

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

В.Н. Куприянов, А.С. Петров, А.И. Иванцов

АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

В 2 частях

Часть 2

Инсоляция, защита от шума, акустика залов

Казань
2022

УДК 72:53
ББК 85.11; 22.3
К92

Куприянов В.Н., Петров А.С., Иванцов А.И.

К92 Архитектурная физика: Учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2: Инсоляция, защита от шума, акустика залов /Под ред. д.т.н., проф., чл.-корр. РААСН Куприянова В.Н. /В.Н. Куприянов, А.С. Петров, А.И. Иванцов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архит. строит. ун-та, 2022. – 106 с. (Ч. 2: с. 133-239)

ISBN 978-5-7829-0596-5

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В учебном пособии систематически изложены основные разделы архитектурной климатологии и физики среды: строительная климатология, климатическое районирование, теплозащита зданий, естественное освещение, инсоляция территорий застройки и помещений зданий, солнцезащита, защита помещений от шума в зданиях и в городской среде, акустика помещений. Основное внимание уделяется учету физических процессов, проходящих в городской среде, в помещениях зданий и в ограждающих конструкциях при проектировании архитектурных объектов в заданных климатических районах.

Учебное пособие иллюстрируется натуральными фотографиями, графическими материалами и числовыми примерами по расчету основных показателей архитектурной среды.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям подготовки «Архитектура» – 07.03.01 и 07.04.01; «Реконструкция и реставрация архитектурного наследия» – 07.03.02 и 07.04.02; «Градостроительство» – 07.03.04 и 07.04.04. Учебное пособие может быть полезно для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки «Строительство» – 08.03.01 и 08.04.01, а также для студентов специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

130 ил., 65 табл., 139 числ. примеров

Рецензенты:

Зав. кафедрой реконструкции и реставрации архитектурного наследия Казанского ГАСУ, доктор архитектуры, профессор

Х.Г. Надырова

Исполнительный директор ООО «МостафПроектСтрой»,
заслуженный архитектор Республики Татарстан

А.П. Горбунов

УДК 72:53
ББК 85.11; 22.3

- © Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2022
- © Куприянов В.Н., Петров А.С., Иванцов А.И., 2022

ISBN 978-5-7829-0596-5

Введение

Две тысячи лет назад римский архитектор Витрувий сформулировал основные требования к архитектуре, которые выражены в триаде «прочность-польза-красота». В этой формуле все члены равны, стоит одной из составляющих потеснить две другие – и архитектура исчезает. Триада сохраняет свою актуальность и в современных условиях, однако обеспечение прочности конструкций и красоты объекта зачастую отодвигают «пользу» архитектурного объекта, без которой, по выражению Витрувия, «архитектура исчезает» на второй план.

В понятии «польза» архитектурного объекта значительную долю занимает обеспечение в помещениях зданий и на территории застройки комфортных условий для жизнедеятельности человека. Абстрактное слово «комфорт» в современных условиях определяется перечнем санитарно-гигиенических параметров внутренней среды помещений и городской среды. Эти параметры регламентированы в нормативных документах: Санитарных нормах и правилах, ГОСТ и сводах правил по проектированию. Согласно этим документам, в помещениях зданий должны быть обеспечены:

- допустимые уровни микроклимата и воздушной среды помещений;
- естественное освещение;
- инсоляция помещений;
- допустимые уровни шума;
- допустимые уровни вибрации;
- допустимые уровни ультразвука и инфразвука;
- допустимые уровни электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах;
- уровни напряжения электростатического поля на поверхностях помещений;
- допустимые уровни радона и торона.

В городской среде должны быть обеспечены:

- инсоляция определенных территорий;
- комфортный ветровой режим в застройке;
- тепловой и радиационный режим придомовых территорий;
- регулирование снеготаносов пешеходных и транспортных путей;
- защита зданий от транспортных и промышленных шумов;
- регулирование дождевых стоков с территории застройки.

Перечисленные требования должны обеспечиваться средствами архитектурного проектирования зданий при использовании нормативных документов, а при отсутствии нормативных документов – экспериментальными и теоретическими научными исследованиями по архитектурной климатологии и физике среды в помещениях зданий, в ограждающих конструкциях и в городской застройке.

РАЗДЕЛ V

ИНСОЛЯЦИЯ ТЕРРИТОРИЙ ЗАСТРОЙКИ И ПОМЕЩЕНИЙ ЗДАНИЙ

Под термином «инсоляция» понимается облучение помещений жилых и общественных зданий, а также территорий городской застройки прямыми солнечными лучами. Количественной мерой инсоляции, в соответствии с действующими нормативными документами, является продолжительность облучения в часах на определенные календарные даты. Облучение прямым солнечным светом благоприятно сказывается на самочувствии человека, а облучение определенной продолжительности обеспечивает санитарно-гигиеническое благополучие облучаемых помещений и территорий.

В связи с этим расчеты продолжительности инсоляции являются обязательной частью проектной документации жилых зданий, основных функциональных помещений общественных зданий, а также детских игровых и спортивных площадок, зон отдыха.

Первые отечественные нормы 1963 года (СН 427-63) предписывали трехчасовую непрерывную продолжительность облучения. Анализ жилой застройки, выполненной по этим нормам, после десяти лет эксплуатации выявил снижение обращений жителей микрорайона в медицинские учреждения. Однако продолжительность инсоляции вошла в противоречие с плотностью застройки городских территорий, в связи с чем в угоду увеличению плотности застройки сокращается нормируемая продолжительность облучения и допускается его прерывистость.

5.1. Общие требования и нормирование инсоляции

Основными нормативными документами по проектированию инсоляции и расчету продолжительности облучения помещений и территорий являются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01 «Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий» с изменениями от 10 апреля 2017 года и ГОСТ Р 57795-2017 «Здания и сооружения. Методы расчета продолжительности инсоляции» с изменениями от 2017 года.

В СанПиН установлена нормируемая продолжительность инсоляции и требования к инсоляции зданий различного назначения и территорий. В ГОСТ определены методы расчета продолжительности инсоляции.

Нормируемая продолжительность **непрерывной инсоляции** устанавливается на определенные календарные периоды с учетом географической широты местности:

- для северной зоны (севернее 58°) – не менее 2,5 часа в день с 22.04 по 22.08;

- для центральной зоны ($58^{\circ} - 48^{\circ}$) – не менее 2,0 часов в день с 22.04 по 22.08;

- для южной зоны (южнее 48°) – не менее 1,5 часов в день с 20.02 по 22.10.

Нормативными документами определен перечень зданий, помещений и территории, для которых обеспечение требуемой продолжительности облучения является обязательным.

5.1.1. Требования к инсоляции жилых зданий

Продолжительность инсоляции в жилых зданиях должна быть обеспечена не менее чем в одной комнате 1–3-комнатных квартир и не менее чем в двух комнатах 4- (и более) комнатных квартир.

В зданиях общежитий должно инсолироваться не менее 60% жилых комнат.

При проектировании инсоляции жилых зданий **допускается прерывистость инсоляции**, при которой один из периодов облучения должен быть не менее 1 часа. **При этом суммарная продолжительность нормируемой инсоляции должна увеличиваться на 0,5 часа** для каждой зоны.

Допускается снижение продолжительности инсоляции на 0,5 часа для северной и центральной зоны в 2- и 3- комнатных квартирах, где инсолируется не менее двух комнат и в 4- (и более) комнатных квартирах где инсолируется не менее трех комнат, а также при реконструкции жилой застройки в исторических зонах городов.

5.1.2. Требования к инсоляции общественных зданий

В общественных зданиях нормативная продолжительность **непрерывной инсоляции** должна быть обеспечена в основных функциональных помещениях, к которым относятся:

- в зданиях детских дошкольных учреждений – групповые, игровые, изоляторы и палаты;

- в учебных зданиях – классы и учебные кабинеты;

- в лечебно-профилактических учреждениях – палаты (не менее 60% общей численности);

- в учреждениях социального обеспечения – палаты, изоляторы.

В остальных помещениях общественных зданий инсоляция не требуется.

5.1.3. Требования к инсоляции территорий

К территориям городской застройки, где инсоляция должна быть обязательной, относятся: детские игровые площадки; спортивные площадки жилых домов; групповые площадки дошкольных учреждений;

спортивные зоны, зоны отдыха общеобразовательных школ и школ-интернатов; зоны отдыха лечебно-профилактических учреждений стационарного типа. Продолжительность инсоляции для перечисленных территорий должна составлять 2,5 часа на 50% площади участка независимо от географической широты местности. **Допускается прерывистость облучения**, при этом один из периодов облучения должен быть не менее 1 часа.

5.1.4. Обеспечение нормативной продолжительности инсоляции

Нормативная продолжительность инсоляции зданий и территорий обеспечивается комплексным использованием ряда проектных приемов и средств:

- размещением инсолируемого объекта в проектах планировки и застройки группы зданий, микрорайонов и кварталов;
- ориентацией объекта по сторонам горизонта;
- разработкой объемно-планировочных решений инсолируемого объекта;
- разработкой конструктивных решений фасадных систем.

