵	10	~2 · 10 ¹⁷

Угол расходимости пучка. Одной из важных характеристик лазерного излучения является направленность (коллимация) излучения. Важность коллимации заключается в том, что энергия, переносимая лазерным потоком, может быть собрана (сфокусирована) на малой площади.

Ограничение на угол расходимости лазерного потока накладывается дифракцией $\theta = k\lambda/d$, где θ — угол расходимости; k — числовой коэффициент порядка единицы (для однородного пучка $k = 1,22$); d — диаметр выходной апертуры; λ — длина волны.

Ниже приведены значения углов расходимости для некоторых распространенных типов лазеров.

Лазер	He-Ne	Ar	CO ₂	Рубин	Стекло с Nd	АИГ с Nd	GaAr
θ, мрад	0,2...1	0,5...1	1...10	1...10	0,5...10	2...20	20...200

10.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Воздействие лазерного излучения на человека, живой организм, живую клетку многолико и противоречиво. Оно используется и как хирургический нож для удаления злокачественных опухолей и других образований, и как тонкий инструмент в микрохирургии глаза, и как целительный луч для лечения самых разнообразных заболеваний сердца, печени, вегетативно-сосудистой системы, пищеварительного тракта и т. д.

С другой стороны, лазерное излучение представляет определенную опасность при неосторожном и неумелом его использовании. Даже работа с маломощным лазером представляет опасность, прежде всего для глаз. При более мощном излучении могут быть получены долго незаживающие ожоги кожи. При соответствующих мерах безопасности и правильной оценке степени риска работа с лазерными источниками может быть сведена до такого же уровня, как работа с другим электротехническим оборудованием.

Для человека излучения лазеров не представляют принципиально нового вида излучений, хотя и обладают рядом специфических свойств по сравнению с другими некогерентными источниками видимого света, УФ-, ИК- и СВЧ-излучений. Однако лазерное излучение даже очень малой интенсивности при определенных условиях может сфокусироваться в глазной среде и представить опасность для сетчатки глаза, которая является светочувствительной поверхностью дна глазного яблока.

Биологическое действие лазерного излучения зависит от длины волны и интенсивности излучения, поэтому весь диапазон длин волн делится на области: ультрафиолетовая (0,2...0,4 мкм); видимая (0,4...0,5 мкм); инфракрасная — ближняя (0,75...1 мкм) и дальняя (свыше 1,0 мкм).

По степени опасности лазерного излучения для организма человека все лазерные установки подразделяются на четыре класса (СанПиН 5804—91).

К классу I относятся лазеры, излучение которых не представляет опасности для кожи и глаз человека.

Ко II классу относятся лазеры, излучение которых представляет опасность для глаз или кожи при облучении прямым или зеркально отраженным излучением.

К III классу относятся лазеры, излучение которых представляет опасность для глаз и кожи при облучении прямым или зеркально отраженным излучением и опасность для глаз при облучении диф-

фузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от отражающей поверхности.

К IV классу относятся лазеры, излучение которых представляет опасность для кожи и глаз при облучении диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от отражающей поверхности.

Деление лазеров на классы позволяет определить мероприятия по обеспечению безопасности при работе с лазерами различных типов.

Вредные воздействия лазерного излучения могут быть следующих видов:

- термическое (тепловое);

- энергетическое (+ мощность);

- фотохимическое;

- механическое (колебания типа ультразвуковых в облученном организме);

- электрострикция (деформация молекул в поле лазерного излучения);

- образование в пределах клеток микроволнового электромагнитного поля.

Действие на зрение. Сетчатка глаза подвержена опасности воздействия лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,4 мкм. Вне этого участка падающее излучение поглощается роговой оболочкой, которая является передним прозрачным слоем глаза и может быть тоже поражена в указанном диапазоне длин волн.

Глазная линза обладает фокусирующими свойствами, поэтому сетчатка становится наиболее чувствительной и поражаемой областью глаза. Коллимируемый поток падающего на глаз лазерного излучения может фокусироваться на поверхности сетчатки в малое пятно, поэтому на площади фокального пятна интенсивность излучения может оказаться значительно выше, чем на роговой оболочке, т. е. на входе глаза. Для иллюстрации рассмотрим случай, типичный для практики. Отношение интенсивностей на входе глаза и на фокальном пятне сетчатки пропорционально $(r_0/r_n)^2$, где r_0 , r_n — соответственно радиусы зрачка глаза и фокального пятна. При характерных размерах $r_0 \cong 0,2$ см и $r_n \cong 10$ мкм имеем $(r_0/r_n)^2 = 4 \cdot 10^4$. Отсюда видно, что благодаря фокусирующим свойствам глаза интенсивность на сетчатке глаза может быть увеличена примерно на четыре порядка по сравнению с интенсивностью на входе глаза.

Для оценки биологического воздействия лазерных излучений на сетчатку вводятся пороговые значения мощности на единицу поверхности сетчатки, вызывающие обнаруживаемые повреждения на

ее поверхности. Значения этих пороговых мощностей зависят от размеров пятна, длительности импульса, длины волны падающего лазерного излучения, режимов работы лазера, угла падения лучей, расстояния до источника и других факторов.

Лазерное излучение голубой области видимого света опаснее для сетчатки, чем излучение в красной области при равенстве мощности облучения. Это объясняется дополнительным фотохимическим действием коротковолнового участка видимого диапазона. При работе с когерентными источниками УФ-диапазона следует проявлять особую осторожность, так как излучения с длиной волны менее 0,32 мкм даже при низких уровнях мощности приводят к фотоофтальмии (солнечному «ожогу»). Излучение в этой области спектра обладает кумулятивным эффектом и сразу после облучения не вызывает ощущения «песка в глазу». Болевое ощущение проявляется через несколько часов после облучения.

В результате экспериментальных исследований установлена некоторая зависимость от частоты повторения импульсов излучения, т. е. в какой-то степени проявляется эффект накопления.

Излучение CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) вызывает повреждение эпителия роговой оболочки. Механизм повреждения в этом случае имеет тепловую природу в отличие от фотохимического действия УФ-излучения.

Определенную опасность для зрения представляют спонтанные излучения ламп оптической накачки, тепловое излучение поглотителей, используемых при работе мощных лазеров, газоразрядных трубок, что необходимо учитывать с целью уменьшения влияния вредных и опасных факторов, возникающих при работе с ними.

Действие на кожный покров. При рассмотрении процессов воздействия лазерного излучения на кожный покров прежде всего необходимо учитывать длину волны и мощность падающего излучения и пигментацию кожи. Чем выше пигментация кожи в видимом диапазоне, тем меньше ее отражательная способность. Однако при больших уровнях мощности и длинах волн более 2 и менее 0,3 мкм пигментация кожи большой роли не играет. В средней и дальней областях ИК-диапазона кожный покров сильно поглощает излучение, так как клетки кожного покрова содержат более 60 % воды, которая является широкополосным поглотителем. Особую опасность для кожного покрова представляет излучение CO₂-лазеров:

- на длине волны 10,6 мкм коэффициент поглощения кожного покрова очень высок и падающее излучение почти целиком поглощается в очень тонком слое, что усиливает эффект ожога;

- излучение на этой длине волны невидимое (без специальных мер визуализации), что усиливает степень риска при работе;
- этот тип лазеров очень распространен и имеет значительные мощности, что требует особых мер безопасности.

При воздействии мощных коротких импульсов на кожный покров могут возникать ударные волны, вызывающие смещение и повреждение органов.

Побочные вредные факторы при работе с лазерами. Проблема безопасности при работе с квантовыми приборами не ограничивается только самим лазерным потоком. Она связана с другими факторами, сопровождающими эксплуатацию этих устройств:

- повышенные напряжения блоков электропитания (часто силовых, с большими накопителями электрической энергии);
- наличие вредных и агрессивных веществ, применяемых в качестве компонент рабочих сред и во вспомогательных устройствах (модуляторах, затворах и т. п.). К ним относятся, например, $F + H_2$; $H + F_2$; $H + Cl_2$; CO ; HF , пары свинца и других металлов, $SeOCl_2$, CH_3OH , углеводороды, галогеноводороды, кислоты и др.;
- наличие вредных и опасных продуктов лазерной деструкции, образующихся при термохимическом воздействии мощного лазерного излучения на различные мишени.

В табл. 10.4 приведены опасные и вредные факторы, встречающиеся на производстве при эксплуатации лазеров.

Таблица 10.4. Опасные и вредные факторы при эксплуатации лазеров

Опасные и вредные факторы	Класс опасности лазеров			
	I	II	III	IV
Лазерное излучение:				
прямое	—	+	+	+
диффузно отраженное	—	—	+	+
Повышенная напряженность ЭМП	—(+)	+	+	+
Повышенная запыленность, загазованность воздуха рабочей зоны	—	—	—(+)	+
Повышенный уровень ультрафиолетовой радиации	—	—	—(+)	+
Повышенная яркость света	—	—	—(+)	+

Опасные и вредные факторы	Класс опасности лазеров			
	I	II	III	IV
Повышенный уровень шума и вибраций	—	—	—(+)	+
Повышенный уровень ионизирующих излучений	—	—	—	+
Повышенный уровень электромагнитного излучения СВЧ- и ВЧ-диапазонов	—	—	—	—(+)
Повышенный уровень инфракрасной радиации	—	—	—(+)	+
Повышенная температура поверхности оборудования	—	—	—(+)	+

Примечание. Знак «минус» — излучение не представляет опасности для кожи и глаз человека; знак «плюс» — излучение представляет опасность для кожи и глаз человека; знак «минус (плюс)» — излучение не представляет опасности для кожи и опасно для глаз человека.

10.4. НОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гигиеническое нормирование УФ-излучений регламентируется СН 5804—91. Нормируемые параметры — предельно допустимый уровень (ПДУ) лазерного излучения при $\lambda = 0,2...20$ мкм, кроме этого ПДУ на роговице, сетчатке, коже.

ПДУ зависит от длины волны лазерного излучения, мкм; продолжительности импульса, с; частоты повторения импульса, Гц; длительности воздействия, с.

Для импульсного или кратковременного воздействия, когда суммарный биологический эффект определяется в основном общей энергией излучения, нормируется энергетическая экспозиция H — плотность потока энергии излучения, Дж/м².

При кратковременном облучении глаз видимым светом нормируется энергия лазерного излучения W , Дж, приходящаяся на апертуру (площадку) диаметром 7 мм (зрачок глаза).

При длительном облучении нормируется облученность E , Вт/м², т. е. плотность потока мощности излучения.

При длительном облучении глаз видимым светом нормируется мощность лазерного излучения P , Вт, приходящаяся на апертуру диаметром 7 мм.

В диапазоне видимого и ближнего инфракрасного излучения (длина волны от 380 до 1400 нм) нормы ПДУ устанавливаются различными для глаз и для кожи.

В инфракрасном диапазоне (для глаз и кожи) и видимом (для кожи) при длительности воздействия менее 1...3 с нормируется энергетическая экспозиция H , Дж/м², а при большей длительности воздействия — облученность E , Вт/м².

При длительном воздействии лазерного излучения все значения ПДУ уменьшаются в 10 раз для ультрафиолетового излучения и в 5 раз для видимого и инфракрасного диапазонов волн. Для оценки степени опасности конкретной лазерной установки необходимо плотность потока энергии (или мощности) данной установки сравнить со значением ПДУ.

10.5. ЗАЩИТА ОТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель защиты — снизить плотность лазерного излучения на рабочих местах. Этого можно достичь организационными, техническими, планировочными и санитарно-гигиеническими мероприятиями.

Общие правила безопасной работы с лазерами состоят в следующем:

- избегать попадания прямых, отраженных и диффузно отраженных лазерных потоков на тело, особенно в глаза;

- использовать оградительные поглощающие барьеры (экраны) по пути распространения лазерного потока;

- применять индивидуальные меры защиты, в особенности защитные очки (щитки);

- размещать облучаемую лазерным потоком мишень в локальных вытяжных боксах;

- ограничивать доступ к мощным лазерным системам;

- обеспечивать помещения, где размещаются мощные лазеры, специальными световыми табло, плакатами, дверями, заблокированными с блоками питания лазеров;

- обязательное обучение персонала правилам безопасной работы и т. д.

Работы на лазерных установках следует проводить в отдельных, специально выделенных помещениях или отгороженных частях по-

мешений. Лазерные установки IV класса должны располагаться в отдельных помещениях с блокировкой входных дверей.

Поверхности помещения изнутри и находящиеся в нем оборудование и предметы не должны иметь зеркально отражающих поверхностей, а должны быть матовыми. Искусственное освещение в помещениях должно быть комбинированным.

Генератор и лампа накачки лазера должны быть заключены в светонепроницаемую камеру. Лампы накачки должны иметь блокировку, исключающую возможность вспышки лампы при открытом положении экрана. Устройства для визуальной юстировки необходимо оборудовать смонтированными защитными светофильтрами, поглощающими излучение на всех основных частотах лазера.

Наиболее распространенная техническая мера — экранирование рабочего места и лазерного излучения. Лазерные установки должны иметь блокировку, с помощью которой лазер приводится в рабочее положение, если экран на месте. Экранирующие щиты, ширмы, шторы следует изготавливать из непрозрачных теплоустойчивых материалов. При эксплуатации мощных лазеров на всем пути от лазера до мишени луч должен быть огорожен экранами и другими непрозрачными предметами, а на конечном участке лазерного луча рекомендуется устанавливать мишень.

Пример. В помещении производятся работы с лазерной установкой непрерывного действия, рабочим веществом которой является кристалл рубина. Мощность излучения $P = 0,01$ Вт; угол расходимости луча $0,6^\circ$. Луч направляется на металлическую мишень, расположенную на стене на расстоянии $R = 3$ м от лазера.

Определить среднюю плотность потока мощности прямого излучения, падающего на мишень, и отраженного излучения, достигающего рабочих мест около установки на расстоянии $r = 3$ м от стены. Коэффициент отражения от стен, потолков и предметов в помещении $\rho = 0,4$.

Решение. Для вычисления плотностей потоков мощности по формулам (7.4) и (10.2) необходимо определить коэффициент усиления K_G . Считая, что потери мощности на пути излучения до выхода из кристалла невелики, примем за коэффициент усиления на выходе излучения коэффициент направленного действия. Этот коэффициент можно определить как отношение площади сферы к площади ее поверхности, освещаемой лучом лазера, который исходит из центра сферы. Площадь освещаемого пятна на мишени есть площадь круга S , за диаметр которого d благодаря малой величине угла расходимости можно принять катет прямоугольного треугольника, две другие стороны которого соединяются с центром сферы и являются ее радиусами. Произведение

$$R \sin 0,6^\circ = d = 3 \cdot 0,01 = 0,03 \text{ м.}$$

Отсюда

$$S = \pi d^2/4 = \pi/4(R \sin 0,6^\circ)^2 = (\pi/4) \cdot 1,0965 \cdot 10^{-4} R^2 \text{ м}^2 = 7,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$K_G = 4\pi R^2/S = 4\pi R^2/[(\pi/4) \cdot 1,0965 \cdot 10^{-4} R^2] = 14,6 \cdot 10^4.$$

Средняя плотность потока мощности, падающего на мишень,

$$\begin{aligned} J_{\text{миш}} &= PK_G/(4\pi R^2) = 0,01 \cdot 14,6 \cdot 10^4/(4 \cdot 3,14 \cdot 3^2) = \\ &= 12,9 \text{ Вт/м}^2 = 1290 \text{ мкВт/см}^2. \end{aligned}$$

Для вычисления интенсивности отраженного излучения нужно знать эквивалентную площадь отражающей преграды [см. (10.3)]. Считая, что мишень перпендикулярна прямому лучу, принимаем $S_{\text{пр}} = S = 7,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Тогда эквивалентная площадь диффузно отражающей преграды

$$\sigma = \rho S_{\text{пр}} = 0,4 \cdot 7,75 \cdot 10^{-4} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

а интенсивность отраженного излучения

$$\begin{aligned} J_{\text{отр}} &= PK_G \sigma/(16\pi^2 r^4) = 0,01 \cdot 14,6 \cdot 10^4 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4}/(16 \cdot 3,14^2 \cdot 3^4) = \\ &= 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2 = 0,0032 \text{ мкВт/см}^2. \end{aligned}$$

Так как $J_{\text{отр}} < J_{\text{доп}} = 0,3 \text{ мкВт/см}^2$, то мер защиты от отраженного излучения при удалении рабочих мест от мишени на $r = 3 \text{ м}$ принимать не требуется.

В качестве индивидуальных средств защиты рекомендуются защитные очки из специального стекла, вмонтированные в маску или полумаску, защищающую лицо. Защитные очки должны на несколько порядков ослаблять излучение лазера и хорошо пропускать излучение остальной части видимого спектра. В качестве светофильтров для защитных очков применяют поглощающие стекла, многослойные диэлектрические тонкопленочные отражатели и их комбинации.