При расчетах продолжительности инсоляции помещений зданий и территорий застройки не учитывается первый час после восхода солнца и последний час перед заходом солнца для районов южнее 58° и 1,5 часа для районов севернее 58° с. ш.

5.2. Координаты солнца при его движении по небосводу

Координаты солнца при его движении по условному небосводу определяются двумя угловыми параметрами: высотой стояния солнца h_0 (град.), то есть углом между линией солнечного луча и горизонтальной плоскостью, а также азимутом A_0 (град.) – то есть углом между нулевым направлением круга горизонта и проекцией солнечного луча на горизонтальную плоскость. В зависимости от задачи проектирования в качестве нулевого направления используют либо направление на север и отсчет азимута ведут по часовой стрелке (до 360 градусов), либо направление на юг и отсчет азимутов ведут в сторону востока и в сторону запада (по 180 градусов). На рис. 5.1 приведена схема небесной полусферы с координатной сеткой для h_0 и A_0 , причем отсчет азимутов A_0 проводится от направления на юг. На координатной сетке показана траектория движения солнца для какой-либо календарной даты.

Из рис. 5.1 видно, что h_0 может изменяться от 0 град, когда солнце расположено на уровне горизонта, до 90 град, когда солнце в зените. Азимут A_0 может изменяться от 0, когда солнце ориентировано строго на юг (12 часов истинного солнечного времени), до 60–130 градусов в сторону востока или запада, до восхода или захода солнца.

Если схему движения солнца по небесной сфере, приведенной на рис. 5.1, спроектировать на горизонтальную плоскость, то получим графическое изображение перемещения солнца по небосводу на плоской поверхности, так называемую **солнечную карту**. Солнечная карта представляет собой координатную сетку, вписанную в круг горизонта, для h_0 (концентрические окружности) и для A_0 (радиусы, сходящиеся в т. О), на которой приводятся суточные траектории движения солнца на определенные календарные даты.

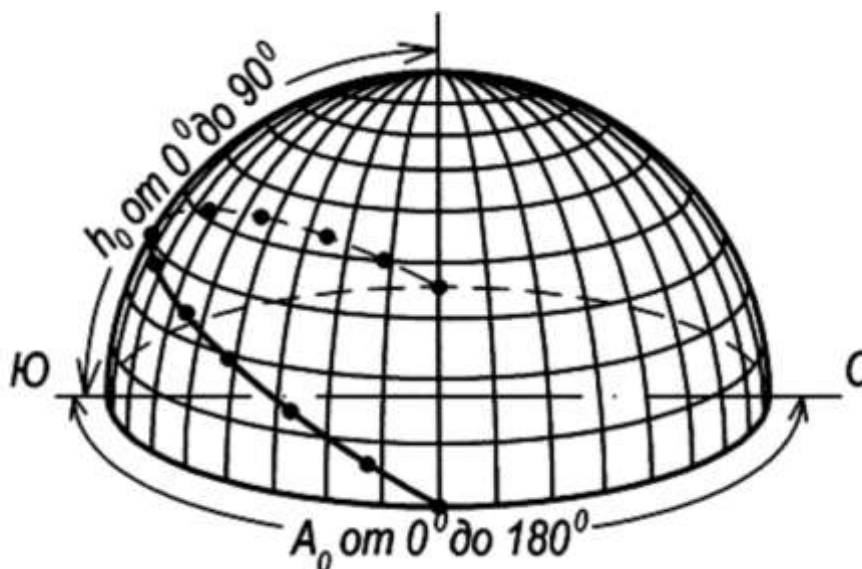


Рис. 5.1. Движение солнца по небесной полусфере. h_0 – высота стояния солнца, град;
 A_0 – азимут, град; —●— траектория движения солнца

Прямая проекция траектории движения солнца и координатной сетки на горизонтальную плоскость дает так называемую **проекционную солнечную карту**, особенность которой состоит в том, что концентрические окружности малых высот стояния солнца расположены близко друг к другу, а это снижает точность расчетов (рис. 5.2). Наибольшее применение получили так называемые, **развернутые солнечные карты**, у которых концентрические окружности высот стояния солнца h_0 расположены через равные расстояния, рис. 5.3.

На рисунках 5.2 и 5.3 приведены солнечные карты с траекториями движения солнца в характерные дни года: в дни летнего и зимнего солнцестояний – 22 июня и 22 декабря, а также в дни весеннего и осеннего равноденствий – 22 марта и 23 сентября, соответственно. В качестве нулевого направления выбрано направление на север.

Солнечные карты разрабатываются для конкретной географической широты местности и являются основой для всех инсоляционных расчетов. Для составления солнечной карты на любые календарные даты требуется информация о высоте стояния солнца h_0 и его азимуте A_0 на каждый час светового дня.

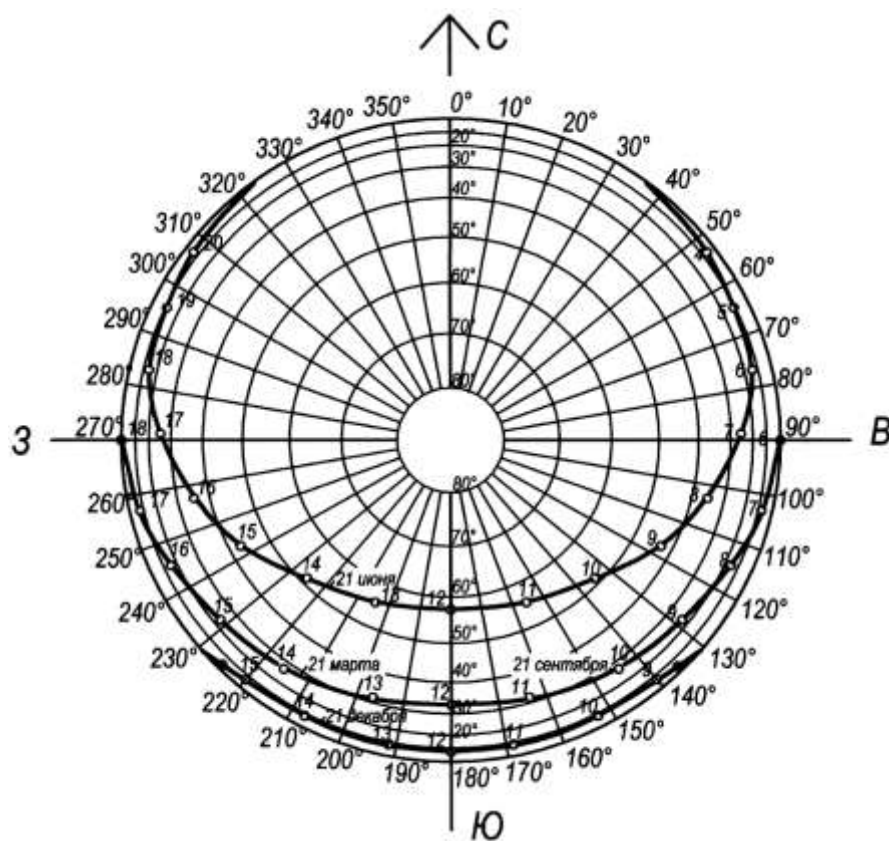


Рис. 5.2. Проекционная солнечная карта для широты 56°

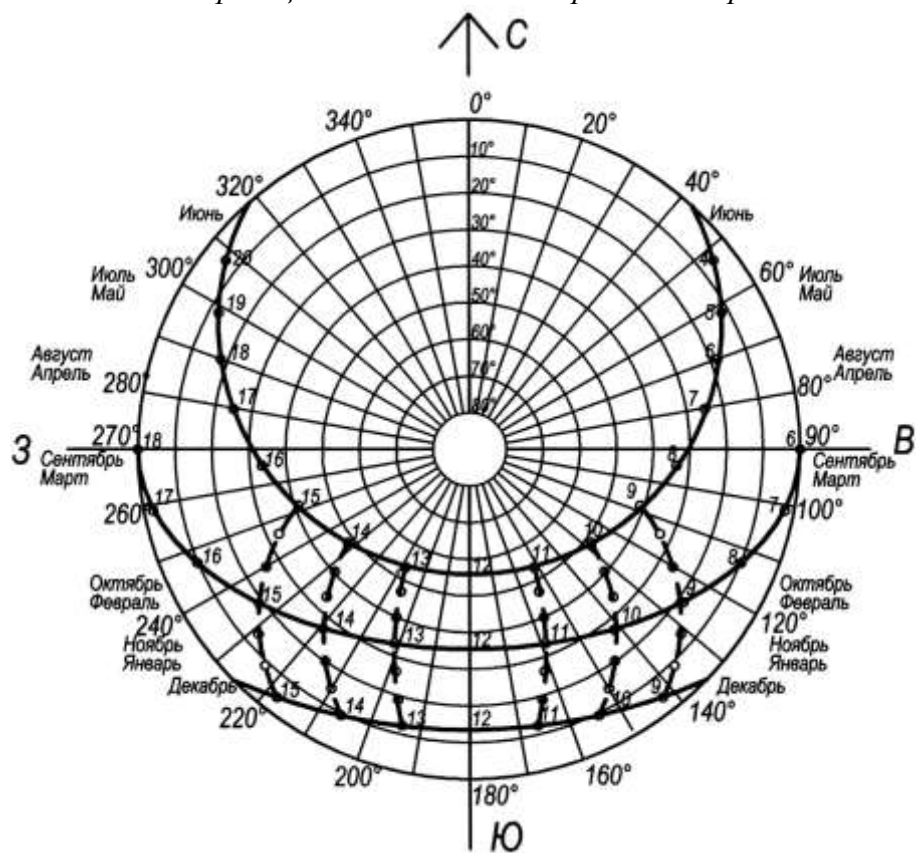


Рис. 5.3. Развернутая солнечная карта для широты 56°

5.3. Инструменты по оценке продолжительности инсоляции

Основные задачи, которые возникают при оценке продолжительности инсоляции территорий и помещений зданий, решаются с использованием следующих графических инструментов:

1. Солнечная карта
2. Инсографик
3. Картограмма объектов затенения
4. Картограмма светопроема

5.3.1. Построение солнечной карты

Последовательность расчета:

1. Вычерчивается координатная сетка для солнечной карты, которая представляет собой круг горизонта, в который вписаны концентрические окружности высот солнца h_0 и D_0 на линии горизонта до 90° в центре круга горизонта – точка 0, а также радиусы, сходящиеся в центре круга горизонта, точке 0 – азимуты A_0 .

2. Значения координат солнца h_0 и A_0 в каждый час светового дня для расчетной календарной даты с учетом географической широты места строительства наносят на координатную сетку. Соединением координат солнца в каждый час суток от восхода до заката единой линией получим траекторию движения солнца на координатной сетке, то есть солнечную карту.

Пример построения солнечной карты для условий Казани для календарной даты 22 апреля приведен на рис. 5.4. Координаты солнца для этой даты h_0 и A_0 взяты из таблицы 5.1.

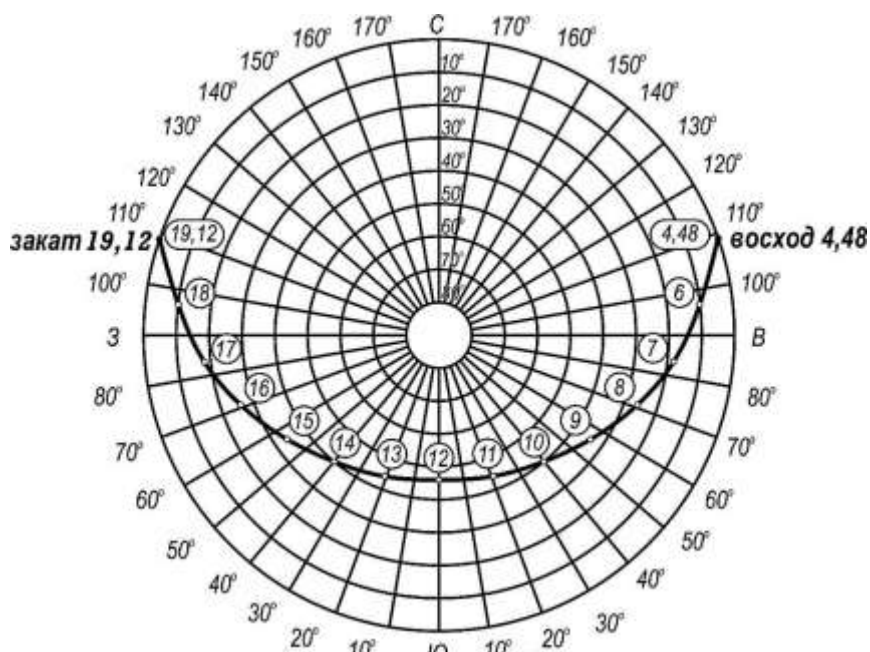


Рис. 5.4. Солнечная карта с траекторией солнца для заданной календарной даты, 56° с.ш. (22.04 – 22.08)

Таблица 5.1

Координаты солнца h_0 и A_0 на 22 апреля для 56° с.ш.

Координаты солнца, град.	Часы суток (солнечное время)							
	Восход и Закат	6 и 18	7 и 17	8 и 16	9 и 15	10 и 14	11 и 13	12
Высота, h_0	0	10	18	26	34	40	44	46
Азимут, A_0 (от напр. на юг)	108	± 97	± 84	± 71	± 56	± 40	± 21	0

Примечание: восход в 4 ч 48 мин, закат в 19 ч 12 мин

5.3.2. Построение инсографика

Инсографик состоит из объединения двух чертежей:

1. Системы веерных линий, сходящихся в точке О, которые являются частью солнечной карты и моделируют направление солнечных лучей (азимуты A_0) и, следовательно, **направление теней** в каждый час суток.

2. Квазипараллельные линии, соединяющие вершины теней, образующихся в течение светового дня от стержней или зданий разных высот, установленных в точке О. **Размеры теней** определяются высотами стержней или зданий и высотой стояния солнца (h_0).

Инсографик разрабатывается для определенной географической широты местности и нормативной календарной даты, а его масштаб должен соответствовать масштабу подосновы. Как правило, это 1:500; 1:1000; 1:2000. Для удобства работы инсографик выполняется на тонком светопрозрачном носителе.

Начиная с первых отечественных норм по инсоляции 1963 года и до изменения к СанПиН в 2017 году в качестве календарной даты расчета инсоляции для центральной зоны ($48^\circ - 58^\circ$ с.ш.) был определен день весенне-осеннего равноденствия (22.03 и 22.09).

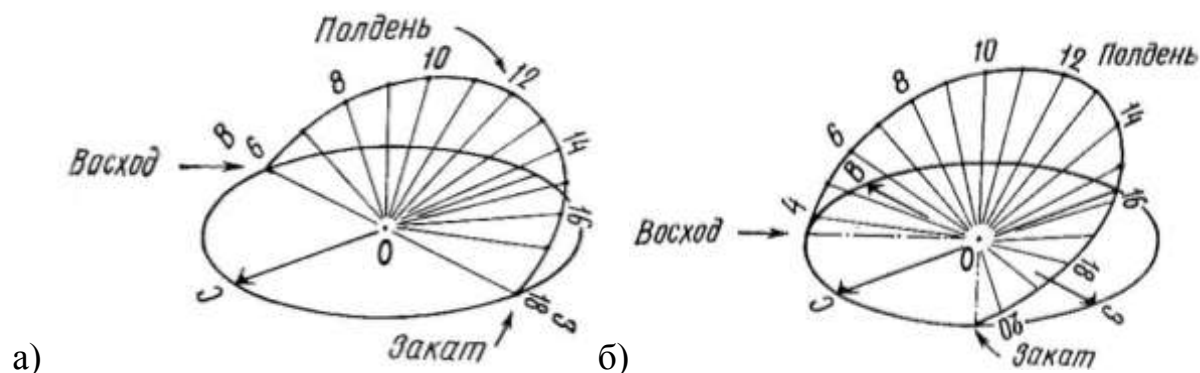


Рис. 5.5. Траектория движения солнца и направление солнечных лучей к точке О в день весенне-осеннего равноденствия (а) и в апреле месяце (б)

Особенность этого дня состоит в том, что солнечные лучи, приходящие к точке О в течение дня, лежат в одной плоскости (рис. 5.5 а), поэтому вершины теней от стержня или здания, установленных в точке О, перемещаются в течение дня по прямой линии, параллельной линии запад

– восток, а масштабная шкала теней представляет собой систему параллельных линий для зданий разной высоты.

В 2017 году были утверждены изменения к СанПиНу по инсоляции, согласно которым расчетная календарная дата для центральной зоны (48–58° с.ш.) перенесена с 22 марта на 22 апреля.

22 апреля солнечные лучи, приходящие в течение дня к точке О не лежат в одной плоскости как 22 марта, а образуют вогнутую поверхность (рис. 5.5 б), в связи с чем масштабная шкала теней будет представлять собой квазипараллельные линии определенной кривизны.

Построение масштабной шкалы теней выполняется расчетом в зависимости от высоты солнца h_0 и высоты стержня или здания H , которые установлены в точке О. Размеры теней в каждый час суток, в соответствии с рис. 5.6, определяются по формуле:

$$\text{Тень от } H = H \cdot \operatorname{ctg} h_0, \quad (5.1)$$

где h_0 – высота солнца в соответствующий час суток, град.

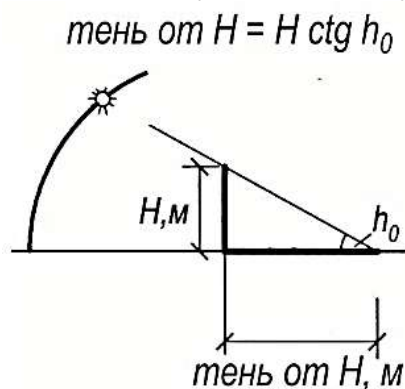


Рис. 5.6. Схема к построению масштабной шкалы теней

Например, для географической широты 56° с.ш. (Казань) в 12⁰⁰ высота солнца $h_0 = 46^\circ$, тень от $H = H \cdot \operatorname{ctg} 46^\circ = H \cdot 0,9657$. Для стержня (или здания) высотой $H = 10$ м тень от $H = 10 \cdot 0,9657 = 9,7$ м.