Руки защищают хлопчатобумажными или кожаными перчатками, которые уменьшают опасность поражения кожи в 100 раз. Хорошими защитными свойствами обладает белый фетр толщиной 2...3 мм, который выдерживает плотность излучения до 100 Дж/см^2 .

Глава 11

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

11.1. ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ионизирующее излучение определяется как любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков, т. е. положительных и отрицательных.

Различают ионизирующее излучение двух видов: корпускулярное и электромагнитное. Потоки частиц с ненулевой массой покоя (электроны, протоны, нейтроны и многие другие) относятся к первому виду, а потоки частиц с нулевой массой покоя (фотоны) — ко второму. К ионизирующему излучению не относится ультрафиолетовое излучение и видимый свет. Основные виды ионизирующих излучений: α -излучение; β -излучение; нейтронное излучение; рентгеновское излучение; γ -излучение.

α -Излучение представляет собой поток ядер гелия (${}^4_2\text{He}$), испускаемых при распаде радиоактивного вещества или при ядерных реакциях. Энергия α -частиц — порядка нескольких МэВ. В воздухе эти частицы поглощаются слоем толщиной 8...9 см. Пробег α -частиц в живой ткани составляет несколько десятков микрон, а толщина алюминиевой фольги в 10 микрон полностью поглощает поток α -излучения. При увеличении энергии α -частицы возрастает вызываемая ею ионизация в поглощаемой среде. Вследствие большой массы эти частицы быстро теряют свою энергию, поэтому проникающая способность этого вида излучения невысокая. Удельная ионизация α -частиц на воздухе составляет несколько десятков тысяч пар ионов на 1 см пути.

β -Излучение — поток электронов (или позитронов), возникающих при радиоактивном распаде. Энергия этих частиц составляет несколько МэВ. Максимальный пробег в воздухе достигает более 15 м, а в живых тканях — 2,5 см. Обладая значительно меньшей массой, чем α -частицы, β -частицы имеют более высокую проникающую способность. Ионизирующая способность этого вида излучения составляет несколько десятков пар на 1 см пути пробега.

Нейтронное излучение преобразует свою энергию в результате соударения с ядрами вещества. При неупругих взаимодействиях возможно возникновение вторичных излучений, которые могут иметь как заряженные частицы, так и γ -излучения. При упругих столкновениях не исключена ионизация вещества. Проникающая способность нейтронов в значительной степени зависит от их энергии.

Рентгеновское излучение возникает при воздействии β -частиц на окружающую среду или при бомбардировке электронами анодов рентгеновских трубок, ускорителей и т. п. Энергия фотонов рентгеновского излучения составляет примерно 1 МэВ. Рентгеновское излучение, как правило, состоит из тормозного и характеристического. Тормозное излучение имеет непрерывный спектр, оно испускается при изменении кинетической энергии заряженных частиц. Характеристическое излучение представляет собой фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, испускаемое атомами при изменении их энергетического состояния. Рентгеновское излучение обладает большой проникающей и малой ионизирующей способностями.

γ -Излучение, как и рентгеновское, имеет электромагнитную природу и обладает большой проникающей способностью и малым ионизирующим действием. γ -Излучение возникает в результате естественной радиоактивности, а также в искусственных ядерных реакциях, при соударении частиц высоких энергий и т. п. Энергия фотона γ -излучения может достигать очень больших значений, во много раз превосходящих энергию фотона рентгеновского диапазона.

Радиоактивные вещества (радионуклиды) обладают различной степенью устойчивости. За определенное время они или распадаются, или переходят в другое состояние. Для оценки устойчивости радионуклидов введено понятие периода полураспада $T_{1/2}$ — время, в течение которого распадается половина исходного числа атомов радионуклидов.

Изменение числа радиоактивных атомов происходит по экспоненциальному закону:

$$N = N_0 \exp(-\lambda\tau), \quad (11.1)$$

где N_0 — исходное число атомов; N — число не распавшихся атомов спустя время τ ; λ — постоянная распада.

Период полураспада $T_{1/2}$ определяется соотношением

$$N_0/2 = N_0 \exp(-\lambda\tau_{1/2}), \quad (11.2)$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (11.3)$$

Спустя $n = \tau/T_{1/2}$ число N достигнет значения

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Для оценки степени устойчивости радионуклидов вводят понятие среднего времени жизни $\tau_{\text{ср}}$:

$$N = N_0 \exp(-\tau/\tau_{\text{ср}}).$$

Величина $\tau_{\text{ср}}$ равна тому промежутку времени, в течение которого число атомов N_0 уменьшается в « e » раз. Тогда $T_{1/2}$ и $\tau_{\text{ср}}$ связаны соотношением $T_{1/2} = 0,693\tau_{\text{ср}}$ и с учетом (11.3) $\tau_{\text{ср}} = 1/\lambda$.

Основные процессы взаимодействия заряженных частиц состоят в следующем.

1. Движущиеся в веществе заряженные частицы теряют свою энергию главным образом в результате кулоновских столкновений с атомами вещества. Благодаря большой разнице масс атомных электронов и ядер можно провести четкое различие между столкновением заряженной частицы с атомным электроном, приводящим к передаче последнему части энергии падающей частицы, в результате чего атом возбуждается или ионизируется (неупругое столкновение), и соударением заряженной частицы с атомным ядром, что обуславливает переход части ее кинетической энергии в поступательное движение атома как целого (упругое столкновение).

2. Для электронов (β -частиц) существенное значение имеет неупругое взаимодействие с атомными ядрами, приводящее к испусканию жесткого электромагнитного излучения. Падающий электрон (β -частица) может испытать также упругое рассеяние на электронах.

3. Тяжелая частица, обладающая энергией, достаточной для преодоления кулоновских сил отталкивания ядра, может испытать рассеяние на ядерных силах или вызвать ядерную реакцию, приводящую к испусканию различных частиц, γ -квантов и т. д.

11.2. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

При взаимодействии жесткого излучения и высокоэнергетических частиц с веществом происходит процесс ионизации. Энергия частиц, способных ионизировать среду, определяется кинетической энергией, а для фотонов рентгеновского и γ -излучений опре-

деляется соотношением $h\nu$ (h — постоянная Планка; ν — частота излучения).

Энергия ионизирующих частиц E , как правило, выражается в электрон-вольтах (эВ) ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$).

Поток Φ ионизирующих частиц определяется отношением числа частиц, проходящих через данную поверхность за единицу времени, т. е. $\Phi = dN/d\tau$.

Плотность потока ϕ определяется отношением $d\Phi/dS$, а поток энергии ионизирующих частиц — величиной $\Phi_E = dE/d\tau$. Данная величина определяется отношением суммарной энергии dE всех частиц, идущих в данном направлении за рассматриваемый промежуток времени $d\tau$.

Поглощенная доза. Основополагающей дозиметрической величиной, используемой при количественных оценках воздействия радиации на человека, является *поглощенная доза* D ионизирующего излучения (доза излучения), равная отношению средней энергии dE ионизирующего излучения, поглощенной в рассматриваемом объеме, к единице массы dm вещества в данном объеме:

$$D = \frac{dE}{dm}.$$

В СИ единицей поглощенной дозы является грей (Гр), равный джоулю, поглощенному в килограмме вещества. Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад (р), равный 100 эрг/г ; $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$.

Отношение приращения поглощенной дозы dD к интервалу времени $d\tau$, за который оно произошло, называется *мощностью поглощенной дозы*:

$$\dot{D} = \frac{dD}{d\tau}.$$

Значение $\dot{D}$ принято выражать в Гр/с; Гр/ч и т. д. Если закон изменения мощности дозы со временем $\dot{D}(\tau)$ известен, то доза за время τ может быть найдена по формуле

$$D = \int_0^{\tau} \dot{D}(\tau) d\tau.$$

Соотношение между вероятностью возникновения радиационного эффекта и дозой принято называть *зависимостью доза — эффект*. Для стохастических эффектов эта зависимость в ограничен-

ном интервале доз может быть аппроксимирована линейной зависимостью. В таком случае средняя доза может считаться показателем вероятности последующих стохастических эффектов. Для детерминированных (соматических) эффектов зависимость доза — эффект нелинейна.

Эффективная и эквивалентная дозы. Тканевый весовой множитель. Биологическое воздействие ионизирующего излучения зависит не только от поглощенной дозы излучения, но и от глубины проникновения в живой организм. Если радиационное поле представлено различными по виду и энергии излучениями с различными весовыми множителями W_R , которые относятся к дозе, взятой по определенному объему вещества, то для оценки радиационной опасности облучения человека в таком поле вводится *эквивалентная доза*, равная сумме произведений поглощенных доз компонент излучения на соответствующие им весовые множители:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R},$$

где $D_{T,R}$ — поглощенная доза, усредненная по T -й ткани или органу, образованная R -м излучением.

Единицей измерения эквивалентной дозы служит зиверт (Зв): $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$. В качестве единицы эквивалентной дозы длительное время использовался биологический эквивалент рентгена — бэр: $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$. Определение мощности эквивалентной дозы аналогично определению мощности поглощенной дозы.

Соотношение между эквивалентной дозой и вероятностью стохастических эффектов зависит и от особенностей органа или ткани, подвергнувшихся воздействию ионизирующего излучения, поэтому целесообразно ввести еще один взвешивающий коэффициент — так называемый *тканевый весовой множитель* W_T , индекс T относится к соответствующей ткани или органу. Множитель W_T представляет собой относительный вклад данного органа или ткани в полный ущерб, вызванный стохастическими эффектами при тотальном равномерном облучении всего тела.

Введем понятие *эффективной дозы*. Она определяется как сумма взвешенных эквивалентных доз H_T во всех тканях и органах тела:

$$H_e = \sum W_T H_T.$$

Использование понятия эффективной дозы позволяет учесть относительный риск облучения различных органов. Эффективную

дозу можно представить, очевидно, и в виде дважды взвешенных поглощенных доз во всех тканях и органах тела. Значения W_T приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Тканевые весовые множители

Ткань или орган	W_T	Ткань или орган	W_T
Половые железы	0,20	Печень	0,05
Красный костный мозг	0,12	Пищевод	0,05
Толстый кишечник	0,12	Щитовидная железа	0,05
Легкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Поверхность костей	0,01
Мочевой пузырь	0,05	Остальные органы	0,05
Молочные железы	0,05		

Желательно, чтобы равномерная по всему телу эквивалентная доза давала эффективную дозу, численно равную этой равномерной эквивалентной дозе. Это может быть достигнуто, если пронормировать сумму тканевых весовых множителей на единицу. Именно такая нормировка обеспечивается данными табл. 11.1, согласно которой $\sum W_T = 1$.

Экспозиционная доза. Экспозиционная доза X характеризует меру ионизационного действия рентгеновского и γ -излучения. Она определяется по ионизации воздуха при электронном равновесии, сводящемся к условию равенства между энергией излучения, поглощенной в некотором объеме вещества, и суммарной кинетической энергией вторичных частиц — электронов и позитронов, образованных в том же объеме вещества под действием первичного излучения. Для определения экспозиционной дозы измеряется общий электрический заряд ионов одного знака, возникающих в воздухе во время облучения.

Пусть при измерении в объеме V воздуха образовано N пар ионов (равное числу ионов одного знака). Тогда $D_{\text{экс}} = NW/m_V$, где W — средняя энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов в воздухе, равная 34 эВ; m_V — масса воздуха объемом V .

Единицей экспозиционной дозы в СИ является один кулон на килограмм (Кл/кг). Внесистемной единицей экспозиционной дозы

служит рентген (R). Один рентген — это такая доза, при которой в 1 см^3 воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов. $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} = 88 \text{ эрг/г}$, т. е. один рентген приблизительно равен одному раду. Рентген и его доли — миллирентген (мR), равный 10^{-3} R , микрорентген (мкR), равный 10^{-6} R , и другие широко используются на практике.

Коллективная доза. При рассмотрении радиационных эффектов, связанных с облучением групп (популяций) людей, применяется представление о *коллективной дозе*. При использовании этого понятия предполагается справедливость сделанного выше допущения для стохастических эффектов о линейной зависимости доза — эффект для любых органов и тканей. Применительно к рассматриваемому понятию важность этого допущения связана с тем, что если такая линейная зависимость отсутствует, то суммирование доз недопустимо, а следовательно, невозможно оценивать общий риск и рассчитывать коллективные дозы, выражающие общий ущерб для рассматриваемой популяции, подвергнувшейся облучению.

Сформулируем понятие коллективной дозы в интегральной форме. Допустим, что достаточно большое число людей $N(\dot{D})$ находится в поле излучения с мощностью дозы, приходящейся на малый интервал от $\dot{D}$ до $\dot{D} + d\dot{D}$. Тогда коллективная мощность дозы $\dot{D}_S$ выражается формулой

$$\dot{D}_S = \int_0^{\infty} \dot{D} N(\dot{D}) d\dot{D},$$

причем предполагается, что мощность дозы зависит от времени τ .

Если зависимость мощности дозы от времени, в промежутке от τ_1 до τ_2 известна, то коллективную дозу можно найти, проинтегрировав величину $\dot{D}_S(\tau)$ в пределах τ_1 — τ_2 :

$$D_S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{D}_S(\tau) d\tau.$$

Парциальная коллективная доза обусловлена действием конкретного источника за весь период его существования:

$$D_{S\kappa} = \int_0^{\infty} \dot{D}_{S\kappa}(\tau) d\tau,$$

где $\dot{D}_{S\kappa}(\tau)$ — парциальная коллективная мощность дозы в момент τ .

Если имеется несколько источников, то общая коллективная доза равна сумме парциальных доз.

Накопление парциальной дозы происходит за все время действия источника, поэтому изучение ее временного поведения позволяет прогнозировать дальнейшее развитие радиационных условий, связанных с излучением этого источника.

Если коллективная доза определяется на основании информации о распределении облучаемых людей по индивидуальным дозам, полученным (или которые будут получены) от какого-либо источника, то можно представить величину D_S с учетом для всех N лиц значений доз от 0 до $D_{\max}$ в форме

$$D_S = \int_0^{D_{\max}} \dot{D} N(\dot{D}) d\dot{D}.$$

Упрощенный вариант этой формулы в дискретной форме, широко используемый на практике, имеет вид

$$D_S = \sum_{i=1}^n D_i N(D_i),$$

где D_i — среднее значение индивидуальной дозы для i -го дозового интервала; $N(D_i)$ — число людей, получивших дозу, приходящуюся на i -й интервал; n — полное число интервалов, на которые приходится все значения индивидуальных доз.

Если в качестве индивидуальной дозы используется поглощенная доза, то коллективную дозу называют *коллективной поглощенной дозой*; единицей измерения служит человеко-грей. Если же индивидуальной дозой является эквивалентная или эффективная доза, то говорят о *коллективной эквивалентной* или *коллективной эффективной дозе* соответственно. В таких случаях единицей измерения является человеко-зиверт.

Интенсивность радиоактивного распада. За основной процесс при радиоактивности принят 1 распад, сопровождающийся испусканием α - или β -частиц, нейтронов и γ -излучения. При условии, если в секунду происходит 1 распад, подобную интенсивность (активность) распада принято оценивать в беккерелях (Бк). Применяемые ранее единицы активности связаны соотношением: 1 Рд (резерфорд) = 10^6 Бк; 1 Ки (кюри) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

В соответствии с Правилами СП 2.6.1.799—99 (ОСПОРБ—99) установлены понятия для описания радиационных эффектов: предел дозы и предел годового поступления.

Предел дозы (ПД) — величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

Предел годового поступления (ПГП) — допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы.

Соотношения единиц измерения основных дозиметрических величин радиации:

- активность A [Бк — Беккерель], внесистемная единица [Ки — Кюри]:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}; \quad 1 \text{ Бк} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки};$$

- энергия излучения E [Дж — Джоуль], внесистемные единицы [эрг], [эВ — электрон-вольт]:

$$1 \text{ эрг} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}; \quad 1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ} = 1 \cdot 10^7 \text{ эрг};$$

- поглощенная доза D — средняя энергия в элементарном объеме на массу вещества в этом объеме [Гр — Грей], внесистемная единица [рад]:

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр};$$

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г} = 100 \text{ рад};$$

- эквивалентная доза H [Зв — Зиверт], внесистемная единица [бэр]:

$$1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад } k = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг } k = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр } k = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв};$$

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр } k = 1 \text{ Дж/кг } k = 100 \text{ рад } k = 100 \text{ бэр},$$

где k — коэффициент качества (зависит от биологического эффекта ионизирующих излучений);

- мощность поглощенной дозы $\dot{D}$ [Гр/с], внесистемная единица [рад/с]:

$$1 \text{ рад/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{с)} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с};$$

$$1 \text{ Гр/с} = 1 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{с)} = 1 \cdot 10^2 \text{ рад/с};$$

- мощность эквивалентной дозы $\dot{H}$ [Зв/с], внесистемная единица [бэр/с]:

$$1 \text{ бэр/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв/с}; \quad 1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ бэр/с};$$

- экспозиционная доза X — отношение заряда вещества к его массе [Кл/кг], внесистемная единица [Р — Рентген]:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}; \quad 1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р};$$

- мощность экспозиционной дозы $\dot{X}$ [Кл/(кг · с)], внесистемная единица [Р/с]:

$$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/(кг · с)}; \quad 1 \text{ Кл/(кг · с)} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р/с}.$$

11.3. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Человек существует в условиях постоянно действующего облучения, создаваемого источниками ионизирующего излучения естественного происхождения, образующего, как принято говорить, естественный радиационный фон. Эти источники подразделяются на источники земного и внеземного (космического) происхождения.