При построении инсографика размер теней от стержня высотой H составляет $H \cdot \operatorname{ctg} h_0$, а вершины теней на квазипараллельных линиях обозначаются высотой стержня (или здания) H .

Для построения инсографика требуется информация о высоте солнца h_0 и азимуте A_0 в каждый час суток для заданной географической широты местности и расчетной календарной даты, которые приведены в астрономических таблицах, например, в таблицах Тваровского.

Построение инсографика включает несколько последовательных этапов:

1. В центре листа бумаги проводят вертикальную линию – ось инсографика, на которой обозначают точку О – начало инсографика (местоположение наблюдателя, расчетная точка).

2. Проводят часовые азимуты (A_o) – направления солнечных лучей в каждый час светового дня, которые собираются к точке О в виде верных линий.

3. От точки О вдоль часовых азимутов отмеряют размеры теней от стержней разных размеров.

5. Вершины теней для каждой высоты стержня соединяют линиями, которые являются суточными траекториями вершин теней от стержней установленных в точке О. Полученная система квазипараллельных линий и представляет собой масштабную шкалу теней.

Пример 5.1. Построить инсографик для широты 56° с.ш. на календарную дату 22 апреля. Расчет масштабной шкалы теней приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Расчет параметров инсографика (на 22 апреля, 56° с.ш.)

Координаты солнца, град.	Часы суток (солнечное время)						
	6 и 18	7 и 17	8 и 16	9 и 15	10 и 14	11 и 13	12
Азимут, A_o (от напр. на юг)	97	84	71	56	40	21	0
Высота стояния, h_o	10	18	26	34	40	44	46
Stgh_o	5,67	3,08	2,05	1,48	1,19	1,04	0,97
Высота стержня	Протяженность тени от стержня высотой Н, м, $= H \cdot \text{Stgh}_o$, м						
Н = 10 м	57	31	20	15	12	10,4	9,7
Н = 20 м	114	62	40	30	24	20	19
Н = 30 м	171	93	60	45	36	30	29
Н = 40 м	228	124	80	60	48	40	39
Н = 50 м	285	155	100	75	60	50	49
Н = 60 м	342	186	120	90	72	60	59

Общий вид инсографика, построенного по данным таблицы 5.2, приведен на рис. 5.7. При определении продолжительности инсоляции инсографик и подоснова должны быть выполнены в одном масштабе.

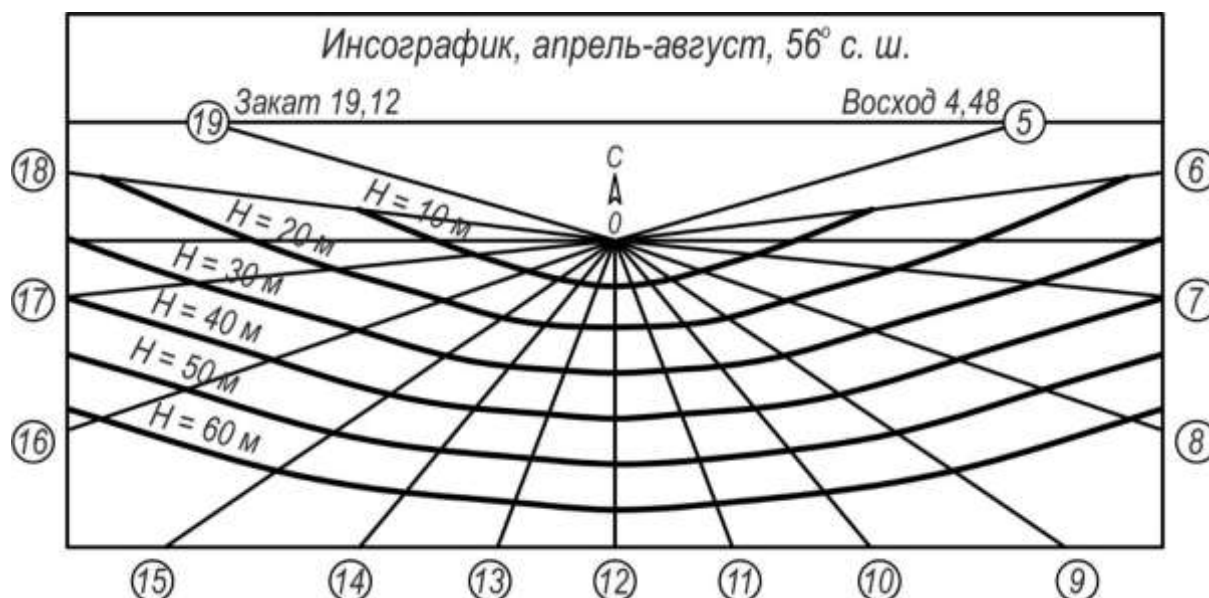


Рис. 5.7. Инсографик для 56° с.ш. на 22 апреля

Размеры теней от стержней разных высот в таблице 5.2. приведены в метрах. При построении инсографика на светопрозрачном носителе (тонкий пластик, калька) размеры теней должны быть переведены в масштаб подосновы (1:500; 1:1000; 1:2000) по известным методикам.

5.3.3. Построение картограмм затеняющих объектов

При анализе инсоляции детских, спортивных, школьных и других площадок, находящихся вблизи отдельно стоящих или группы зданий эффективно используются так называемые картограммы затеняющих объектов.

Картограммы затеняющих объектов представляют собой проекцию небесной полусферы на круг горизонта, у которой выделен участок закрытый затеняющим объектом от наблюдателя, находящегося в центре круга горизонта, точке О.

Границы участка небосвода, закрытого от наблюдателя, определяются вертикальными и горизонтальными углами затенения. Общее представление о построении картограммы затеняющих объектов поясняется рисунком 5.8.

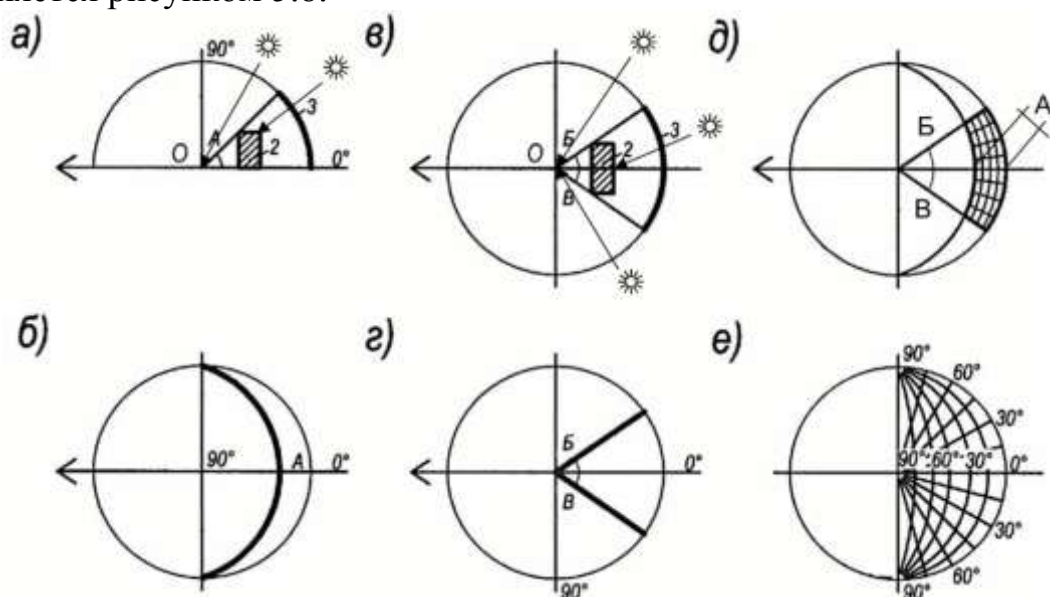


Рис. 5.8. Построение картограммы затеняющих объектов.

а) формирование вертикального угла затенения (А) и его изображение на картограмме (б); в) формирование горизонтальных углов затенения (Б и В) и их изображение на картограмме (г); д) невидимый наблюдателю участок небосвода (заштрихован) на картограмме; е) контурная сетка картограммы

Построение углов затенения имеет ряд особенностей.

Вертикальные углы затенения зданий определяются, как правило, только в одном сечении застройки – вдоль нормали к фасаду из РТ. Вертикальные углы затенения по остальным сечениям здания устанавливаются автоматически по эксцентрическим круговым дугам

контурной сетки, предназначенной для построения картограмм объектов затенения (рис. 5.8 е).

Величина вертикального угла затенения A в указанном сечении может быть определена двумя способами:

1. Графически, по сечению застройки, по нормали к плоскости фасада из РТ, построенного в масштабе и измерении на чертеже угла A .