В результате человеческой деятельности радиационное воздействие от естественного излучения может существенно изменяться. Например, в зданиях, построенных из материалов с повышенным содержанием радионуклидов, радиационный фон увеличивается. Аналогичный эффект имеет место при использовании в бытовых целях природного газа, содержащего, как правило, радон. Повышается *радиационный фон* в условиях полета на самолете. Повышенный радиационный фон может возникнуть и близ угольных теплоэлектростанций, поскольку при сгорании угля в атмосферу выбрасываются различные радионуклиды. Такого рода естественный радиационный фон называется *технологически повышенным*.

Фоновое облучение организма человека создается космическим излучением, искусственными и естественными радиоактивными веществами, которые содержатся в теле человека и окружающей среде. Фоновое облучение включает дозы: от космического облучения; от природных источников; от источников, испускающих излучение в окружающую среду и в быту; от испытания ядерного оружия; от выбросов АЭС; получаемые при медицинских обследованиях и радиотерапии; технологически повышенного радиационного фона.

Эквивалентная доза от космического облучения — 300 мкЗв/год. В биосфере Земли находится примерно 60 радиоактивных нуклидов. Эффективность дозы облучения ТЭЦ в 5...10 раз выше, чем АЭС в увеличении фона. При полете в самолете на высоте 8 км дополнительное облучение составляет 1,35 мкЗв/год. Облучение от цветного телевизора на расстоянии 2,5 м от экрана — 0,0025 мкЗв/ч, 5 см от экрана — 100 мкЗв/ч. Средняя эквивалентная доза облучения при медицинских исследованиях 25...40 мкЗв/год.

Научно-технический прогресс привел к появлению ионизирующего излучения и от искусственных источников. К искусственным источникам относятся все ядерно-технические установки, например ускорители и ядерные реакторы, все искусственные радиоактивные вещества, например радионуклиды, применяемые в медицине, рентгеновские установки.

Однако воздействие естественного радиационного фона и искусственного излучения сопряжено с радиационным риском и неблагоприятными последствиями облучения.

Особое место в процессах загрязнения атмосферного воздуха, воды, почвы, всей окружающей человека природной среды занимает радиоактивное загрязнение. По оценке специалистов, Россия — самая загрязненная радиоактивными веществами страна в мире. Это результат ряда крупных аварий (Чернобыльская АЭС, ПО «Маяк», Томск-7 и др.), сбрасывания радиоактивных отходов в окружающую среду и создания свалок радиоактивных отходов.

Радиоактивное загрязнение характеризуется присутствием радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или в другом месте, в количестве, превышающем установленные уровни.

На основании изложенного можно привести следующую классификацию источников ионизирующего излучения, оказывающих радиационное воздействие на человека:

1. Естественные источники ионизирующего излучения:
 - земного происхождения;
 - космического происхождения;
 - технологически повышенный естественный радиационный фон.
2. Искусственные источники ионизирующего излучения.

Естественные источники ионизирующего излучения. Различают внешние и внутренние источники земного происхождения. В состав первых входят радионуклиды, содержащиеся в горных породах, воде, воздухе, строительных материалах и т. д. Испускаемое ими

излучение обуславливает наружное радиационное воздействие на человека. Ко вторым относятся радионуклиды, постоянно поступающие в организм человека из окружающей среды и содержащиеся в ней; эти радионуклиды вызывают его внутреннее облучение.

Внутреннее облучение опаснее внешнего в силу следующих причин:

- отсутствует защита внутренних органов кожным покровом;
- время облучения обычно значительно больше, оно совпадает со временем нахождения радионуклида в организме;
- росту дозы способствует малое (в предельном случае бесконечно малое) расстояние от источника до облучаемой ткани.

Распад естественных радионуклидов приводит к образованию α -, β -частиц (электронов) и γ -квантов. Пробег α - и β -частиц настолько мал, что они практически полностью поглощаются в биологической ткани толщиной в несколько миллиметров. Поэтому при оценке внешнего воздействия излучения радионуклидов, содержащихся в земной коре, воде и воздухе, принимается во внимание лишь более проникающее γ -излучение, тогда как для внутреннего облучения наиболее существенную роль играют α -частицы, ионизирующая способность которых значительно больше, чем β - и γ -излучений.

Природные радионуклиды, содержащиеся в земной коре, представлены кобальтом-40, рубидием-87 и элементами двух радиоактивных семейств, «родоначальниками» которых являются уран-238 и торий-232. Перечисленные нуклиды существовали в земной коре на всем протяжении истории земного шара.

Технологически повышенный естественный радиационный фон. Причины, приводящие к увеличению естественного фона ионизирующего излучения, связанные с человеческой деятельностью, весьма разноплановы и многообразны.

Производство электроэнергии на угольной теплоэлектростанции сопряжено с сжиганием сравнительно больших масс угля (в расчете на получение 1 ГВт электроэнергии необходимо сжечь $3 \cdot 10^9$ кг угля). При его сгорании в атмосферу попадает огромное число аэрозольных частиц, содержащих природные радионуклиды.

Дополнительное облучение населения, проживающего близ таких электростанций, связано в основном с поступлением радионуклидов внутрь организма с воздухом и пищей. После сгорания угля остаются шлак и летучая зола, также содержащие радионуклиды. В зависимости от очистки в атмосферу выбрасывается и разносится ветром от 1 до 20 % золы. Согласно ориентировочным оценкам коллективной дозы внутреннее облучение, связанное с дыха-

нием радионуклидов, содержащихся в аэрозолях и золе, не превышает $3 \cdot 10^{-4}$ чел.-Гр на 1 МВт производимой электроэнергии в год.

Фосфоритные породы содержат в сравнительно большой концентрации примеси урана-238, тория-232, продуктов их распада и калия-40. Фосфоритная руда используется как для переработки и удобрения, так и для производства некоторых сырьевых материалов, например фосфорной кислоты. Фосфориты входят также в состав строительного материала — фосфогипса (химического гипса). Фосфатные удобрения и различные материалы, содержащие фосфорит, представляют собой потенциальные источники облучения людей. Для фосфатных удобрений ожидаемая коллективная доза составляет $3 \cdot 10^{-6}$ чел.-Гр на 1 т готовой продукции.

В табл. 11.2 приведены ориентировочные максимальные значения мощности поглощенной дозы γ -излучения в воздухе внутри помещений от природных радионуклидов, содержащихся в наиболее распространенных строительных материалах.

Таблица 11.2. Мощность поглощенной дозы γ -излучения D_s в воздухе в помещениях, обусловленная применением различных строительных материалов

Строительный материал	$D_s, 10^8$ Гр/ч	Строительный материал	$D_s, 10^8$ Гр/ч
Гранит	28...45	Известняк	5
Вулканический туф	24	Гипс	4
Кирпич	16...33	Древесина	Меньше 0,4
Бетон	15...21		

Согласно оценкам отношение мощности поглощенной дозы в воздухе внутри и вне помещений для каменных зданий равно приблизительно 1,3, а для деревянных зданий — примерно 0,7. С точки зрения радиационной экологии проживание и пребывание людей в деревянных зданиях является предпочтительным.

Среди предметов широкого потребления встречаются товары, являющиеся сравнительно интенсивными источниками ионизирующего излучения; в большом числе изделий такого рода содержатся радионуклиды природного происхождения. К ним относятся часы со светосоставами на основе радия-226 или содержащие тритий; керамика, фарфоровые, стеклянные изделия, сплавы, содержащие

уран или торий; антистатические средства, содержащие полоний-210, детекторы дыма, содержащие радий или америций; группа изделий, представленная электронными и электрическими приборами, содержащими радиоактивные вещества или испускающими радиационное излучение, которое возникает при торможении электронов.

Примерами изделий из стекла и фарфора могут служить соответственно оптические линзы со сравнительно высоким содержанием урана или тория и фарфор с включенной в него примесью урана, который используется для изготовления зубных протезов. Установлено, что при использовании таких материалов в слое эпителия полости рта поглощенная доза может достигнуть значения 0,03 Гр/год. Применение урана или тория при изготовлении фарфоровых протезов в некоторых странах рекомендовано ограничить или запретить.

Имеются устройства — источники ионизирующего излучения, в которых для приведения их в рабочее состояние необходима предварительная ионизация газового промежутка. Примером может служить флуоресцентная лампа, для воспламенения которой применяется пускатель, содержащий какое-либо радиоактивное вещество. Аналогичный прием используется в триггерной трубке, детекторе дыма и др. Тормозное излучение возникает в электронных трубках в результате ускорения электронов. Опасность получения достаточно большой дозы возможна лишь в случае аварии источника или при его удалении с отходами товара.

Индивидуальные и коллективные дозы от радона в домах больше доз, получаемых почти от всех других источников. В России концентрация радона и продуктов его распада в воздухе жилых помещений в ряде случаев превышает соответствующие нормы (предельный уровень удельной активности радона для вновь построенных зданий принимается равным 100, а для обжитых — 200 Бк/м³).

Важнейшим источником поступления радона в воздух внутри помещений является природный газ. Накапливаясь в горных породах, радон в составе природного газа проходит затем через буровые скважины и систему газопроводов, попадая в жилые или производственные помещения, где газ используется для отопления или приготовления пищи.

Суммарная мощность дозы космических лучей (КЛ) растет до высоты, несколько превышающей 20 км, т. е. в зонах полета самолетов различного типа. При изменении высоты значения мощности дозы изменяются весьма резко. Например, при изменении маршрута полета от 4 до 12 км мощность поглощенной дозы возрастает

в 30 раз, а мощность эквивалентной дозы — в 25 раз. Отношение мощности поглощенной дозы на 10 км — типичной высоте полета дозвукового самолета (3,01 мкГр/ч), и на поверхности Земли (0,032 мкГр/ч) равно 100. Таким образом, при авиационных перевозках люди подвергаются фоновому облучению существенно более высокому по сравнению с уровнем облучения на поверхности Земли в условиях нормального фона.

Искусственные источники ионизирующего излучения. Техногенный источник излучения — это источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности. К источникам ионизирующего излучения искусственного происхождения относятся крупные установки — ускорители заряженных частиц, ядерные реакторы, рентгеновские аппараты; широко используемые в науке и технике капсулированные (герметически закрытые) источники, например источники нейтронов, радионуклиды, используемые в медицинских целях.

Главными источниками ионизирующих излучений и радиоактивного загрязнения (заражения) являются предприятия ядерного топливного цикла: атомные электростанции (реакторы, хранилища отработанного ядерного топлива, хранилища отходов); предприятия по изготовлению ядерного топлива (урановые рудники и гидрометаллургические заводы, предприятия по переработке и захоронению радиоактивных отходов). Кроме того, источниками радиоактивного загрязнения могут быть исследовательские атомные реакторы, транспортные ядерно-химические установки и военные объекты (хранилища ядерных боеприпасов, ракетные установки).

Источниками радиоактивного загрязнения являются отвалы урановых шахт, отходы обогатительных заводов. В ряде городов, особенно крупных, радиационный контроль выявил сотни и тысячи участков с повышенными (иногда весьма значительно) уровнями радиоактивного загрязнения. Такие «свалки» возникают в результате выбрасывания или потери герметизированных источников изотопов, жидких или порошковых радиоактивных веществ, лома приборов, в состав которых входили источники ионизирующих излучений, и т. д. Радиоактивное загрязнение окружающей среды в глобальном масштабе связано с проводившимися в недавнем прошлом испытаниями ядерного оружия.

Искусственные источники, излучение которых воздействует на человека, можно подразделить на следующие категории:

искусственные источники излучения в среде обитания;

радиоактивные загрязнения среды атомными предприятиями и атомными электростанциями (АЭС);

глобальные выпадения радиоактивных веществ от ядерных взрывов.

Атомная физика и техника таят в себе огромные возможности, но вместе с тем и большую опасность для людей и окружающей среды, о чем свидетельствуют аварии на атомных станциях в США, Англии, Франции, Японии и в СССР (Чернобыльская). Атомные установки эксплуатируются на ледоколах и лихтеровозах, на крейсерах и подводных лодках, в космических аппаратах.

Ядерные материалы приходится возить, хранить, перерабатывать. Все эти операции создают дополнительный риск радиоактивного загрязнения окружающей среды, поражения людей, животных и растительного мира. Особенно опасны в отношении вероятности возникновения радиоактивного загрязнения окружающей среды аварии на радиационно опасном объекте (РОО).

К типовым радиационно опасным объектам следует отнести атомные станции, предприятия по изготовлению ядерного топлива, по переработке отработавшего топлива и захоронению радиоактивных отходов, научно-исследовательские и проектные организации, имеющие ядерные реакторы, ядерные энергетические установки на транспорте.

Радиоактивное заражение при аварии АЭС может происходить за счет выброса парогазовой фазы — это авария без разрушения активной зоны. Высота выброса может составить 150...200 м, время выброса — 20...30 мин. Состав радиоактивных изотопов: ксенон, криптон, йод. Более серьезной аварией является выброс продуктов деления из реактора — это авария с разрушением активной зоны. При этом радиоактивные продукты мгновенно выбрасываются на высоту до 1 км с последующим истечением струй радиоактивного газа на высоту до 200 м. Следует отметить, что большая часть активности выносится при истечении газов. При выносе менее 3 % продуктов деления зоны сильного и опасного заражения не образуется.

Особенностью облучения в медицинских целях является применение ионизирующих излучений, создающих относительно высокие мощности дозы и большие дозы. Так, при рентгеновской диагностике отдельных органов тела пациента значение поглощенной дозы достигает долей грея. В радиотерапевтической практике используются еще большие дозы. Развитие рентгеновской техники, предназначенной для диагностики, идет в направлении снижения уровня доз, получаемых пациентами.

В промышленно развитых странах годовые дозы рентгеновского излучения на душу населения достигают $5 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Гр, что соответствует годовой коллективной дозе от медицинского облучения населения, составляющей $5 \cdot 10^2 \dots 10^3$ чел.-Гр на 1 млн человек.

По сравнению с приведенной оценкой облучения пациентов облучение медицинского персонала, равное 1 чел.-Гр на 1 млн человек в год, является малой долей облучения населения в медицинских целях. Коллективная глобальная доза от медицинских процедур равна $5 \cdot 10^5$ чел.-Гр в год.

Ядерные взрывы отличаются разнообразием условий их проведения и различиями в поведении радионуклидов в окружающей среде, что связано с метеорологическими условиями, высотой подъема радиоактивного облака и пр.

11.4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующие излучения представляют серьезную опасность для живых организмов биосферы, в особенности для человека. В современных условиях человек подвергается облучению от весьма многообразных источников ионизирующего излучения, многие из которых представляют реальную радиационную опасность. Облучение — это воздействие на человека ионизирующего излучения.

Техногенное облучение — это облучение от техногенных источников как в нормальных, так и в аварийных условиях, за исключением медицинского облучения пациентов.

Доза облучения, создаваемая антропогенными источниками, невелика по сравнению с естественным фоном ионизирующего облучения, что достигается применением средств коллективной защиты промышленных источников излучения. В тех случаях, когда на объектах экономики нормативные требования и правила радиационной безопасности не соблюдаются, уровни ионизирующего воздействия резко возрастают.

Энергия ионизирующих излучений достаточна для того, чтобы вызвать деструкцию атомных и молекулярных связей в живой клетке, что очень часто и приводит к ее гибели. Чем интенсивнее процесс ионизации в живой ткани, тем больше биологическое воздействие этого излучения на живой организм. В результате сложных биофизических процессов, возникающих под воздействием ионизирующих излучений, в организме образуются разного рода радикалы, которые, в свою очередь, могут образовывать различные соединения, не свойственные здоровой ткани.

Радиационное воздействие на персонал и население в зоне радиоактивного загрязнения характеризуется величинами доз внешнего и внутреннего облучения людей.

Внешнее облучение вызывают источники рентгеновского и γ -излучения, потоки протонов и нейтронов.

Внутреннее облучение вызывают α - и β -частицы, которые попадают в организм человека через органы дыхания и пищеварительный тракт. Эти источники образуются в критических (наиболее чувствительных) органах и тканях. Внутреннее облучение происходит за счет источников α -, β - и γ -излучения. При внутреннем облучении происходит накопление радиоактивных веществ (РВ) в критических органах (органах, накопление изотопов в которых приводит к наиболее сильному поражению организма).

По чувствительности критические органы разделяются на три группы: I группа — гонады, костный мозг, все тело; II группа — щитовидная железа, жировая ткань, печень, хрусталик глаза, желудок, легкие; III группа — кожа, костная ткань, кисти, стопа.

Наиболее опасным видом облучения является внутреннее, так как в органах дыхания задерживается 75 % радиоактивных веществ из воздуха, которые затем поступают в желудочно-кишечный тракт. Впоследствии радионуклиды перераспределяются в критические органы организма человека, некоторые (радий, стронций) остаются в организме надолго. При этом идет постоянное накопление радиоактивных изотопов в критических органах.

Тяжесть поражения организма выше порога зависит от мощности дозы и растет с увеличением дозы по нелинейному закону.

Эффекты такого рода, связанные с потерей функции органа, носят название *соматических* или *детерминированных*, т. е. клинически выявляемых вредных биологических эффектов, вызванных ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше — тяжесть эффекта зависит от дозы.

Если же в результате облучения клетка не погибла, а изменилась, то после некоторой задержки (латентного периода) может образоваться совокупность поврежденных клеток и возникает злокачественное новообразование — рак. Вероятность возникновения злокачественных новообразований приблизительно пропорциональна дозе. Описанные беспороговые эффекты называются *стохастическими*, что указывает на их статистический характер.

В случае повреждения клетки, функция которой состоит в передаче последующим поколениям генетической информации, радиа-

ционные эффекты различной степени тяжести проявляются в потомстве облученных лиц. Стохастические эффекты описанного типа называются *генетическими (наследуемыми)*.

Различают профессиональное облучение, медицинское облучение и облучение населения.

В понятие «профессиональное облучение» включаются те виды облучения от техногенных источников, которые происходят во время работы.

В понятие «медицинское облучение» входит облучение, связанное с медицинской диагностикой и лечением.

Под облучением населения понимаются все виды облучения, кроме профессионального и медицинского.

Живые организмы постоянно подвергаются облучению за счет естественного фона. Фоновое радиоактивное излучение состоит в основном из трех составляющих: природного фона, вызванного радионуклидами биосферы; техногенного фона, вызванного деятельностью человека; рентгенодиагностики.

Средняя годовая эквивалентная доза фонового радиоактивного излучения составляет примерно $2,4...2,5 \cdot 10^{-3}$ Зв:

внутреннее облучение — примерно $1,35 \cdot 10^{-3}$ Зв;

источники земного происхождения — $0,35 \cdot 10^{-3}$ Зв;

космическое излучение — $0,3 \cdot 10^{-3}$ Зв;

рентгенодиагностика — $(0,35...0,4) \cdot 10^{-3}$ Зв;

прочие — $(2...5) \cdot 10^{-5}$ Зв.

Заболевания, вызванные воздействием ионизирующих излучений, делятся на две группы: острые и хронические.

Острое лучевое поражение возникает при облучении большими дозами за короткое время.

Хроническая лучевая болезнь возникает при облучении малыми дозами в течение длительного времени и бывает как общей, так и местной. Их развитие происходит в скрытой форме.

При однократном общем облучении могут быть следующие последствия:

менее 0,5 Зв — отсутствие клинических симптомов;

0,5...1,0 Зв — незначительное недомогание;

1,0...2,0 Зв — легкая степень лучевой болезни;

2,0...4,0 Зв — тяжелая степень лучевой болезни;

6,0 Зв и более — крайне тяжелая степень (часто с летальным исходом).

Следствием облучения могут быть лейкомия и злокачественные новообразования — рак легких, молочной железы, кожи, саркома и пр.

Возможными последствиями облучения являются поражение хрусталика, появление катаракт.

Под действием радиации возникают мутации — повреждения генетического материала.

При попадании радионуклидов внутрь организма (при вдыхании, с пищей или при проникновении через кожу) возможно нежелательное воздействие их излучения на различные органы и ткани. При внутреннем облучении наиболее опасно воздействие изотопов плутония и полония. Радиоактивные изотопы могут избирательно накапливаться в определенных органах. Получена ориентировочная оценка относительной значимости риска соматических, стохастических и генетических эффектов в различных интервалах доз для разных радиационных условий (табл. 11.3).

Таблица 11.3. Последствия облучения в зависимости от дозы

Дозы, Гр	Последствия облучения
0...0,005	Соматические повреждения отсутствуют. Частота стохастических и генетических эффектов, связанных с последствиями облучения, значительно меньше частоты этих эффектов естественного происхождения
0,005...0,05	Отсутствуют клинически выраженные соматические эффекты. Стохастические и генетические эффекты облучения происходят с частотой, меньшей частоты этих эффектов естественного происхождения
0,05...0,5	Наблюдаются клинически слабо выраженные соматические эффекты. Частота стохастических и генетических эффектов, связанных с последствиями облучения, сопоставима с естественной частотой этих эффектов
0,5...1,5	Наблюдаются соматические эффекты, выражающиеся в нарушении работоспособности, продромальных реакциях, велика вероятность лучевой болезни. Частота сравнительно малой тяжести стохастических и генетических эффектов — последствий облучения, значительно больше частоты таких эффектов естественного происхождения
1,5...3,0	Соматические последствия облучения выражаются в интенсивных продромальных реакциях, потере работоспособности, лучевой болезни средней или высокой тяжести. Риск летального исхода велик в конце интервала
3,0...6,0	Тяжелая форма лучевой болезни, высокая вероятность смерти (50 % и более)

Дозовой границей, разделяющей сравнительно безопасные в радиационном отношении уровни облучения от радиационно опасных, является доза, равная 0,5 Гр, что соответствует для рентгеновского и γ -излучений эффективной дозе 0,5 Зв, которая допускается при возникновении аварийных (чрезвычайных) ситуаций. В интервале до 0,5 Гр радиационный риск связан в значительной мере с риском злокачественных новообразований.

С целью сравнительной оценки масштабов облучения человека в табл. 11.4 приведены в относительных единицах обобщенные ориентировочные данные об ожидаемых глобальных дозах от различных источников ионизирующего излучения.

Таблица 11.4. Ожидаемая глобальная коллективная доза от различных источников радиации в течение одного года

Источник радиационного воздействия	Ожидаемая глобальная доза, отн. ед.
Облучение от естественных источников ионизирующих излучений	1,0
Использование радиации в медицинской диагностике	0,2
Облучение потребительскими товарами, испускающими радиацию	10^{-2}
Производство ядерной энергии при современной установленной мощности $8 \cdot 10^4$ МВт	$2 \cdot 10^{-3}$
Воздушные путешествия	10^{-3}
Использование фосфатных удобрений, производимых при современной интенсивности производства	10^{-4}
Глобальное производство электроэнергии на угольных электростанциях при современной установленной мощности 10^6 МВт	$5 \cdot 10^{-5}$

Согласно данным табл. 11.4, наибольшую долю в глобальную дозу вносят естественные источники ионизирующего излучения. Облучение, связанное с технологически повышенным естественным радиационным фоном, приводит к значительно меньшим глобальным дозам.

Из искусственных источников основной вклад в глобальную дозу вносят источники облучения, применяемые в медицине, главным

образом источники рентгеновского излучения, используемые для диагностики. Поэтому весьма актуальна задача создания нового поколения рентгеновской диагностической аппаратуры, обеспечивающей более низкий уровень облучения пациентов.

11.5. НОРМИРОВАНИЕ УРОВНЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Нормирование ионизирующих излучений определяется характером воздействия ионизирующей радиации на организм человека.

В России в 1999 г. были введены Санитарные правила радиационной безопасности СП 2.6.1.758—99 «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ—99)» и Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности СП 2.6.1.799—99 (ОСПОРБ—99), основанные на международных нормах.

Нормы радиационной безопасности НРБ-99 применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения любого происхождения.

НРБ—99 включают в себя определения и термины радиационной безопасности, устанавливают основные дозовые пределы, ПДК радиоактивных веществ в воздушной зоне, в воде открытых водоемов, допустимое содержание радиоактивных веществ в органах и т. п.

На основании нормативных требований санитарные правила СП 2.6.1.799 — 99 устанавливают порядок проведения работ с источниками ионизирующих излучений и обеспечения ликвидации радиоактивных отходов.

Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;

в результате радиационной аварии;

от природных источников излучения;

при медицинском облучении.

Норма радиационной безопасности основана на следующих принципах: не превышать установленный дозовый предел; исключить необоснованное облучение; снизить дозу облучения до возможного низкого уровня.

Требования по обеспечению радиационной безопасности сформулированы для каждого вида облучения. Суммарная доза от всех видов облучения используется для оценки радиационной обстанов-

ки и ожидаемых медицинских последствий, а также для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности.

Требования НРБ—99 и ОСПОРБ—99 не распространяются на источники излучения, создающие при любых условиях обращения с ними индивидуальную годовую эффективную дозу не более 10 мЗв; индивидуальную годовую эквивалентную дозу в коже не более 50 мЗв и в хрусталике не более 15 мЗв; коллективную эффективную годовую дозу не более 1 чел.-Зв, либо когда при коллективной дозе более 1 чел.-Зв оценка по принципу оптимизации показывает нецелесообразность снижения коллективной дозы.

Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц: персонал — лица, работающие с техногенными источниками (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б); все население, включая лиц из персонала вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для предотвращения нежелательных последствий соматических эффектов значения эквивалентной дозы должны устанавливаться столь малыми, чтобы пороговая доза не достигалась за время трудовой деятельности человека либо же за всю его жизнь. В табл. 11.5 приведены сведения об основных дозовых пределах облучения, устанавливаемых НРБ—99.

Таблица 11.5. Основные дозовые пределы облучения

Нормируемые величины	Дозовые пределы, мЗв	
	Лица из персонала (группа А)	Лица из населения
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в:		
хрусталике	150	15
коже	500	50
кистях и стопах	500	50

Дозы облучения, как и все остальные допустимые производные уровни, персонала группы Б не должны превышать 1/4 значений для персонала группы А.

В международной практике пределы эффективной дозы от внешнего облучения для профессионалов устанавливаются равными 20 мЗв в год при усреднении за 5 лет (100 мЗв за пять лет) с дополнительным условием, что за любой отдельный год значение эффективной дозы не превысит 50 мЗв. Для населения предел эффективной дозы от внешнего облучения рекомендуется в 1 мЗв в год.

При внутреннем облучении предел дозы устанавливается исходя из условия, что поступления за 50 лет составят эффективную дозу, равную 20 мЗв, причем оценочные поступления для обеспечения определенной гибкости могут усредняться за период в 5 лет.

Указанные ограничения эффективной дозы гарантируют недопущение детерминированных (соматических) эффектов во всех тканях и органах тела, кроме хрусталиков глаз и кожи. Годовые пределы эквивалентной дозы установлены для хрусталиков глаз равными 150 мЗв (профессионалы) и 15 мЗв (население), а для кожи — 500 мЗв (профессионалы) и 50 мЗв (население). Кроме того, при профессиональном облучении для рук и ног вводится годовой предел дозы, равный 500 мЗв.

При возникновении аварийных (чрезвычайных) ситуаций допускается увеличение эффективной дозы на организм в целом приблизительно до уровня 0,5 Зв, а на кожу — эквивалентной дозы примерно до 5 Зв на период немедленных и неотложных работ по ликвидации аварии.

НРБ—99 устанавливают также допустимые уровни мощности поглощенной дозы при внешнем облучении всего тела от техногенных источников ионизирующего излучения. В рабочих помещениях, предназначенных для пребывания персонала, допустимые уровни равны 10 мкГр/ч, а в жилых помещениях и в пределах территорий постоянного нахождения лиц из населения — 0,1 мкГр/ч. Приведенные уровни мощности дозы не включают мощность дозы от естественного радиационного фона.

В реальных условиях на человека могут воздействовать несколько радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений, создавая при этом внешнее и внутреннее облучение.

Для контроля за эффективными и эквивалентными дозами облучения, регламентированными НРБ—99 и СП 2.6.1.799—99 (ОСПОРБ—99), вводится система дополнительных производных нормативов от пределов доз в виде допустимых значений: мощности дозы, годового поступления радионуклидов в организм и других показателей.

Поскольку производные нормативы при техногенном облучении рассчитаны для однофакторного воздействия и каждый из них исчерпывает весь предел дозы, то их использование должно быть основано на условии непревышения единицы суммой отношений всех контролируемых величин к их допустимым значениям.

При совместном действии внешнего и внутреннего облучения для каждого критического органа должно соблюдаться условие:

$$\frac{H_{\Sigma}}{ПД} + \sum_j \frac{P_j}{ПГП_j} + \sum_k \frac{P_k}{ПГП_k} \leq 1;$$

$$\frac{H_{\Sigma}}{ДМД_B} + \sum_j \frac{c_j}{ДК_{Bj}} + \sum_k \frac{c_k}{ДК_{Bk}} \leq 1,$$

где H_{Σ} — среднегодовая мощность максимальной эквивалентной дозы; ПД — предел дозы; P_j — среднегодовое поступление j -го радионуклида в органы дыхания; ПГП $_j$ — предел годового поступления j -го радионуклида через органы дыхания и пищеварения; P_k — среднегодовое поступление k -го радионуклида с рационом; ПГП $_k$ — предел годового поступления k -го радионуклида с рационом; ДМД $_B$ — допустимая мощность дозы для лиц категории Б; c_j — среднегодовая концентрация j -го радионуклида в воздухе зоны; ДК $_{Bj}$ — допустимая объемная концентрация радионуклида в атмосферном воздухе; c_k — среднегодовая концентрация k -го радионуклида в рационе; ДК $_{Bk}$ — допустимая объемная концентрация радионуклида в воде.

В настоящее время широко используется понятие риска от радиационного воздействия. Для оценки состояния радиационной безопасности используется показатель радиационного риска. В наибольшей степени этот риск характеризует суммарная накопленная эффективная доза от всех источников излучения. Значимость каждого источника излучения следует оценивать по его вкладу в суммарную эффективную дозу.

Радиационный риск можно рассматривать как вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

Применительно к лицам, профессионально работающим с источниками ионизирующих излучений, риск неблагоприятных последствий от облучения не должен быть выше уровня риска в большинстве других профессий с высоким стандартом безопасности.

Для лиц из населения, не работающих профессионально с излучениями, риск, связанный с облучением от искусственных источ-

ников радиации, не должен превышать других видов риска неблагоприятных последствий, которые можно считать приемлемыми в обычной жизни.

Количественной мерой индивидуального риска неблагоприятных последствий считается средняя вероятность гибели человека от конкретной причины за единицу времени, называемая *риском смерти* или просто *риском*.

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

Уровень пренебрежимого риска разделяет область оптимизации риска и область безусловно приемлемого риска и составляет $1 \cdot 10^{-6}$.

11.6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Главной целью радиационной защиты является предотвращение вредных последствий соматических, стохастических и генетических эффектов до некоторого уровня, который можно считать приемлемым. Ему отвечают нормированные пределы доз (ПД). Дополнительная цель заключается в обосновании целесообразности деятельности, связанной с облучением.

Под *радиационной безопасностью* понимается комплекс мероприятий, обеспечивающий защиту персонала и населения от вредного воздействия ионизирующих излучений и радиоактивных загрязнений при эксплуатации радиационно-опасных объектов или работе с радиоактивными веществами.

Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей природной среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нормирование) и требования радиационной защиты, установленные Федеральным законом «О радиационной безопасности населения», НРБ—99 и действующими санитарными правилами ОСПОРБ—99.

Радиационная безопасность населения — это состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

Основные принципы радиационной безопасности реализуются: уменьшением мощности источников излучения до минимальных величин (защита количеством);

ограничением поступления радионуклидов в окружающую среду;

сокращением времени работы с источниками (защита временем);
увеличением расстояния от источника до работающих (защита расстоянием);

экранированием источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение (защита экранами);

проведением комплекса организационно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Радиационная безопасность населения обеспечивается:

созданием условий жизнедеятельности людей, отвечающих требованиям НРБ—99 и правил ОСПОРБ—99;

установлением квот на облучение от разных источников излучения;

организацией радиационного контроля;

эффективностью планирования и проведения мероприятий по радиационной защите в нормальных условиях и в случае радиационной аварии;

организацией системы информации о радиационной обстановке.