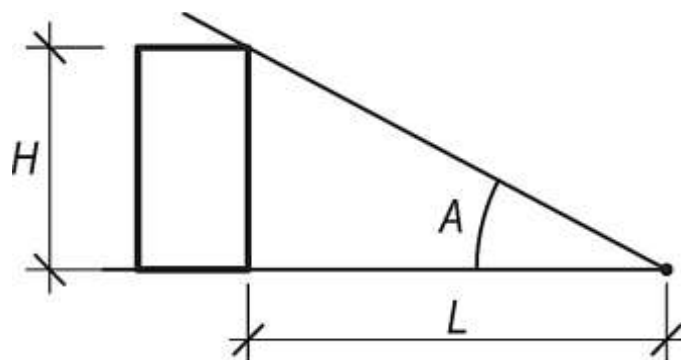


Рис. 5.9. К определению вертикального угла затенения A

2. Расчетом, с использованием тригонометрических функций, через высоту здания H и расстояния от здания до РТ по нормали к плоскости фасада L , как отношение:

$$H/L = \operatorname{tg} A \cdot \quad (5.2)$$

Горизонтальные углы затенения B и B определяются между лучами, исходящими из РТ к вертикальным углам здания, и лучом, исходящим из РТ по направлению нормали к фасаду здания.

Вертикальные и горизонтальные углы затенения, перенесенные на контурную сетку, образуют картограмму объекта затенения относительно РТ.

Пример 5.2. Построить картограммы затенения точки O от двух зданий на территории застройки. Здание № 1 имеет высоту $H_1 = 34$ м и отстоит от точки O на $L_1 = 50$ м. Здание № 2 имеет высоту $H_2 = 61$ м и отстоит от точки O на $L_2 = 70$ м. Схема застройки приведена на рис. 5.10.

На схеме застройки проводится серия лучей, исходящих из точки O . Четыре луча проходят через вертикальные углы зданий, лучи 1, 2, 3, 4, а два луча проходят по нормали к зданиям N_1 и N_2 .

Горизонтальные углы затенения B и B определяются между линиями нормали к зданиям (N_1 и N_2) и лучами, проходящими через вертикальные углы зданий (1, 2, 3, 4).

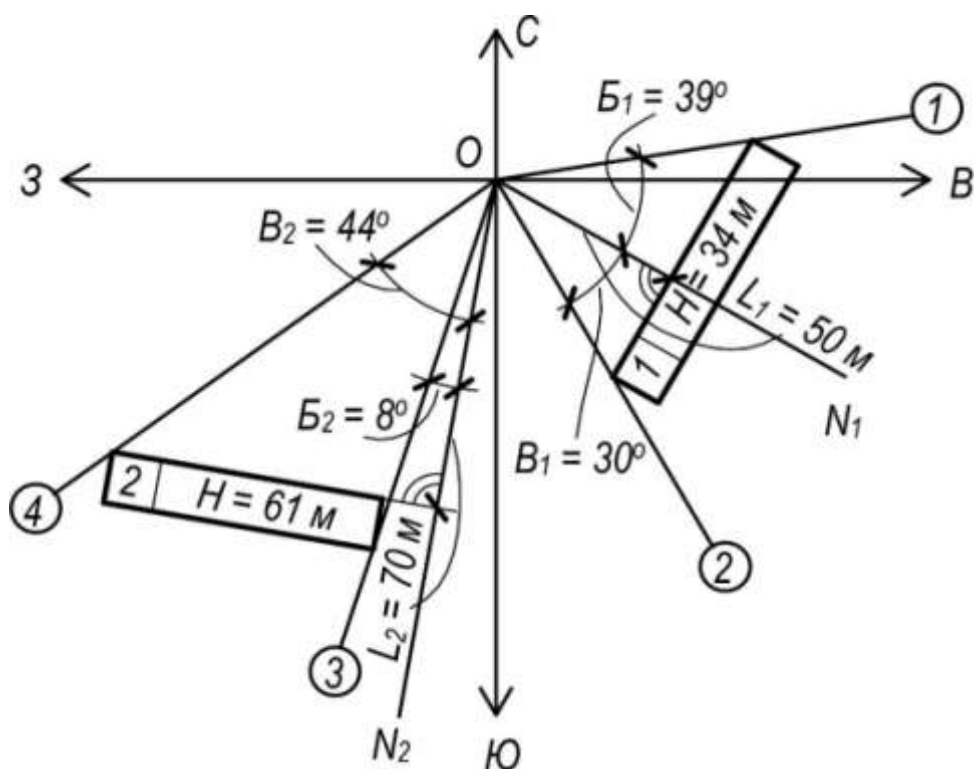


Рис. 5.10. Построение горизонтальных углов затенения (B и B₁) точки O от зданий № 1 и № 2

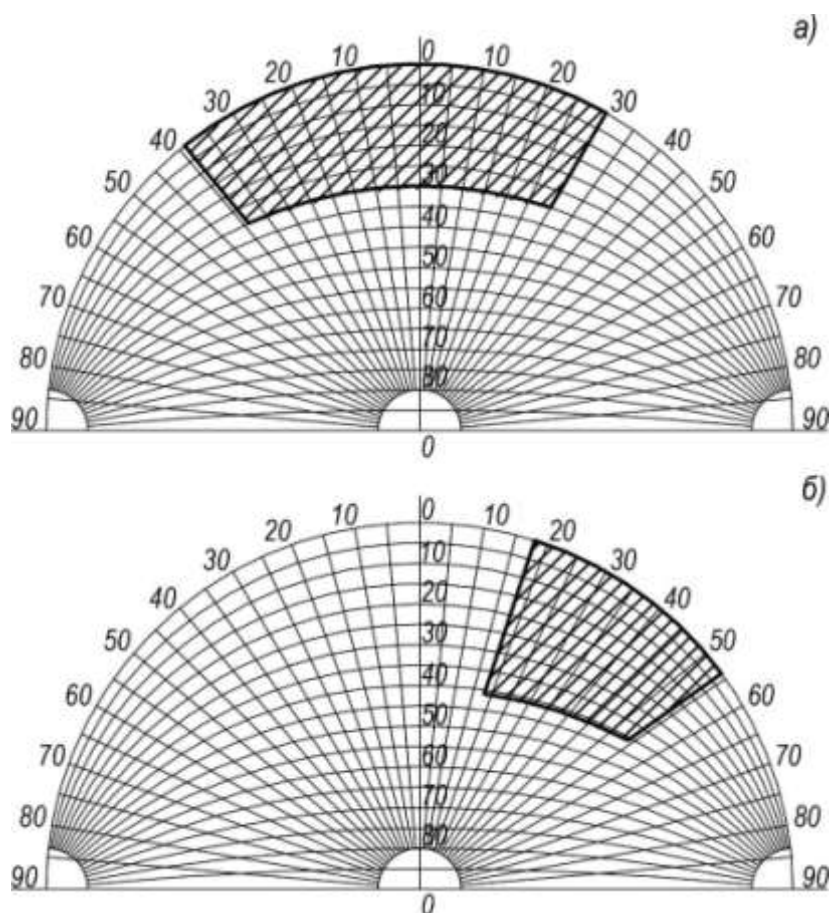


Рис. 5.11. Картограммы затенения точки O зданиями № 1 (а) и № 2 (б)

У здания № 1: $B_1 = 39^\circ$, $B_1 = 30^\circ$

У здания № 2: $B_2 = 8^\circ$, $B_2 = 44^\circ$

Вертикальные углы затенения A определяются по формуле $\operatorname{tg} A = H/L$.

Для здания № 1, $\operatorname{tg} A_1 = H_1/L_1 = 34/50 = 0,6800$, угол $A_1 = 36^\circ$.

Для здания № 2, $\operatorname{tg} A_2 = H_2/L_2 = 61/70 = 0,8714$, угол $A_2 = 41^\circ$.

Углы затенения, перенесенные на контурную сетку, образуют картограммы затенения точки O зданиями № 1 и № 2, рисунок 5.11.

5.3.4. Построение картограмм светопроемов

В противоположность картограмме затеняющих объектов, в картограмме светопроемов выделяется та часть небосвода, которую видит наблюдатель из помещения через световой проем. Выделение участка условного небосвода основано на тех же принципах, через построение вертикальных и горизонтальных инсоляционных углов.

Величина указанных углов зависит от конструктивных и геометрических параметров здания: толщины наружных стен, размеров светопроемов, местоположения оконной коробки в светопроеме, наличия балконов, лоджий и других фасадных элементов.