Требования по обеспечению радиационной безопасности населения распространяются на регулируемые природные источники излучения: изотопы радона и продукты их распада в воздухе помещений, γ -излучение природных радионуклидов, содержащихся в строительных изделиях, природные радионуклиды в питьевой воде, удобрениях и полезных ископаемых.

Относительную степень радиационной безопасности населения характеризуют следующие значения эффективных доз от природных источников излучения:

менее 2 мЗв/год — облучение не превышает средних значений доз для населения страны от природных источников излучения;

от 2 до 5 мЗв/год — повышенное облучение;

более 5 мЗв/год — высокое облучение.

Мероприятия по снижению высоких уровней облучения должны осуществляться в первоочередном порядке.

11.6.1. Методы радиационной защиты от ионизирующих излучений

Наиболее простые способы уменьшения вреда от воздействия радиации состоят либо в уменьшении времени облучения, либо в уменьшении мощности источника, либо же в удалении от него на расстояние r , обеспечивающее безопасный уровень облучения (до предела или ниже эффективной дозы). Интенсивность излучения в

воздухе при удалении от источника даже без учета поглощения уменьшается по закону $1/r^2$.

Если же перечисленные приемы по каким-либо причинам неосуществимы или недостаточны, то следует применять материалы, эффективно ослабляющие излучение.

Проходя через вещество защиты, рентгеновское излучение ослабляется. Ослабление мощности дозы монохроматического рентгеновского излучения в условиях узкого параллельного пучка подчиняется закону

$$\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu d}, \quad (11.4)$$

где $\dot{X}_0$ — мощность экспозиционной дозы в отсутствие защиты, Кл/(кг · с); $\dot{X}$ — мощность экспозиционной дозы за защитой, Кл/(кг · с); μ — полный линейный коэффициент ослабления, см⁻¹; d — толщина материала защиты, см.

На практике приходится иметь дело с широкими пучками рентгеновских лучей ввиду того, что, проходя через материал защиты, излучение рассеивается, и кванты рассеянного излучения могут попасть в детектор излучения (датчик) или облучаемый объект, стоящий за защитой. Таким образом, ослабление мощности дозы будет происходить медленнее, и толщина защитного экрана должна быть больше.

Рассеянное излучение, возникающее в защите, учитывается с помощью сомножителя B_d , который называется *фактором накопления*. Он определяется как отношение экспозиционной дозы, созданной в точке детектирования (т. е. в точке, где размещается измерительный прибор) излучением всех энергий (первичных и рассеянных), к экспозиционной дозе, созданной только первичными нерассеянными квантами.

Величина фактора накопления зависит от начальной энергии E γ - и рентгеновского излучения, от атомного номера z поглотителя и его толщины d .

В условиях широкого пучка закон ослабления излучения записывается в виде

$$\dot{X} = B_d \dot{X}_0 e^{-\mu d}, \quad (11.5)$$

где $B_d(E, z, \mu, d)$ — дозовый фактор накопления.

В табл. 11.6 приведены дозовые факторы накопления для плоского мононаправленного источника и защиты конечной толщины для некоторых материалов.

**Таблица 11.6. Дозовые факторы накопления
для плоского источника и защиты конечной толщины**

Материал	Энергия γ -квантов E , МэВ	μ , см ⁻¹	Дозовый фактор накопления B_d при μd			
			1	4	10	20
Вода	0,05	0,20	4,42	22,6	90,9	323
	0,50	0,10	2,44	12,8	62,9	252
	1,0	0,07	2,08	7,68	26,1	74,0
	5,0	0,03	1,57	3,16	6,27	11,41
	10,0	0,02	1,37	2,25	3,86	6,38
Алю- миний	0,05	0,86	1,70	6,20	12,0	19,0
	0,50	0,22	2,37	9,47	38,9	141
	1,0	0,16	2,02	6,57	21,2	58,5
	5,0	0,08	1,48	2,96	6,19	11,9
	10,0	0,06	1,28	2,12	3,96	7,32
Свинец	0,05	82,1	—	—	—	—
	0,50	1,70	1,24	1,69	2,27	2,73
	1,0	0,77	1,37	2,26	3,74	5,86
	5,0	0,48	1,21	2,08	5,55	23,6
	10,0	0,55	1,11	1,58	4,34	39,2

Как видно из таблицы, дозовый фактор накопления всегда больше единицы и возрастает с ростом показателя экспоненты в (11.5); особенно он велик для воды при μd , равным или большим 10. Факторы накопления могут достигать в ряде случаев и больших значений, равных нескольким сотням.

Тормозное рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр, т. е. является излучением немонахроматическим. Проходя через защитный слой, такое излучение меняет свой спектральный состав, поэтому при расчете защиты делается допущение, что немонахроматическое излучение, возбуждаемое при напряжении $U_{\max}$, ослаб-

**Таблица 11.7. Толщина защитного слоя из свинца (мм) и бетона (см)
в зависимости от анодного напряжения U для различных значений кратности ослабления K**

Кратность ослабления К	U_{max} , кВ															
	75		100		125		150		175		200		250		301	
	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон
0,001	—	—	—	—	0,5	—	0,5	—	1,0	—	1,0	—	1,5	—	2,0	—
0,002	—	—	0,5	—	0,5	—	1,0	—	1,25	—	1,25	—	2,0	—	3,0	—
0,003	0,5	0,5	—	—	0,75	—	1,0	—	1,5	—	1,5	—	2,5	—	4,0	—
0,005	0,5	0,75	—	—	1,0	—	1,25	—	1,75	—	2,0	—	3,0	—	4,5	—
0,01	0,75	1,0	7,0	10	1,25	10	1,5	14	2,0	17	2,25	18	3,5	20	6,0	26
0,02	1,0	1,0	8,5	14	1,5	14	1,75	15	2,0	17	2,5	20	4,0	23	7,2	29
0,03	1,0	1,25	10	14	1,5	14	2,0	17	2,5	21	2,75	22	4,5	24	8,3	31
0,05	1,25	1,5	12	15	1,75	15	2,0	18	2,5	22	3,0	24	5,0	27	10	34
0,1	1,25	1,5	13	16	1,75	16	2,25	20	2,75	23	3,5	27	5,75	30	11,5	37

0,2	1,5	1,75	14	2,0	16	2,5	22	3,0	25	3,75	30	6,5	34	13	40
0,3	1,5	2,0	16	2,25	18	2,75	23	3,25	27	4,0	31	7,0	35	13,5	41
0,5	1,75	2,25	17	2,5	20	3,0	25	3,5	28	4,5	32	7,5	37	14,5	43
1	2,0	2,5	18	2,75	22	3,25	27	3,75	30	5,0	35	8,5	40	16,5	46
2	2,25	2,75	21	3,0	24	3,5	29	4,25	33	5,5	38	9,5	43	18	49
3	2,5	2,75	—	3,25	—	4,0	—	4,5	—	5,75	—	10	—	19	—
5	2,75	3,0	22	3,5	30	4,25	34	5,0	36	6,0	40	10,5	46	20	52
10	2,75	3,25	24	3,75	32	4,5	30	5,2	38	6,5	43	11,5	49	21,5	56
20	3,0	3,5	25	4,0	34	4,75	40	5,75	43	7,0	46	12	52	23,5	60
30	3,0	3,5	—	4,25	—	5,0	—	6,0	—	7,5	—	13	—	24,5	—
50	3,25	3,75	27	4,5	36	5,25	42	6,5	45	7,75	48	13,5	57	25,5	62
100	3,5	4,0	30	4,75	38	5,5	43	6,75	47	8,25	50	14	58	27	65

ляется так же, как монохроматическое с $\lambda_{эф} = 3/2\lambda_{мин}$, соответствующее напряжению $3/2U_{max}$.

При сравнительно мягком излучении толщина защиты должна определяться для максимального значения напряжения. При этом необходимо учитывать, что в области энергий квантов 88 кэВ имеется скачок поглощения у свинца. Это значит, что компоненты спектра рентгеновского излучения с энергией квантов от 88 до 60 кэВ проходят через свинцовую защиту так же, как компоненты с энергией квантов от 150 до 105 кэВ.

В табл. 11.7 приводятся толщины защитных слоев свинца и бетона, обеспечивающих ослабление мощности экспозиционной дозы нефльтрованного рентгеновского излучения до допустимой величины.

Коэффициент K (кратность ослабления) определяется из соотношения

$$K = \dot{X} / \dot{X}_{доп}, \quad (11.6)$$

где $\dot{X}$ — измеренная или рассчитанная мощность экспозиционной дозы в данной точке рабочего пространства, Кл/(кг · с); $\dot{X}_{доп}$ — допустимая мощность экспозиционной дозы, Кл/(кг · с).

Если рентгеновские излучения возбуждаются при постоянном напряжении, толщина защитного слоя должна быть увеличена на 10 %.

Необходимо также предусматривать защиту и от вторичного излучения, возникающего при рассеянии первичного излучения различными предметами, на которые оно падает. В табл. 11.8 приводятся значения толщины защитного слоя из свинца и бетона, обеспечивающего ослабление мощности дозы вторичного излучения до допустимой величины.

При расчете толщины защитных экранов рекомендуется вводить двукратный запас добротности защиты, т. е. увеличивать их толщину на один слой половинного ослабления $d_{0,5}$. Слой половинного ослабления — это защитный слой такой толщины, при которой доза или мощность дозы ослабляется в два раза. Значения толщины слоев половинного ослабления для различных напряжений приводятся в табл. 11.9.

В табл. 11.10—11.13 приводятся толщины защитных слоев из железа, свинца, стали и стекла ТФ-5, необходимые для ослабления сильно зафильтрованного пучка мягких рентгеновских лучей до допустимой мощности дозы.

Таблица 11.8. Толщина защитного слоя из свинца (мм) и бетона (см) от вторичного (рассеянного) излучения в зависимости от напряжения U для различных K

Кратность ослабления K	U, кВ											
	100		150		200		250		300			
	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон	Свинец	Бетон		
0,01	0,1	2,0	0,1	3,0	0,2	4,0	0,3	5,0	0,6	7,0		
0,02	0,2	3,5	0,3	4,5	0,5	6,5	0,8	7,5	1,2	9,5		
0,03	0,4	4,5	0,5	5,5	0,8	9,0	1,2	10	2,3	12		
0,05	0,5	5,5	0,8	8,0	1,0	12	1,5	12,5	3,0	14,5		
0,1	0,7	6,5	1,0	10	1,4	14	2,0	15	4,0	17		
0,2	0,9	8,0	1,2	12	1,8	17	2,7	18	5,0	20		
0,3	1,0	8,5	1,3	13	2,0	18	3,0	19	5,5	21		
0,5	1,2	10	1,5	14	2,2	19	3,5	21	6,3	22		
1	1,4	12	1,8	16	2,6	22	4,2	23	7,5	25		
2	1,6	13	2	18,5	3	25	5,0	26	9,0	28		
5	1,8	15	2,3	21	3,6	28	5,8	29	10,5	31		
10	2,1	17	2,6	23	4,1	30	6,5	32	12	34		
20	2,3	18	2,9	26	4,6	34	7,3	36	13,5	38		
50	2,5	20	3,2	28	5,1	37	8,0	39	15	41		
100	2,8	22	3,5	41	5,6	39	8,8	42	17	44		

**Таблица 11.9. Приблизительные значения толщины слоя
половинного ослабления $d_{0,5}$ свинца (мм) и бетона (см)
в зависимости от анодного напряжения U**

Материал	U , кВ				
	100	150	200	250	300
Свинец	0,2	0,3	0,5	0,9	1,7
Бетон	1,5	2,3	2,8	2,9	3,1

**Таблица 11.10. Толщина защитного слоя железа (мм)
для ослабления рентгеновского излучения
высоковольтных электронных приборов**

Кратность ослабления K	Напряжение на аноде электронного прибора, кВ								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
2	—	—	—	—	—	—	0,1	0,1	0,2
5	—	—	—	—	—	0,1	0,2	0,3	0,4
10	—	—	—	—	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
20	—	—	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
50	—	—	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,3
100	—	—	0,2	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,6
$2 \cdot 10^2$	—	—	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	1,3	2,0
$5 \cdot 10^2$	—	—	0,3	0,3	0,5	0,8	1,2	1,6	2,4
10^3	—	0,1	0,3	0,4	0,6	0,9	1,4	1,9	2,7
$2 \cdot 10^3$	—	0,1	0,3	0,4	0,7	1,1	1,6	2,2	3,1
$5 \cdot 10^3$	—	0,1	0,4	0,5	0,8	1,2	1,9	2,6	3,6
10^4	—	0,2	0,4	0,5	0,9	1,4	2,1	2,8	3,9
$2 \cdot 10^4$	—	0,2	0,4	0,6	1,0	1,5	2,3	3,1	4,3
$5 \cdot 10^4$	—	0,2	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,5	4,9

Кратность ослабления K	Напряжение на аноде электронного прибора, кВ								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
10^5	—	0,2	0,5	0,7	1,2	1,8	2,7	3,8	5,3
$2 \cdot 10^5$	—	0,2	0,5	0,8	1,3	1,9	2,9	4,1	5,7
$5 \cdot 10^5$	—	0,2	0,5	0,8	1,4	2,1	3,2	4,4	6,2
10^6	—	0,3	0,6	1,0	1,5	2,3	3,6	5,0	7,0
$5 \cdot 10^6$	—	0,3	0,6	1,0	1,6	2,5	3,8	5,4	7,5
10^7	—	0,3	0,7	1,1	1,7	2,6	4,0	5,7	7,9
$2 \cdot 10^7$	—	0,3	0,7	1,1	1,8	2,8	4,2	6,0	8,3
$5 \cdot 10^7$	—	0,3	0,7	1,2	1,9	2,9	4,5	6,4	8,7
10^8	0,1	0,3	0,8	1,2	2,0	3,1	4,7	6,6	9,2

**Таблица 11.11. Толщина защитного слоя свинца (мм)
для ослабления рентгеновского излучения
высоковольтных электронных приборов**

Кратность ослабления K	Напряжение на аноде электронного прибор, кВ						
	30	40	50	60	70	80	100
2	—	—	—	—	—	0,2	0,2
5	—	—	—	0,1	0,1	0,4	0,4
10	—	—	0,1	0,2	0,2	0,5	0,6
20	—	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,8
50	—	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	1,1
100	—	0,2	0,2	0,4	0,5	1,0	1,3
$2 \cdot 10^2$	—	0,2	0,3	0,5	0,6	1,2	1,5
$5 \cdot 10^2$	—	0,2	0,4	0,6	0,8	1,4	1,7

Кратность ослабления K	Напряжение на аноде электронного прибор, кВ						
	30	40	50	60	70	80	100
10^3	0,1	0,3	0,4	0,7	1,0	1,6	1,9
$2 \cdot 10^3$	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,7	2,1
$5 \cdot 10^3$	0,2	0,3	0,6	0,9	1,3	1,8	2,4
10^4	0,2	0,4	0,6	1,1	1,5	2,1	2,7
$2 \cdot 10^4$	0,2	0,4	0,7	1,2	1,6	2,3	2,9
$5 \cdot 10^4$	0,2	0,4	0,7	1,3	1,8	2,5	3,2
10^5	0,2	0,5	0,8	1,4	2,0	2,7	3,5
$2 \cdot 10^5$	0,3	0,5	0,9	1,5	2,1	2,8	3,7
$5 \cdot 10^5$	0,3	0,5	0,9	1,6	2,3	3,0	4,0
10^6	0,3	0,6	1,0	1,7	2,5	3,2	4,3
$2 \cdot 10^6$	0,3	0,6	1,0	1,8	2,6	3,4	4,6
$5 \cdot 10^6$	0,3	0,6	1,1	2,0	2,8	3,6	4,9
10^7	0,4	0,7	1,2	2,1	3,0	3,8	5,2
$2 \cdot 10^7$	0,4	0,7	1,3	2,2	3,1	3,9	5,4
$5 \cdot 10^7$	0,4	0,7	1,3	2,3	3,4	4,2	5,7
10^8	0,4	0,8	1,4	2,4	3,5	4,4	6,0

**Таблица 11.12. Толщина защитного материала (мм)
электронно-лучевых установок при анодном токе $i = 30$ мА**

Расстояние от анода, м	Напряжение на аноде, кВ				
	10	20	30	60	100
Свинец					
0,6	0,23	0,56	1,005	2,51	5,26
0,3	0,27	0,64	1,145	2,79	5,74

Расстояние от анода, м	Напряжение на аноде, кВ				
	10	20	30	60	100
<i>Сталь</i>					
0,6	0,23	2,2	4,1	10,3	33,0
0,3	0,27	2,5	4,7	11,8	35,5
<i>Стекло ТФ-5</i>					
0,6	0,56	2,7	5,0	12,5	33,0
0,3	0,66	3,0	6,2	13,8	35,5

**Таблица 11.13. Толщина защитного слоя (мм)
электронно-лучевых установок при анодном токе $i = 5$ мА**

Расстояние от анода, м	Напряжение на аноде, кВ				
	10	20	30	60	100
<i>Свинец</i>					
0,6	0,38	0,86	1,53	3,56	7,06
0,3	0,42	0,94	1,67	3,84	7,54
<i>Сталь</i>					
0,6	0,38	3,36	6,25	15,2	45,0
0,3	0,42	3,68	6,85	16,3	47,5
<i>Стекло ТФ-5</i>					
0,6	1,9	4,3	7,6	17,8	45,0
0,3	2,1	4,7	8,3	19,2	47,5

Пример 11.1. Определить толщину свинцового экрана для защиты от рентгеновских лучей, излучаемых клистроном. Величина мощности экспозиционной дозы неэкранированного клистрона

$$\dot{X} = 2,56 \cdot 10^3 \text{ мкР/с} = 2,56 \cdot 10^{-3} \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/(кг} \cdot \text{с)}.$$

Решение. Мощность экспозиционной дозы вблизи защитного экрана не должна превышать

$$\dot{X}_{\text{доп}} = 0,08 \text{ мкР/с} = 8 \cdot 10^{-8} \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} = 2,05 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/(кг} \cdot \text{с)}.$$

При этих условиях кратность ослабления

$$K = \dot{X} / \dot{X}_{\text{доп}} = 6,6 \cdot 10^{-7} / 2,05 \cdot 10^{-11} = 3,2 \cdot 10^4.$$

Из табл. 11.10 находим, что толщина свинца для $K = 3,2 \cdot 10^4$ и $U = 100 \text{ кВ}$ примерно равна 3 мм.