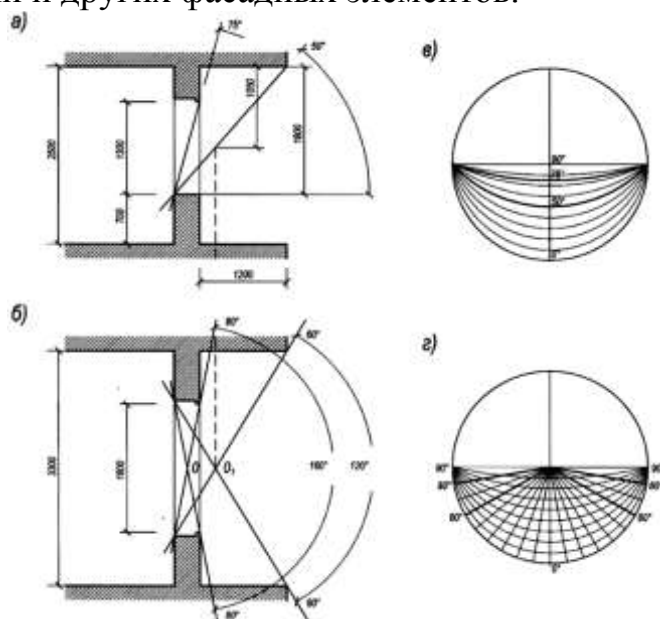


Рис. 5.12. Построение вертикальных (а) и горизонтальных (б) инсоляционных углов и их расположение на картограмме (в и г)

На рис. 5.12 приведен пример определения вертикальных и горизонтальных инсоляционных углов на разрезе и плане светопроема (а и б), а также их расположение на картограмме светопроема (в и г). Показаны размеры инсоляционных углов без лоджии (75° и $\pm 80^\circ$) и с лоджией (60° и $\pm 60^\circ$).

Объединив вертикальные и горизонтальные инсоляционные углы (в и г, рис. 5.12 в и г) на контурной сетке, получим картограмму светопроема для окна без лоджии и окна с лоджией (рис. 5.13).

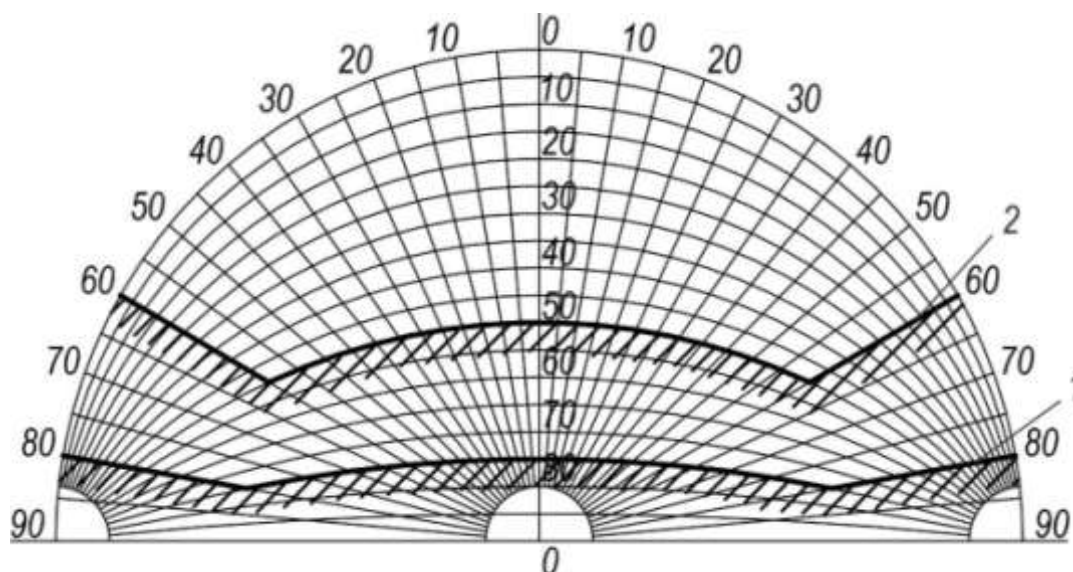


Рис. 5.13. Картограмма светопроема окна (1) и окна с лоджией (2)

Незаштрихованная часть картограммы является той частью небосвода, которую видит наблюдатель из помещения. Следует отметить, что картограмма светопроема – это его конструктивная характеристика, которая обеспечивает помещения инсоляционным ресурсом при соответствующей ориентации светопроема по сторонам горизонта, когда солнечные лучи попадают в светопроем.

5.4. Типовые задачи по определению продолжительности инсоляции территорий и помещений зданий

5.4.1. Построение и анализ конверта от здания

Конверт теней от здания (зданий) выполняется с использованием инсографика. Для этого инсографик разворачивают точкой О к югу, а ось инсографика ориентируют по направлению север-юг. Точку О инсографика совмещают с северным углом здания и вдоль направления солнечных лучей в каждый час суток строят тени от здания.

При построении конверта теней вершины теней от здания высотой Н, м, заканчиваются на дуге вершин теней той же высоты (рис. 5.14). При этом границы теней от здания направлены либо параллельно солнечным лучам, либо параллельно граням здания.

Анализ конверта теней позволяет оценить общую картину затенения – облучения придомовой территории и установить зоны с требуемой облученностью в течение дня для размещения детских, спортивных или других аналогичных площадок.

Пример 5.3. На территории застройки вблизи здания (рис. 5.14) установлено пять расчетных точек (РТ1 – РТ5). Требуется оценить продолжительность затенения или облучения каждой расчетной точки на территории.

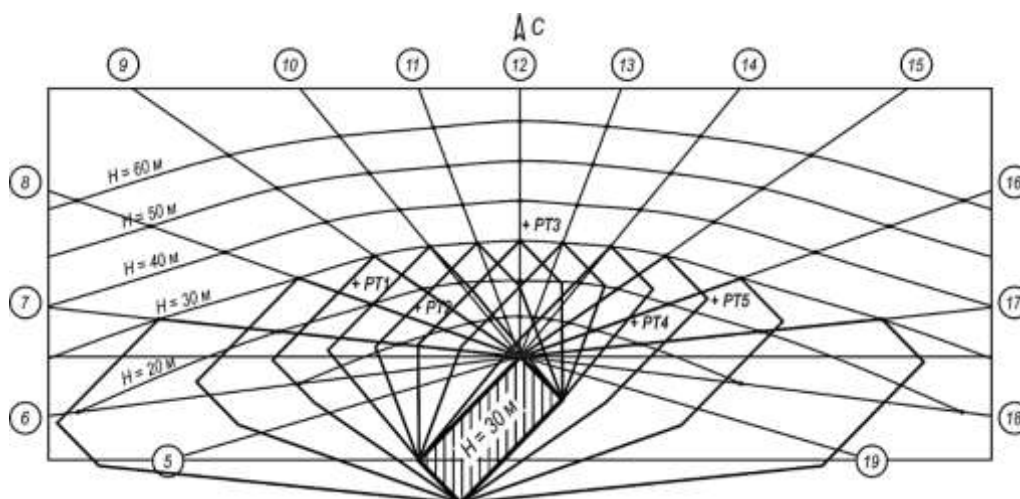


Рис. 5.14. Построение конверта теней от здания высотой $H = 30$ м.

Так, PT1 затенена только в 9 часов, в остальные часы суток она освещена солнцем. PT2 – затенена три часа, она находится в зоне теней в 9, 10 и 11 часов. PT3 – освещена весь день, поскольку находится за границей вершин теней от здания. PT4 находится в зоне теней два часа – 15 и 16 часов, а PT5 затенена только в 16 часов, в остальное время светового дня эти расчетные точки освещены солнцем.

5.4.2. Определение гарантижно-инсоляционных зон

При включении нового объекта в существующую застройку возникает задача сохранения нормативной продолжительности инсоляции в помещениях существующих зданий. С этой целью новый объект должен быть размещен на определенном расстоянии от существующего, чтобы не оказаться объектом затенения. Удаление нового объекта определяется его высотой и расположением по сторонам горизонта. Таким образом, для сохранения нормативной продолжительности инсоляции существующего здания требуется обеспечить не просто удаление нового объекта, а обеспечить свободную зону на территории застройки со стороны солнечных лучей. Эта территория и получила название «гарантижно-инсталляционная зона» (ГИЗ).

Для построения гарантижно-инсоляционных зон используются планировочное решение существующей застройки и инсографик, выполненные в одном масштабе. Схема построения ГИЗ представлена на рис. 5.15.

Последовательность построения ГИЗ:

1. Определяют горизонтальный инсоляционный угол α по горизонтальному разрезу светопроема существующего здания, как показано на рис. 5.15 а. Этот угол определяет время суток окончания инсоляции светопроема.

2. Точку О инсографика совмещают с юго-восточным углом существующего здания, с точкой А, ось инсографика располагают по направлению север-юг, а инсоляционный угол α откладывают от солнечного луча в 12^{00} и отмечают время окончания инсоляции. По рис. 5.15 б это время условно принято как 11^{30} .

3. Определяют время начала инсоляции путем вычитания нормативной продолжительности инсоляции (примем 2 часа) из времени окончания инсоляции. Получим $11^{30} - 2^{00} = 9^{30}$.

4. Переносят инсографик в северо-восточный угол существующего здания и совмещают точку О инсографика с точкой Д, ось инсографика располагают по направлению север-юг. Выделяют направление солнечного луча в 9^{30} (время начала нормируемой продолжительности инсоляции).

5. Фиксируют пересечение солнечного луча в 9^{30} с дугами вершин теней от зданий высотой Н.

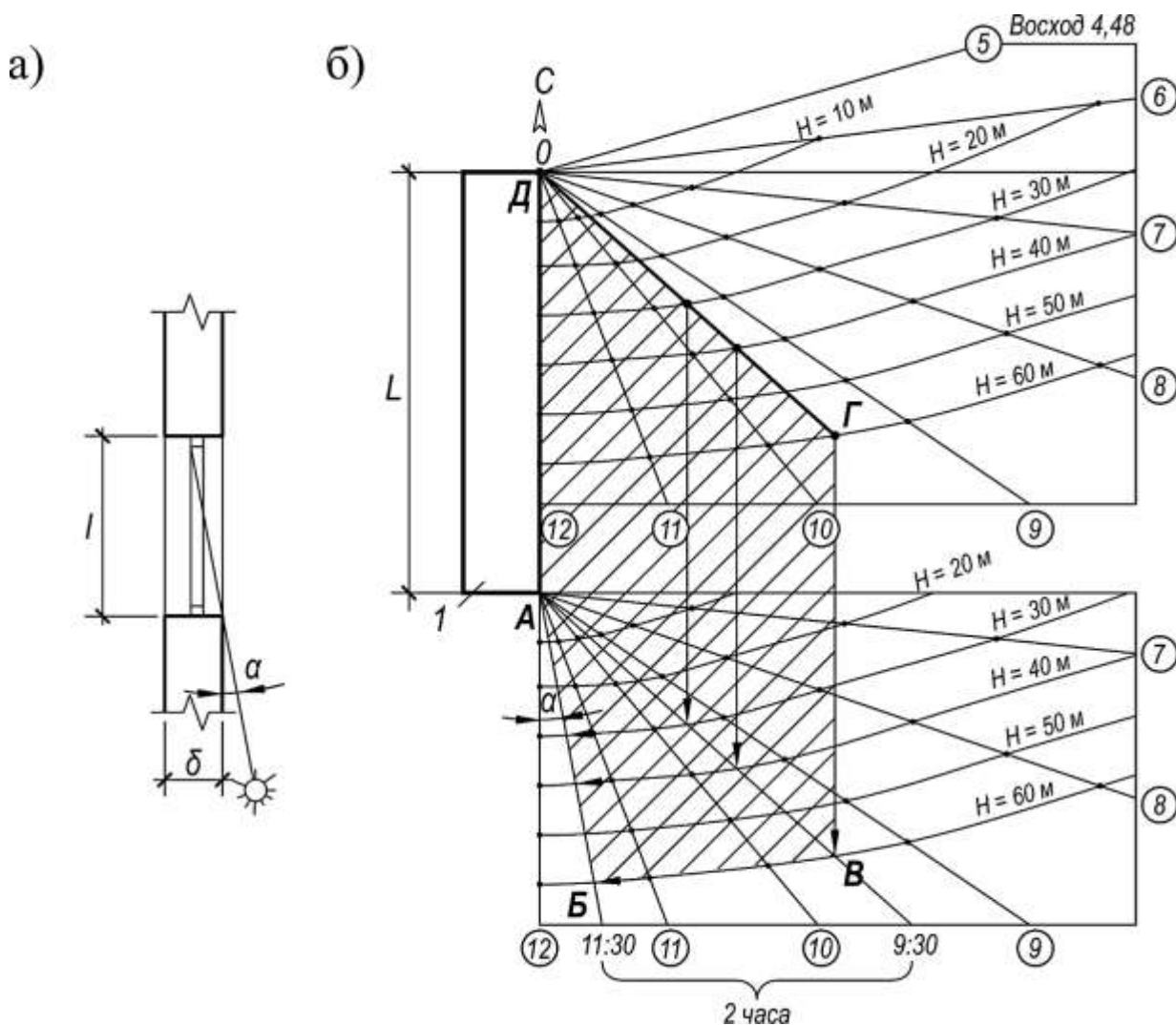


Рис. 5.15. Построение гарантийно-инсоляционных зон:

а) к определению горизонтального инсоляционного угла α ;

б) построение ГИЗ; 1 – существующее здание; L – протяженность здания

Для зданий высотой $H = 60$ м на северном инсографике – это точка Г, а на южном инсографике – это точка В. Следует отметить, что расстояние между точками В и Г равно протяженности здания L.

Формирование гарантийно-инсоляционной зоны начинают на северном инсографике по стрелке заданной высоты H планируемого к застройке здания. Для высоты планируемого здания $H = 60$ м гарантийно-инсоляционная зона ограничена многоугольником АБВГД. Для высот планируемых зданий $H = 30$ и 40 м площади ГИЗ будут меньше (рис. 5.15 б).

5.4.3. Инсоляция расчетной точки, расположенной на территории застройки вблизи одиночного здания

5.4.3.1. Определение продолжительности инсоляции точки по инсограммике

Центральная точка О инсограммике обращена на север и совмещена с расчетной точкой, а ось инсограммике ориентирована по направлению север-юг, рис. 5.16. На этом рисунке здание высотой 30 метров расположено к юго-востоку от расчетной точки и на инсограммике пересекает дугу вершин теней для зданий $H = 30$ м. В связи с этим часть здания, которая оказалась между дугой вершин теней с $H = 30$ м и точкой О, будет затенять эту точку. Часовые лучи в 8^{00} и в 10^{00} выделяют интервал времени затенения точки О и представляют собой горизонтальные углы затенения. Таким образом, точка О, а, следовательно, и расчетная точка на территории, инсолируются в течение 10 часов (с 6^{00} до 8^{00} и с 10^{00} до 18^{00}). При этом в расчете не учтены первый час после восхода и последний час перед заходом солнца, как это предписано требованиями СанПиН. На рис. 5.16 эти часы также заштрихованы.

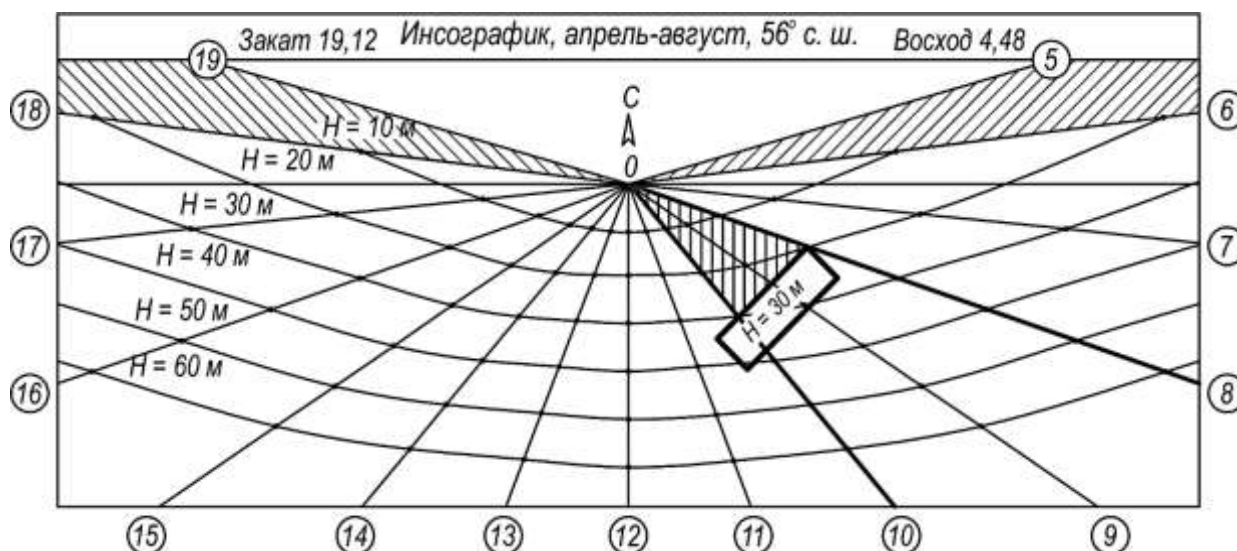


Рис. 5.16. Определение продолжительности инсоляции точки на территории вблизи отдельно стоящего здания

5.4.3.2. Определение продолжительности инсоляции точки по солнечной карте

Солнечная карта и картограмма объекта затенения удачно совмещаются между собой, поскольку построены на угловых единицах. Солнечная карта описывает траекторию движения солнца в течение дня по небосводу через **углы** азимутов и высот солнца. Картограмма объекта затенения через **углы** затенения определяет ту часть небосвода, которая не видна наблюдателю из расчетной точки О. Эти инструменты должны иметь одинаковые диаметры, а их объединение в один чертеж позволит определить отсутствие облучения точки О, когда траектория солнца оказывается в невидимой зоне небосвода, или определить продолжительность облучения точки О, когда траектория солнца проходит по видимой части небосвода.

Изменением параметров застройки и, следовательно, расположением их картограмм затенения на солнечной карте, можно регулировать продолжительность инсоляции расчетной точки.

Задачу по инсоляции точки О на территории застройки вблизи одиночного здания, решенную с использованием инсографика (рис. 5.16), можно решить также с использованием солнечной карты и картограммы объекта затенения.