Выбор защитного экрана зависит от вида ионизирующего излучения.

Защита от α - и β -частиц. Для защиты от α -излучения применяют экраны из стекла, плексигласа толщиной в несколько миллиметров или слой воздуха в несколько сантиметров.

При β -излучении используют материалы с малой атомной массой (например, алюминий), а чаще комбинированные (со стороны источника — материал с малой, а далее от источника — материал с большей атомной массой).

Особенно простой является защита от α - и β -частиц, так как их пробеги в веществе относительно невелики. Так, полное поглощение α -частиц, испускаемых α -активными препаратами, обеспечивается слоем воздуха толщиной 8...9 см или листом бумаги. Пробег β -частиц в воздухе значительно больше, например при энергии β -частиц более 3 МэВ он превышает 3 м. Тем не менее препараты, испускающие β -частицы, достаточно экранировать не слишком массивной защитой. Например, от потока β -частиц с энергиями до 4 МэВ надежно защищает слой пластмассы толщиной 0,25 см.

Защита от γ -излучения. Для γ -квантов и нейтронов, проникающая способность которых значительно выше, необходима более массивная защита.

Для защиты от γ -излучений применяют материалы с большой атомной массой и высокой плотностью (свинец, вольфрам), а также более дешевые материалы и сплавы (сталь, чугун). Стационарные экраны выполняют из бетона.

Ослабление пучка γ -квантов, проходящих защиту, не рассеиваясь в ней (такой пучок называется узким), описывается экспоненциальным законом:

$$N = N_0 e^{-\mu d}, \quad (11.7)$$

где N_0 и N — интенсивность излучения без защиты и за защитой толщиной d ; μ — линейный коэффициент ослабления, зависящий от энергии частиц и применяемый для защиты материала.

Удобно представить формулу (11.7) в несколько ином виде:

$$N = N_0 e^{-\mu/\lambda}, \quad (11.8)$$

где λ — толщина материала, ослабляющего пучок в e раз; λ называют *длиной релаксации*. Значения длины релаксации λ , см, для γ -квантов с энергией 1 МэВ зависят от применяемых материалов: вода — 14,2; алюминий — 6,06; железо — 2,14; свинец — 1,30.

Защиту от γ -излучения препаратов кобальта-60, стронция-137 рассчитывают, используя данные, приведенные в табл. 11.14.

Таблица 11.14. Зависимость толщины защиты d (см) от кратности ослабления для γ -излучения кобальта-60

Кратность ослабления K	Кобальт-60			
	Свинец	Железо	Бетон	Вода
2	1,55	3,5	13,6	26,5
5	3,35	7,0	25,0	51,5
10	4,6	9,8	32,5	67,0
20	5,8	11,3	39,5	81,0
50	7,3	14,0	48,5	99,0
10^2	8,5	16,0	55,0	113,0
$2 \cdot 10^2$	9,7	18,0	61,5	126,0
$5 \cdot 10^2$	11,3	20,7	70,0	143,0
10^3	12,5	22,6	76,0	156,0
$2 \cdot 10^3$	13,7	24,5	82,5	168,0
$5 \cdot 10^3$	15,2	27,1	91,0	184,0
10^4	16,4	28,9	97,0	196,0
$2 \cdot 10^4$	17,5	30,8	103,0	209,0
$5 \cdot 10^4$	19,0	33,3	111,5	225,0
10^5	20,2	35,2	118,0	237,0
$2 \cdot 10^5$	21,3	37,0	124,0	250,0

Кратность ослабления K	Кобальт-60			
	Свинец	Железо	Бетон	Вода
$5 \cdot 10^5$	22,8	39,5	132,5	266,0
10^6	24,0	41,4	138,5	278,0
$2 \cdot 10^6$	25,1	43,2	145,0	290,0
$5 \cdot 10^6$	26,6	45,7	153,0	307,0
10^7	27,8	47,6	159,5	319,0
$2 \cdot 10^7$	28,9	49,5	166,0	331,0
$5 \cdot 10^7$	30,4	52,0	174,0	348,0
10^8	31,6	53,9	180,5	360,0
$2 \cdot 10^8$	32,7	55,8	187,0	372,0
$5 \cdot 10^8$	34,3	58,3	196,0	389,0
10^9	35,4	60,2	201,5	401,0
$2 \cdot 10^9$	36,6	62,1	207,5	414,0
$5 \cdot 10^9$	38,1	64,6	216,0	430,0
10^{10}	39,3	66,5	222,5	443,0

Связь между мощностью поглощенной дозы γ -излучения в воздухе и активностью радионуклида определяют по формуле

$$\dot{D} = \frac{\Gamma A}{r^2}, \quad (11.9)$$

где $\dot{D}$ — мощность поглощенной дозы, аГр/с; Γ — керма-постоянная радионуклида, аГр $\cdot$ м²/(с $\cdot$ Бк); A — активность радионуклида, Бк; r — расстояние от изотропного источника до приемника, м.

Пример 11.2. Рассчитать необходимую толщину бетонной защиты от точечного источника кобальта-60 активностью $A = 5,28 \cdot 10^{18}$ Бк, керма-постоянная источника $\Gamma = 44,21$ аГр $\cdot$ м²/(с $\cdot$ Бк). Расстояние от источника до наружной поверхности стены $r = 4$ м. Допустимая мощность поглощенной дозы в смежном помещении (лица категории Б) $\dot{D}_0 = 7,8 \cdot 10^{10}$ аГр/с.

Решение. По формуле (11.9)

$$\dot{D} = 44,21 \cdot 5,28 \cdot 10^{18} / 4^2 = 1,46 \cdot 10^{19} \text{ аГр/с.}$$

По аналогии с формулой (11.6) имеем

$$K = \dot{D}/\dot{D}_0 = 1,46 \cdot 10^{19}/7,8 \cdot 10^{10} = 1,87 \cdot 10^8,$$

где $\dot{D}$ и $\dot{D}_0$ — допустимые значения мощности поглощенной дозы и поглощенной дозы соответственно.

По табл. 11.14 получим толщину защиты $d = 185,5$ см. Введем коэффициент запаса — 5 % рассчитанной толщины. С учетом этого коэффициента толщина защиты $d = 195$ см.

Пример 11.3. Спроектировать защиту из свинца от γ -излучения точечного изотропного источника кобальта-60 активностью

$$A = 10 \text{ мКи} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} = 3,7 \cdot 10^8 \text{ Бк},$$

керма-постоянная источника $\Gamma = 44,21 \text{ аГр} \cdot \text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{Бк})$. Расстояние до рабочего места $r = 1$ м. Время работы $t = 6$ ч в день.

Решение. Определим по формуле (11.9) мощность поглощенной дозы:

$$\dot{D} = \frac{\Gamma A}{r^2} = \frac{44,21 \cdot 3,7 \cdot 10^8}{1^2} = 1,636 \cdot 10^{10} \text{ аГр/с}.$$

Величина поглощенной дозы за время $t = 6$ ч составит:

$$D = \dot{D}t = 1,636 \cdot 10^{10} \cdot 6 \cdot 3600 = 3,534 \cdot 10^{14} \text{ аГр} = 3,534 \cdot 10^{-4} \text{ Гр}.$$

В соответствии с НРБ—99 эффективная (эквивалентная) доза для лиц из персонала (группа А) в среднем равна $H_0 = 20$ мЗв в год. Поскольку $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр}$, то эквивалентная доза $H = D$, т. е. $H = 3,534 \cdot 10^{-4} \text{ Зв}$.

Эффективная доза за рабочий день при условии, что в одном месяце содержится в среднем 21,4 рабочих дня, составит:

$$H_0 = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{21,4 \cdot 12} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ Зв/день}.$$

Определим кратность ослабления излучения защитой из свинца:

$$K = H/H_0 = 3,534 \cdot 10^{-4}/7,8 \cdot 10^{-5} = 4,53.$$

Примем с запасом $K = 5$.

По табл. 11.14 определим толщину защиты из свинца: $h = 3,35$ см.

Коэффициент защиты без учета рассеянного излучения:

$$k_w = \dot{D}^+/\dot{D}^- \cong e^{\mu d}, \quad (11.10)$$

где $\dot{D}^+$ и $\dot{D}^-$ — мощность поглощенной дозы при отсутствии и наличии защиты, аГр/с; μ — линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ; d — толщина материала защиты, см.

Эффективность радиационной защиты, дБ, в этом случае можно найти по формуле

$$\epsilon = 10 \lg k_w \cong 4,34 \mu d. \quad (11.11)$$

С учетом рассеянного излучения коэффициент и эффективность защиты равны:

$$k_w = e^{\mu d} / B_d; \quad (11.12)$$

$$\epsilon = 4,34 \mu d - 10 \lg B_d, \quad (11.13)$$

где B_d — дозовый фактор накопления.

Пример 11.4. Определить коэффициент и эффективность защиты для свинцового экрана толщиной $d = 13$ см и линейным коэффициентом ослабления $\mu = 0,77 \text{ см}^{-1}$ при работе с радионуклидным источником с энергией γ -квантов $E = 1,0$ МэВ.

Решение. Коэффициент и эффективность защиты без учета рассеянного излучения определим по формулам (11.10) и (11.11):

$$k_w = e^{\mu d} = e^{0,77 \cdot 13} = 2,2 \cdot 10^4;$$

$$\epsilon = 4,34 \mu d = 4,34 \cdot 0,77 \cdot 13 = 43,4 \text{ дБ.}$$

С учетом рассеянного излучения коэффициент и эффективность защиты определим по формулам (11.12) и (11.13), пользуясь табл. 11.6:

$$k_w = e^{\mu d} / B_d = e^{0,77 \cdot 13} / 3,74 = 5,9 \cdot 10^3;$$

$$\epsilon = 4,34 \mu d - 10 \lg B_d = 4,34 \cdot 0,77 \cdot 13 - 10 \lg 3,74 = 37,7 \text{ дБ.}$$

Защита от ускоренных электронов. Для расчета радиационной защиты от ускоренных электронов необходимы следующие исходные данные: максимальная энергия ускоренных электронов E_0 , МэВ; средний ток электронов I_0 , мА; атомный номер материала защиты z , эффективный атомный номер материала мишени z_m , формы и размеры пучка электронов.

Расчет защиты сводится к определению пространственного распределения тормозного излучения в защите, оценке прохождения излучения через технологические каналы, щели и неоднородности в защите.

Мощность ПД тормозного излучения в воздухе с учетом углового распределения — $\dot{D}_0(\theta)$ (рад · м²/(мА · мин)) для различных материалов мишени в диапазоне энергий ускоренных электронов 0,03...2,4 нДж может быть оценена с помощью данных, приведенных в табл. 11.15 либо полученных из нее интерполяцией по энергии и атомному номеру z_m (θ — угол между направлением пучка электронов и направлением вылета тормозного излучения из мишени).

θ , град	E_0 , МэВ														
	0,3					0,5					1,0				
	Al	Fe	Sn	Au	Al	Fe	Sn	Au	Al	Fe	Au	Sn	Al	Cu	Au
120	0,42	1,0	1,23	2,71	1,23	2,46	3,7	7,9	3,1	9,7	39,5	15,0	6,15	18,5	77,5
130	0,35	0,97	1,5	2,71	1,23	2,64	4,4	7,9	3,1	9,7	39	15,4	5,64	17,6	76,7
140	0,35	0,88	1,76	2,71	1,05	2,48	5,2	7,9	3,1	9,7	39	16,7	5,1	16,7	75,7
150	0,26	0,88	1,94	2,71	0,97	2,2	5,3	7,9	3,1	7,8	37,8	17,6	4,65	15	74
160	0,26	0,79	1,94	2,71	—	—	5,2	7,9	3,0	7,0	37,8	17,6	4,1	—	—
170	0,26	0,70	1,85	2,46	—	—	4,48	7,9	3,0	7,0	37,0	17,7	3,1	—	—
180	0,26	0,70	1,76	2,64	—	—	4,5	7,9	2,9	6,15	37,8	17,6	2,55	—	—

Радиационную защиту рассчитывают следующим образом.

1. По известным значениям E_0 , $I_0 = 1$ мА и z_m по табл. 11.15 определяют значения $\dot{D}_0(\theta)$ на расстоянии 1 м от мишени.

2. Находят мощность дозы $\dot{D}(R, \theta)$ на расстоянии R , м, от мишени для тока I_0 , мА:

$$\dot{D}(R, \theta) = \dot{D}_0(\theta) I_0 / R^2.$$

3. Для заданной допустимой мощности дозы $\dot{D}_{\text{доп}}$ за защитой вычисляют кратность ослабления:

$$k_\theta = \frac{\dot{D}(\theta) I_0}{\dot{D}_{\text{доп}} R^2}.$$

4. По табл. 11.15, 11.16 для выбранного материала защиты и определенной эффективности энергии излучения $E_{\text{эфф}}$ находят необходимую толщину радиационной защиты. При этом эффективную энергию тормозного излучения определяют следующим образом:

$$E_{\text{эф}} = \frac{2}{3} E_0 \text{ при } E_0 \leq 1,7 \text{ МэВ (0,27 нДж);}$$

$$E_{\text{эф}} = \frac{1}{2} E_0 \text{ при } 1,7 \text{ МэВ (0,27 нДж)} < E_0 \leq 15 \text{ МэВ (2,4 нДж).}$$

Таблица 11.16. Толщина защиты для различных кратностей ослабления k , см

Кратность ослабления k	$E_{\text{эф}}$, МэВ								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5
<i>Бетон</i>									
10	19,0	22,5	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	34,0
20	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	42,5
50	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	51,0
100	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3
$5 \cdot 10^2$	36,0	43,9	50,5	54,5	57,3	59,8	62,5	64,6	74,8
10^3	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,3	70,3	81,7
$5 \cdot 10^3$	45,6	56,4	65,2	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97

Кратность ослабления k	$E_{\text{эф}}, \text{МэВ}$								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5
10^4	48,5	60,3	69,3	74,5	79,1	82,9	86,2	89,2	104
$5 \cdot 10^4$	56,4	68,6	79,0	84,7	88,7	93,4	97,9	102	120
10^5	64,6	75,1	82,8	89,0	93,5	98,1	102	107	127
$5 \cdot 10^5$	73,7	83,7	92,5	99,3	104	110	115	122	142
10^6	79,8	89,8	97,0	104	114	114	120	124	150
$5 \cdot 10^6$	91,6	101	107	114	120	126	132	137	166
10^7	95,7	106	111	119	125	130	136	142	173
<i>Железо</i>									
10	4,5	5,4	6,2	6,8	7,3	7,8	8,2	8,5	10,0
20	5,5	6,6	7,5	8,3	8,9	9,5	10,0	10,5	12,2
50	6,9	8,2	9,3	10,2	11,2	12,0	12,7	13,4	15,5
100	7,5	9,0	10,2	11,2	12,2	13,1	14,0	14,7	17,6
$5 \cdot 10^2$	9,6	11,6	13,4	14,7	15,8	16,9	17,7	18,6	22,5
10^3	10,5	12,7	14,7	16,2	17,5	18,6	19,5	20,4	24,6
$5 \cdot 10^3$	13,0	15,5	17,6	19,2	20,7	22,1	23,3	24,4	29,4
10^4	14,0	16,6	18,8	20,7	22,2	23,6	24,9	26,2	31,4
$5 \cdot 10^4$	16,0	19,0	21,6	32,5	25,5	27,5	28,5	30,0	36,3
10^5	16,9	20,0	22,7	25,0	26,9	28,6	30,3	31,8	38,2
$5 \cdot 10^5$	18,5	22,1	25,5	27,9	30,1	32,0	33,8	35,5	42,6
10^6	19,9	23,6	26,7	29,2	31,5	33,5	35,4	37,1	44,6
$5 \cdot 10^6$	21,8	25,9	29,4	32,4	34,8	37,0	39,0	40,8	49,1
10^7	22,8	27,0	30,5	33,5	36,1	38,4	40,5	42,4	51,1

Кратность ослабления k	$E_{эф}, \text{ МэВ}$								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5
<i>Свинец</i>									
10	0,9	1,3	1,6	2,1	2,6	3,1	3,5	3,8	5,1
20	1,1	1,5	2,0	2,6	3,3	3,9	4,4	4,9	6,6
50	1,4	1,95	2,6	3,3	4,0	4,6	5,3	6,0	8,2
100	1,6	2,3	3,0	3,9	4,7	5,5	6,3	7,0	9,7
$5 \cdot 10^2$	2,2	3,1	4,0	5,1	6,1	7,2	8,2	9,2	12,9
10^3	2,4	3,3	4,4	5,7	7,0	8,1	9,2	10,2	14,1
$5 \cdot 10^3$	3,0	4,2	5,5	7,0	8,5	9,9	11,2	12,4	17,0
10^4	3,3	4,6	5,9	7,5	9,1	10,6	12,0	13,3	18,3
$5 \cdot 10^4$	3,7	5,2	6,9	8,7	10,5	12,3	14,0	15,6	21,4
10^5	3,8	5,4	7,2	9,2	11,1	13,0	14,8	16,5	22,7
$5 \cdot 10^5$	4,4	6,1	8,2	10,2	12,3	14,4	16,5	18,5	35,5
10^6	4,7	6,5	8,7	10,9	13,1	15,3	17,5	19,9	26,8
$5 \cdot 10^6$	5,3	7,3	9,6	12,1	14,7	17,2	19,5	21,6	29,7
10^7	5,4	7,6	10,1	12,6	15,2	17,8	20,3	22,5	31,2

При расчете радиационной защиты могут быть полезны данные по слоям десятикратного ослабления излучения в бетоне, железе и свинце (табл. 11.17).

При этом соблюдается условие

$$k = 10^n, \quad (11.14)$$

где n — число слоев десятикратного ослабления;

$$n = \lg k. \quad (11.15)$$

Толщина защиты

$$d = n\Delta\lambda/10. \quad (11.16)$$

**Таблица 11.17. Значение $\Delta\lambda/10$, см, тормозного излучения
в различных материалах**

E_0 , МэВ	Бетон ($\rho = 2,3$ г/см ³)	Железо ($\rho = 7,8$ г/см ³)	Свинец ($\rho = 11,3$ г/см ³)
0,2	8,6	—	0,14
0,25	9	—	0,29
0,3	10	—	0,57
0,4	10	—	0,82
0,5	13,6	—	1,03
1	17,5	—	2,52
2	23,0	—	3,9
4	30,1	8,1	4,9
6	35,2	9,8	5,1
10	41,9	10,5	5,6
20	46,0	11,2	5,4

Защита от нейтронов. Формулы (11.7) и (11.8) в иной форме справедливы и для нейтронов. В этом случае в формуле (11.8) заменяют λ на длину релаксации λ' , учитывающую рассеяние нейтронов в материале защиты. Значение λ' для нейтронов деления с энергией больше 3 МэВ в различных материалах толщиной 30...60 см приведены в табл. 11.18.

Таблица 11.18. Длина релаксации λ'

Материал	H ₂ O	C	B ₄ C	Полиэтилен	Бетон	Fe	Ni	Pb
Плотность, г/см ³	1,0	1,67	1,67	0,92	2,4	7,86	8,9	11,3
λ' , см	9,3	13,0	10,0	8,3	11,0	6,5	6,6	9,4

Для защиты от нейтронного облучения применяют бериллий, графит и материалы, содержащие водород (парафин, вода), а также бор и его соединения для защиты от нейтронных потоков с малой энергией.

Часто встречаются случаи смешанного излучения, состоящего из нейтронов и γ -квантов. В природе нет элементов, которые достаточно эффективно ослабляют такие смешанные потоки. Защита от них состоит из смеси веществ с малыми и большими атомными номерами. В случае воздействия γ -излучения и нейтронных потоков применяют комбинированные экраны (свинец — вода, свинец — полиэтилен, железо — вода и другие пары и комбинации). Примером может служить железобетонная защита или тяжелый бетон (смесь бетона с железной или свинцовой дробью).

При выполнении расчетов защитных экранов следует учитывать:

- вид излучения и его спектральные характеристики;
- энергетические характеристики ионизирующего излучения;
- время воздействия излучения (экспозицию);
- режим работы источника излучения (непрерывный, импульсный, квазинепрерывный, частота повторения импульсов и т. п.);
- направленность излучения;
- геометрию ионизирующего излучения;
- расстояние от источника до персонала;
- конструктивные особенности установок и источников ионизирующего излучения;

табличные данные и номограммы, позволяющие определять поглощающие свойства различных материалов и экстинкцию (ослабление) ионизирующего излучения.

Защита, основанная на введении в организм препаратов. Специфический вид защиты — введение в организм человека до или во время облучения некоторых препаратов, повышающих его общую сопротивляемость. К ним относятся липополисахариды, сочетания аминокислот и витаминов, различные гормоны и вакцины, а также радиопротекторы. Последние способны предохранять при облучении от губительных изменений чувствительные органы и ткани.

Наиболее эффективным методом защиты от внутреннего облучения является йодная профилактика. Защитный эффект профилактики зависит от времени приема стабильного йода относительно начала попадания РВ в организм:

при приеме йода за 6 ч до контакта с РВ фактор защиты увеличивается в 100 раз;

во время контакта с РВ защита увеличивается в 90 раз;

через 2 ч после начала контакта с РВ — в 10 раз;

через 6 ч после начала контакта с РВ — в 2 раза.

11.6.2. Организационно-технические мероприятия

Основными мероприятиями по защите населения от ионизирующих излучений являются всемерное ограничение поступления в окружающую атмосферу, воду, почву отходов производства, содержащих радионуклиды, а также зонирование территорий вне промышленного предприятия. В случае необходимости создают санитарно-защитную зону и зону наблюдения.

Санитарно-защитная зона — территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации данного источника может превысить установленный предел дозы облучения населения.

Критерием для определения размеров санитарно-защитной зоны служат пределы годового поступления радиоактивных веществ через органы дыхания и пищеварения и ПД внешнего излучения для категории Б, а также ДК_Б радиоактивных веществ в атмосфере и воде. В этой зоне устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

Зона наблюдения — территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой возможно влияние радиоактивных выбросов учреждения и облучение проживающего населения может достигать установленного ПД и на которой проводится радиационный контроль. Внутренняя граница зоны наблюдения всегда совпадает с внешней границей санитарно-защитной зоны.

Для предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики санитарно-защитная зона устанавливается специальными нормативными актами. В табл. 11.19 приведены минимальные расстояния от атомных ТЭЦ (АТЭЦ) и атомных электростанций (АЭС) до городов с населением свыше 10 тыс. жителей.

Таблица 11.19. Минимальные расстояния от атомных объектов до городов с населением свыше 10 тыс. жителей

Численность населения, тыс. чел.	Расстояние, км от	
	АТЭЦ	АЭС
100 и более	10	—
300 и более	12	25
500 и более	18	—
1000...2000	25	40

Потенциально более опасными являются радиационные объекты, в результате деятельности которых при аварии возможно облучение не только работников объекта, но и населения. Наименее опасными радиационными объектами являются те, где исключена возможность облучения лиц, не относящихся к персоналу.

По потенциальной радиационной опасности установлено четыре категории объектов:

I категория — радиационные объекты, при аварии на которых возможно их радиационное воздействие на население и могут потребоваться меры по его защите;

II категория объектов — радиационное воздействие при аварии ограничивается территорией санитарно-защитной зоны;

III категория объектов — радиационное воздействие при аварии ограничивается территорией объекта;

IV категория — радиационное воздействие при аварии ограничивается помещениями, где проводятся работы с источниками излучения.

При выборе места строительства радиационного объекта необходимо учитывать категорию объекта, его потенциальную радиационную, химическую и пожарную опасность для населения и окружающей среды.

Радиационные объекты I и II категорий должны располагаться с учетом розы ветров преимущественно с подветренной стороны по отношению к жилой территории, лечебно-профилактическим и детским учреждениям, а также к местам отдыха и спортивным сооружениям.

Вокруг радиационных объектов I и II категорий устанавливается санитарно-защитная зона, а вокруг радиационных объектов I категории — также и зона наблюдения. Санитарно-защитная зона для радиационных объектов III категории ограничивается территорией объекта, для радиационных объектов IV категории зоны не устанавливаются.

Размеры санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения вокруг радиационного объекта устанавливаются с учетом уровней внешнего облучения, а также величин и площадей возможного распространения радиоактивных выбросов и сбросов.

При расположении на одной площадке комплекса радиационных объектов санитарно-защитная зона и зона наблюдения устанавливаются с учетом суммарного воздействия объектов.

При выборе участков территорий под строительство жилых домов и зданий социально-бытового назначения предпочтительны

участки с γ -фоном, не превышающим 0,3 мкГр/ч и плотностью потока радона с поверхности грунта не более 80 мБк/(м² · с).

При отводе для строительства здания участка с плотностью потока радона более 80 мБк/(м² · с) в проекте здания должна быть предусмотрена система защиты от радона (монолитная бетонная подушка, улучшенная изоляция перекрытия подвального помещения и др.).

Производственный радиационный контроль должен осуществляться на всех стадиях строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации жилых домов и зданий социально-бытового назначения.

11.6.3. Инженерно-технические мероприятия радиационной безопасности

Защита персонала, населения и окружающей среды от действия источников ионизирующих излучений достигается соблюдением требований норм ОСПОРБ—99, в которых регламентированы сбор, удаление и обезвреживание твердых и жидких радиоактивных отходов, а также основные положения по проектированию и применению пылегазоочистки, вентиляционных и технологических выбросов в атмосферу от содержащихся в них радионуклидов.

Радионуклиды как потенциальные источники внутреннего облучения разделяются по степени радиационной опасности на четыре группы в зависимости от минимально значимой активности (МЗА):

группа А — радионуклиды с минимально значимой активностью 103 Бк;

группа Б — радионуклиды с минимально значимой активностью 104 и 105 Бк;

группа В — радионуклиды с минимально значимой активностью 106 и 107 Бк;

группа Г — радионуклиды с минимально значимой активностью 108 Бк и более.

Все работы с использованием открытых источников излучения разделяются на три класса (табл. 11.20) в зависимости от группы радиационной опасности радионуклида и его активности на рабочем месте.

Классом работ определяются требования к размещению и оборудованию помещений, в которых проводятся работы с открытыми источниками излучения.

Таблица 11.20. Класс работ с открытыми источниками излучения

Класс работ	Суммарная активность на рабочем месте, приведенная к группе А, Бк
I	Более 108
II	От 105 до 108
III	От 103 до 105

Ограничение поступления радионуклидов в рабочие помещения и окружающую среду должно обеспечиваться использованием системы статических (оборудование, стены и перекрытия помещений) и динамических (вентиляция и газоочистка) барьеров.

Работы III класса должны проводиться в отдельных помещениях, соответствующих требованиям, предъявляемым к химическим лабораториям. В составе этих помещений предусматривается устройство приточно-вытяжной вентиляции и душевой.

Работы II класса должны проводиться в помещениях, скомпонованных в отдельной части здания изолированно от других помещений.

При планировке выделяются помещения постоянного и временного пребывания персонала. В составе этих помещений должен быть санпропускник или саншлюз. Помещения для работ II класса должны быть оборудованы вытяжными шкафами или боксами.

Работы I класса должны проводиться в отдельном здании или изолированной части здания с отдельным входом только через санпропускник.

Помещения, где проводятся работы на стационарных установках с закрытыми источниками излучения, должны быть оборудованы системами блокировки и сигнализации о положении источника (блока источников).

При использовании мощных радиационных установок и хранении закрытых источников излучения в количествах, приводящих к накоплению в воздухе рабочих помещений сверхнормативных концентраций токсических веществ, необходимо предусматривать приточно-вытяжную вентиляцию в соответствии с требованиями специальных санитарных правил.

Для снижения уровней внешнего облучения персонала от открытых источников излучения должны использоваться системы

автоматизации и дистанционного управления, экранирование источников излучения и сокращение времени рабочих операций.

При работе с открытыми источниками излучения вентиляционные и воздухоочистные устройства должны обеспечивать защиту от радиоактивного загрязнения воздуха рабочих помещений и атмосферного воздуха.

Система специальной канализации должна предусматривать дезактивацию сточных вод и возможность их повторного использования для технологических целей.

11.6.4. Безопасность работы с радиоактивными отходами

Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на газообразные, жидкие и твердые.

К газообразным радиоактивным отходам относятся не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли, образующиеся при производственных процессах с объемной активностью, превышающей ДОО (НРБ-99).

К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, в которых удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства при поступлении с водой (НРБ-99).

К твердым радиоактивным отходам относятся отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, а при неизвестном радионуклидном составе удельная активность больше: 100 кБк/кг — для источников β -излучения; 10 кБк/кг — для источников α -излучения; 1,0 кБк/кг — для трансурановых радионуклидов.

Радиоактивные отходы подразделяются по удельной активности на три категории — низко-, средне- и высокоактивные.

Газообразные радиоактивные отходы подлежат выдержке и (или) очистке на фильтрах с целью снижения их активности до уровней, регламентируемых допустимым выбросом, после чего могут быть удалены в атмосферу.

В табл. 11.21 приведена классификация МАГАТЭ радиоактивных пылегазообразных отходов по их активности.

**Таблица 11.21. Классификация радиоактивных
пылегазообразных отходов**

Пылегазообразные выбросы	Удельная активность, Бк/м ³	Обращение с отходами
Слабоактивные (низкоактивные)	$\leq 3,7$	Очистке не подвергаются
Среднеактивные	$3,7 \dots 3,7 \cdot 10^4$	Подвергаются очистке фильтрованием перед выбросом в атмосферу
Высокоактивные	$> 3,7 \cdot 10^4$	Подвергаются очистке

Удаляемый из укрытий, боксов, камер, шкафов и другого оборудования загрязненный воздух перед выбросом в атмосферу должен подвергаться очистке.

Для очистки пылегазовых выбросов от радиоактивных аэрозолей применяют пылеуловители всех типов. Для улавливания высокодисперсных частиц используют фильтры различных конструкций с фильтроэлементами из материала ФПП.

Пылегазовые выбросы, относящиеся к категории низкоактивных (обычно вентиляционные выбросы), выбрасывают в окружающую среду через трубы и рассеивают.

Фильтры и аппараты следует устанавливать по возможности непосредственно у боксов, камер, шкафов, укрытий с тем, чтобы максимально снизить загрязнение систем магистральных воздухоотводов. Срок службы аппаратов и фильтров должен определяться по снижению пропускной способности для воздуха или по уровню радиационной опасности, возникающей в результате накопления радиоактивных веществ.

При обработке высокоактивных пылегазовых отходов необходимо повышать концентрацию в них радионуклидов и отправлять на хранение и захоронение. Этот способ обработки применим и для радионуклидов, имеющих большие периоды полураспада.

Система обращения с жидкими и твердыми радиоактивными отходами включает их сбор, сортировку, упаковку, временное хранение, кондиционирование (концентрирование, отверждение, прессование, сжигание), транспортирование, длительное хранение и (или) захоронение.

Жидкие радиоактивные отходы должны собираться в специальные емкости. Их следует, по возможности, концентрировать и от-

верждать в организации, где они образуются, или в специализированной организации по обращению с радиоактивными отходами, после чего направлять на захоронение.

В организациях, где возможно образование значительного количества жидких радиоактивных отходов (более 200 л/сутки), проектом должна быть предусмотрена система спецканализации. В спецканализацию не должны попадать нерадиоактивные стоки. Система специальной канализации должна предусматривать дезактивацию сточных вод и возможность их повторного использования для технологических целей. Система спецканализации должна быть обеспечена средствами контроля за количеством и активностью сточных вод.

При невозможности разбавления, а также при малых количествах (менее 200 л/сутки) жидкие радиоактивные отходы должны собираться в специальные емкости для последующего удаления на пункт захоронения радиоактивных отходов.

Для очистки слабоактивных и среднеактивных сбросных вод от радионуклидов применяют различные методы (упаривание, ионный обмен, химические методы).

Временное хранение радиоактивных отходов различных категорий в организации должно осуществляться в отдельном помещении, либо на специально выделенном оборудованном участке. Хранить радиоактивные отходы следует в специальных контейнерах.

Транспортировка радиоактивных отходов должна проводиться в механически прочных герметичных упаковках на специально оборудованных транспортных средствах.

Захоронение радиоактивных отходов заключается в безопасном размещении радиоактивных отходов без намерения последующего их извлечения.

Удаление радиоактивных отходов нужно проводить на специальных пунктах захоронения в контейнерах.

Для захоронения низкоактивных отходов можно использовать хранилища в виде резервуаров и траншей. Большую опасность представляют средне- и высокоактивные отходы. Обращение с ними предусматривает захоронение их в отвержденном состоянии в подземных хранилищах и шахтах на глубине 300...1000 м. Менее опасно захоронение отходов в море на больших глубинах в изолированном виде, требующее предварительной обработки отходов (остекловывание, бетонирование, заключение в высокопрочные контейнеры).

Обезвреживание твердых, жидких и пастообразных отходов, обладающих радиоактивностью, осуществляется на специальных по-

лигонах, организованных в соответствии с основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности.

Эффективная доза облучения населения, обусловленная радиоактивными отходами, включая этапы хранения и захоронения, не должна превышать 10 мкЗв/год.

11.6.5. Безопасность при радиационных авариях

Система радиационной безопасности персонала и населения при радиационной аварии должна обеспечивать сведение к минимуму негативных последствий аварии, прежде всего — предотвращение возникновения детерминированных эффектов и минимизацию вероятности стохастических эффектов.

На территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате радиационной аварии, должны осуществляться:

- радиационный контроль с оценкой доз облучения населения за счет радиоактивного загрязнения территории, если эта доза может превысить 10 мкЗв/год;
- радиационный контроль за другими основными видами загрязнения населения;
- оптимизированное снижение доз по всем основным видам облучения, если доза облучения населения за счет радиоактивного облучения территории превышает 1,0 мЗв/год;
- оптимизированные защитные мероприятия, не нарушающие нормальную жизнедеятельность населения, хозяйственное и социальное функционирование территории, если доза облучения за счет радиоактивного загрязнения территории превышает 0,1 мЗв/год, но не более 1,0 мЗв/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из самых важных проблем, стоящих перед мировым сообществом, является проблема защиты окружающей природной среды и устойчивого развития человеческой цивилизации. В современном обществе с высокоразвитой экономикой резко возрастает роль инженерной экологии, составной частью которой является физическая экология, включающая вопросы инженерной защиты от энергетических воздействий природного и техногенного происхождения. Любое промышленное предприятие — источник физических полей в виде техногенных загрязнений окружающей среды. Большую долю загрязнений занимают энергетические выбросы. Энергетические загрязнения не менее, а подчас и более опасны для человека и окружающей среды, чем традиционные виды загрязнений. Особенно это относится к акустическому (шумовому) и электромагнитному видам загрязнений.

Изучение процессов взаимодействия физических полей антропогенного и естественного происхождения с человеком и окружающей средой составляет одно из направлений современной науки: экологии биосферы, экологии техносферы и безопасности жизнедеятельности. На этой основе разрабатываются организационно-технические, инженерные и медико-профилактические мероприятия защиты от действия энергетических выбросов и физических загрязнений различной природы, когда их уровень превышает допустимый, включая колебательно-волновое (шумы, вибрации, инфразвук, ультразвук) загрязнение, постоянные и переменные электромагнитные поля различных длин волн от промышленной частоты до электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты, тепловое загрязнение и оптическое излучение, а также ионизирующие излучения.

Контрольные вопросы по акустической и электромагнитной экологии

1. Каким образом классифицируются техногенные физические загрязнения?
2. Дайте понятие звукового поля.
3. Назовите объективные акустические характеристики.
4. Как определяются скорости звука в газах, жидкостях и твердых телах?
5. Укажите источники возникновения шума и диапазон слышимости.
6. Какие вы знаете типы, виды техногенных шумов?
7. Какое негативное действие оказывает шум на организм человека?
8. Как нормируется шумовое загрязнение?
9. Какие параметры выбраны для нормирования шумов?
10. Каким образом производится расчет характеристик источников шума?
11. Какие существуют методы защиты от шума?
12. Чем отличается звукопоглощение от звукоизоляции?
13. Как осуществляется поглощение шума?
14. Как осуществляется звукоизоляция?
15. Как осуществляется глушение шума?
16. Назовите технические средства защиты от шумов.
17. Какие устройства получили наибольшее распространение для защиты от шумов?
18. Каким образом производится расчет защиты от шумов?
19. Что является источником инфразвуковых колебаний?
20. Как проводится нормирование инфразвука?
21. Назовите методы и средства защиты от инфразвука.
22. Что является источником ультразвуковых колебаний?
23. Как нормируется ультразвук?
24. Какие методы и средства служат для защиты от ультразвука?
25. Что является источником вибраций?
26. Перечислите причины возникновения вибраций.
27. Какое вредное воздействие оказывает вибрация?
28. Как нормируются допустимые уровни вибраций?
29. Какие существуют методы и средства защиты от вибраций?
30. Чем различаются виброгашение и виброизоляция?
31. Как осуществляется виброгашение?
32. Как осуществляется виброизоляция?
33. Как осуществляется вибродемпфирование?
34. Как осуществляется расчет защиты от вибраций?

35. Назовите источники излучения электромагнитной энергии.
36. В чем состоит защита от постоянных магнитных и электростатических полей?
37. Как осуществляется защита от постоянных магнитных полей?
38. Как нормируются электростатические поля?
39. Какая защита предусматривается от воздействия электростатического поля?
40. Какими параметрами характеризуется спектр электромагнитных излучений техносферы?
41. Назовите техногенные источники электромагнитных излучений радиочастот?
42. Какой диапазон частот включают электромагнитные излучения радиочастот?
43. В чем заключается биологическое действие электромагнитных излучений радиочастот?
44. Как нормируются электромагнитные излучения радиочастот?
45. В чем состоит негативное воздействие электромагнитного излучения на организм человека?
46. Укажите основные направления по ограничению электромагнитного облучения.
47. Чем различаются активные и пассивные способы защиты от электромагнитного облучения?
48. Какие существуют методы и средства защиты от электромагнитных излучений радиочастот?
49. Как производится расчет защиты экранированием от электромагнитных излучений?
50. Какие существуют источники теплового загрязнения окружающей среды?
51. В чем проявляется негативное воздействие теплового излучения на организм человека?
52. Каким образом нормируется инфракрасное излучение?
53. Какие существуют способы защиты от инфракрасного теплового излучения?
54. Назовите виды оптических излучений.
55. Какие способы защиты существуют от воздействия ультрафиолетового излучения?
56. Какими свойствами характеризуется лазерное излучение?
57. Какие существуют способы защиты от лазерного излучения?
58. Перечислите виды ионизирующего излучения.
59. Какими показателями характеризуется ионизирующее излучение?
60. Как нормируются уровни ионизирующего излучения?
61. Какие существуют средства радиационной защиты?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев С.П., Казаков А.М., Колотилов Н.Н.* Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1970.
2. Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность/Под ред. А.Л. Бузова. — М.: Радио и связь, 1998.
3. *Аполлонский С.М.* Справочник по расчету электромагнитных экранов. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. *Барсуков О.А., Барсуков К.А.* Радиационная экология. — М.: Научный мир, 2003.
5. Безопасность жизнедеятельности/Под ред. С.В. Белова. — М.: Высшая школа, 2005.
6. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда)/П.П. Кукин и др. — М.: Высшая школа, 2004.
7. Борьба с шумом на производстве: Справочник/Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др. — М.: Машиностроение, 1985.
8. *Ветошкин А.Г.* Защита окружающей среды от энергетических воздействий. Учеб. пособие. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007.
9. *Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р.* Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учеб. пособие/Под ред. А.Г. Ветошкина. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005.
10. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. СанПиН 2.2.4.548—96.
11. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 — 03.
12. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383—03.
13. ГОСТ 12.1.001—89. Ультразвук. Общие требования безопасности.
14. ГОСТ 12.1.003—83. Шум. Общие требования безопасности.
15. ГОСТ 12.1.005—88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
16. ГОСТ 12.1.012—90. Вибрационная безопасность. Общие требования.
17. ГОСТ 12.1.040—83. Лазерная безопасность. Общие положения.
18. *Ивович В.А., Онищенко В.Я.* Защита от вибрации в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990.
19. Инженерная экология и экологический менеджмент/М.В. Буторина, П.В. Воробьев, А.П. Дмитриева и др./Под ред. Н.И. Иванова, И.М. Фадиной. — М.: Логос, 2002.

20. Инженерная экология /Под ред. В.Т. Медведева. — М.: Гардарики, 2002.
21. Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки. СанПиН 2.2.4/2.1.8.583—96.
22. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ—99). СП 2.6.1.758—99.
23. *Казанский Л.С., Романов В.А.* Антенно-фидерные устройства декаметрового диапазона и электромагнитная экология. — М.: Радио и связь, 1996.
24. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
25. *Коптев Д.В., Орлов Г.Г., Булыгин В.И.* и др. Безопасность труда в строительстве (Инженерные расчеты по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»): Учеб. пособие. — М.: Изд-во АСВ, 2003.
26. *Копылова Л.Н., Соболев Б.Н.* Введение в радиационную безопасность. Учеб. пособие. — М.: Изд-во МЭИ, 2000.
27. *Крылов В.А., Юченкова Т.В.* Защита от электромагнитных излучений. — М.: Советское радио, 1972.
28. *Куклев Ю.И.* Физическая экология. — М.: Высшая школа, 2007.
29. *Маргулис У.Я., Брегадзе Ю.И.* Радиационная безопасность. Принципы и средства ее обеспечения. — М.: Эдиториал УРСС, 2000.
30. *Машкович В.П., Папченко А.М.* Основы радиационной безопасности: Учеб. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
31. *Медведев В.Т., Маниюков М.В., Новиков С.Г.* Влияние транспорта на уровень шума в городах. Учеб. пособие /Под ред. В.Я.Беспалова. — М.: Изд-во МЭИ, 1997.
32. Нормы проектирования. Защита от шума. СНиП 23-03-2003.
33. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ—99). СП 2.6.1.799—99.
34. Охрана окружающей среды/Под ред. С.В. Белова. — М.: Высшая школа, 1991.
35. *Полонский Н.Б.* Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1979.
36. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.556—96.
37. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200—03.
38. Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование: Справочник /Под ред. С.В.Белова. — М.: Машиностроение, 1989.
39. *Фролов К.В., Гончаревич И.Ф., Лихнов П.П.* Инфразвук, вибрация, человек. — М.: Машиностроение, 1996.
40. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. СН 2.2.4/2.1.8.562—96.
41. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). СанПиН 2.2.4/2.1.8.055—96.
42. Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191—03.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Классификация техногенных физических загрязнений	5
Глава 2. Защита от акустического загрязнения	11
2.1. Звуковые колебания	11
2.2. Понятие о шумах	20
2.3. Биологическое действие шума	27
2.4. Нормирование шума	29
2.5. Акустический расчет	33
2.6. Расчет шумовых характеристик некоторых источников	40
2.7. Методы защиты от шума	48
2.7.1. Основные направления защиты от шума	48
2.7.2. Звукопоглощение	62
2.7.3. Звукоизоляция	72
2.7.4. Глушители шума	82
2.8. Расчет защиты от шумов	92
2.8.1. Расчет звукопоглощения в помещении	92
2.8.2. Расчет звукоизолирующей способности ограждений	101
2.8.3. Определение уровня шума, проникшего через ограждения	108
2.8.4. Расчет глушителей шума	116
2.8.5. Расчет акустических экранов	129
Глава 3. Защита от инфразвуковых колебаний	134
3.1. Источники инфразвуковых колебаний	135
3.2. Влияние инфразвуковых полей на человека	140
3.3. Нормирование инфразвука	142
3.4. Методы и средства защиты от инфразвука	144
Глава 4. Защита от ультразвуковых колебаний	148
4.1. Классификация ультразвука	148
4.2. Нормирование ультразвука	149
4.3. Методы защиты от ультразвука	151

Глава 5. Защита от вибрационных воздействий	152
5.1. Вибрационные колебания	152
5.2. Допустимые уровни вибраций	158
5.3. Методы и средства защиты от вибраций	161
5.3.1. Виброгашение	165
5.3.2. Виброизоляция	169
5.3.3. Вибродемпфирование	177
5.4. Расчет защиты от вибраций	181
5.4.1. Расчет виброизоляции	181
5.4.2. Расчет амортизаторов	190
5.4.3. Расчет вибродемпфирования	202
Глава 6. Электромагнитные излучения техносферы	207
6.1. Спектр электромагнитных излучений техносферы	209
6.2. Характеристики электромагнитных полей	212
6.3. Низкочастотные магнитные и электростатические поля	215
6.4. Электромагнитные излучения радиочастот (ЭМИ РЧ)	222
6.5. Биологическое действие электромагнитных полей и излучений	224
6.6. Определение параметров электромагнитных полей	229
6.7. Санитарно-гигиенические нормативы воздействия электромагнитных излучений	233
6.7.1. Нормативы воздействия низкочастотных магнитных и электростатических полей	235
6.7.2. Нормирование ЭМИ РЧ	238
Глава 7. Защита от неионизирующих электромагнитных полей и излучений	247
7.1. Основные методы защиты от ЭМП	247
7.2. Способ защиты расстоянием	249
7.3. Защита от низкочастотных ЭМП и электростатических полей	254
7.4. Защита от воздействия ЭМИ РЧ	257
7.5. Электромагнитное экранирование	260
7.6. Радиопоглощение	283
Глава 8. Инфракрасное излучение	285
8.1. Характеристика инфракрасного излучения	285
8.2. Источники теплового излучения и загрязнения в окружающей среде	287
8.3. Биологическое действие инфракрасного излучения	290

8.4. Нормирование теплового инфракрасного излучения	291
8.5. Защита от инфракрасного излучения	293
Глава 9. Ультрафиолетовое излучение	297
9.1. Источники ультрафиолетового излучения	297
9.2. Биологическое действие ультрафиолетового излучения	299
9.3. Гигиеническое нормирование ультрафиолетового излучения	302
9.4. Защита от ультрафиолетового излучения	303
Глава 10. Лазерное излучение	304
10.1. Классификация лазеров	304
10.2. Свойства лазерного излучения	307
10.3. Биологическое действие лазерного излучения	311
10.4. Нормирование лазерного излучения	315
10.5. Защита от лазерного излучения	316
Глава 11. Защита от ионизирующих излучений	319
11.1. Виды ионизирующих излучений	319
11.2. Количественное описание радиационных эффектов	321
11.3. Источники ионизирующих излучений	328
11.4. Биологическое воздействие ионизирующего излучения	335
11.5. Нормирование уровня ионизирующих излучений	340
11.6. Обеспечение радиационной безопасности	344
11.6.1. Методы радиационной защиты от ионизирующих излучений	345
11.6.2. Организационно-технические мероприятия	368
11.6.3. Инженерно-технические мероприятия радиационной безопасности	370
11.6.4. Безопасность работы с радиоактивными отходами	372
11.6.5. Безопасность при радиационных авариях	375
Заключение	376
Контрольные вопросы по акустической и электромагнитной экологии	377
Литература	379

Учебное издание

Ветошкин Александр Григорьевич
ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Редактор *Е.И. Борисова*
Внешнее оформление *К.И. Мандель*
Технический редактор *Л.А. Маркова*
Компьютерная верстка *Н.А. Поповой*
Корректор *В.В. Кожуткина*

Изд. № РЕНТ-529. Подп. в печать 15.12.09. Формат 60 × 88 1/16.
Бум. офсетная. Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная.
Объем 23,52 усл. печ. л. 24,26 усл. кр.-отт. Тираж 2000 экз. Зак. № 2446.

ОАО «Издательство «Высшая школа»,
127994, Москва, Неглинная ул., д. 29/14, стр. 1.

Тел.: (495) 694-04-56.
<http://www.vshkola.ru> E-mail: info_vshkola@mail.ru

Отдел реализации: (495) 694-07-69, 694-31-47, факс: (495) 694-34-86.
E-mail: sales_vshkola@mail.ru

ООО «Великолукская городская типография».
182100, Псковская область, г. Великие Луки, ул. Полиграфистов, 78/12
Тел./факс: (811-53) 3-62-95. E-mail: zakaz@veltip.ru