Для этих целей, на схеме застройки проводятся лучи из точки О к углам здания, лучи 1 и 2, и определяются горизонтальные углы затенения, угол Б и угол В, которые образуются между этими лучами и нормалью N к плоскости фасада здания, проведенной из точки О, рис. 5.17.

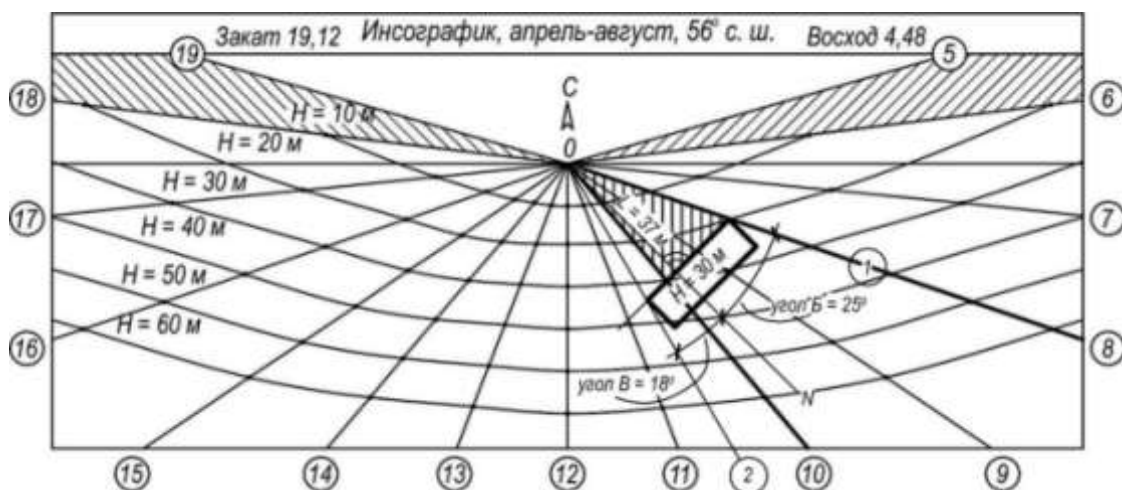


Рис. 5.17. Определение горизонтальных углов затенения Б и В точки О отдельно стоящим зданием

Вертикальный угол затенения А определяется тригонометрической функцией через отношение высоты здания Н к расстоянию от точки О по линии нормали к плоскости фасада L, то есть $\text{tg } A = H/L$. Расстояние L

определяется простым измерением в соответствии с масштабом застройки.
В данном случае по рис. 5.17 $L = 37$ м.

$$\operatorname{tg} A = H/L = 30/37 = 0,81, \text{ угол } A = 39^\circ$$

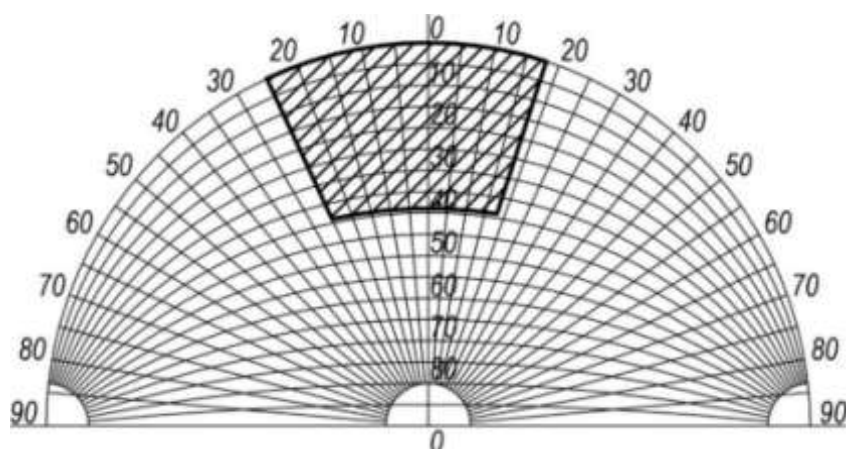


Рис. 5.18. Картограмма затенения точки O от здания

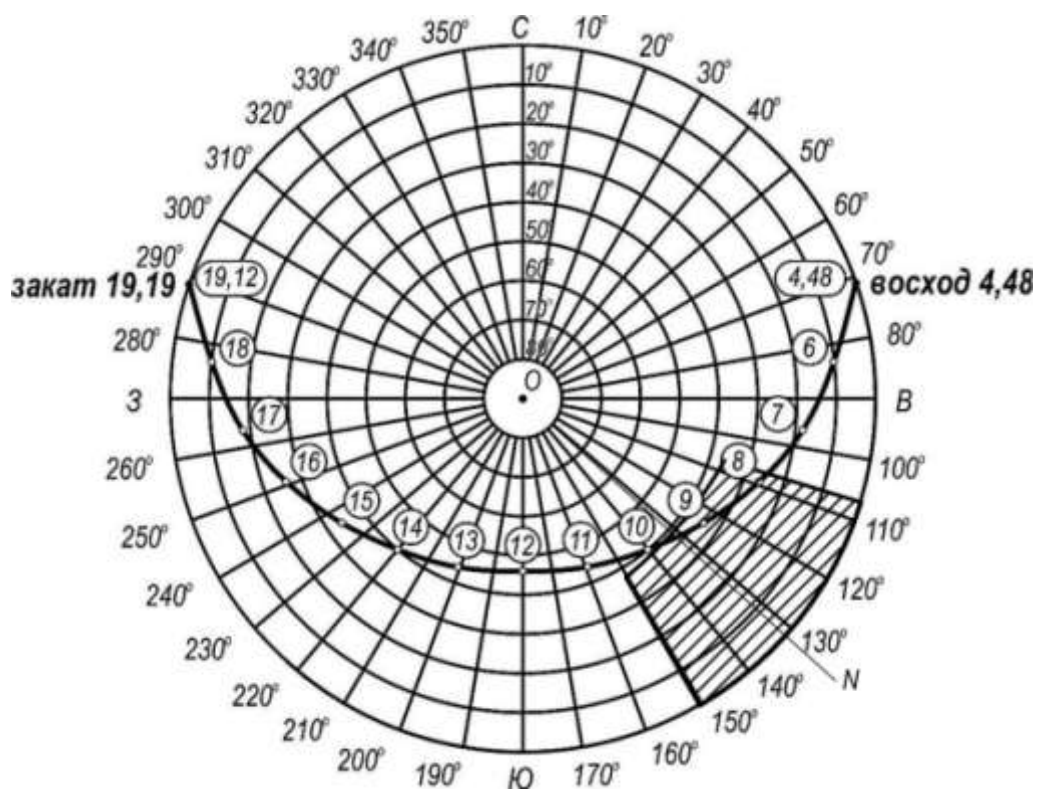


Рис. 5.19. Солнечная карта, совмещенная с картограммой затенения точки O от здания.

N – нормаль к фасаду затеняющего здания из точки O

Горизонтальные и вертикальный углы затенения переносятся на контурную сетку и образуют картограмму затенения точки O зданием, рис. 5.18. Картограмма затенения совмещается с солнечной картой таким

образом, чтобы азимут нормали к плоскости фасада соответствовал азимуту этой нормали на плане территории застройки, рис. 5.19.

Можно видеть, что параметры инсоляции точки О, определенные по инсографику (рис. 5.16) и по солнечной карте (рис. 5.19), полностью совпадают.

5.4.4. Инсоляция помещений зданий

Для оценки продолжительности инсоляции помещений используются как инсографики, так и солнечные карты (совместно с картограммами затеняющих объектов и светопроемов). Прежде всего требуется определить расположение расчетных точек в световых проемах. Нормативные документы полагают, что при заданной продолжительности облучения расчетной точки инсолируется все помещение.

5.4.4.1. Определение продолжительности инсоляции помещений по инсографику

Для оценки продолжительности инсоляции помещения требуется план застройки микрорайона, выполненный в масштабе 1:500; 1:1000; 1:2000 и инсографик для заданной географической широты местности на нормированную календарную дату, выполненный в том же масштабе.

На плане помещения и светопроема, выполненных в масштабе 1:20 или 1:50, определяют горизонтальные инсоляционные углы светопроема с учетом конструкции окна, вертикальных ограждений балконов, лоджий и вертикальных выступов на фасаде. На разрезе помещения и светопроема с учетом балконных плит, козырьков и выступов вышележащих этажей определяют вертикальные инсоляционные углы. На основании инсоляционных углов определяется местоположение расчетных точек (РТ) светопроемов (рис. 5.20).

На генплане застройки у исследуемого здания определяют местоположение расчетной точки, для которой наносят горизонтальные инсоляционные углы светопроема. Точку О инсографика ориентируют на север и совмещают с расчетной точкой светопроема, а ось инсографика ориентируют по направлению север-юг. По часам облучения точки О с учётом горизонтальных инсоляционных углов определяют продолжительность инсоляции. Это определение проводят как с учетом затеняющей застройки, так и без нее.

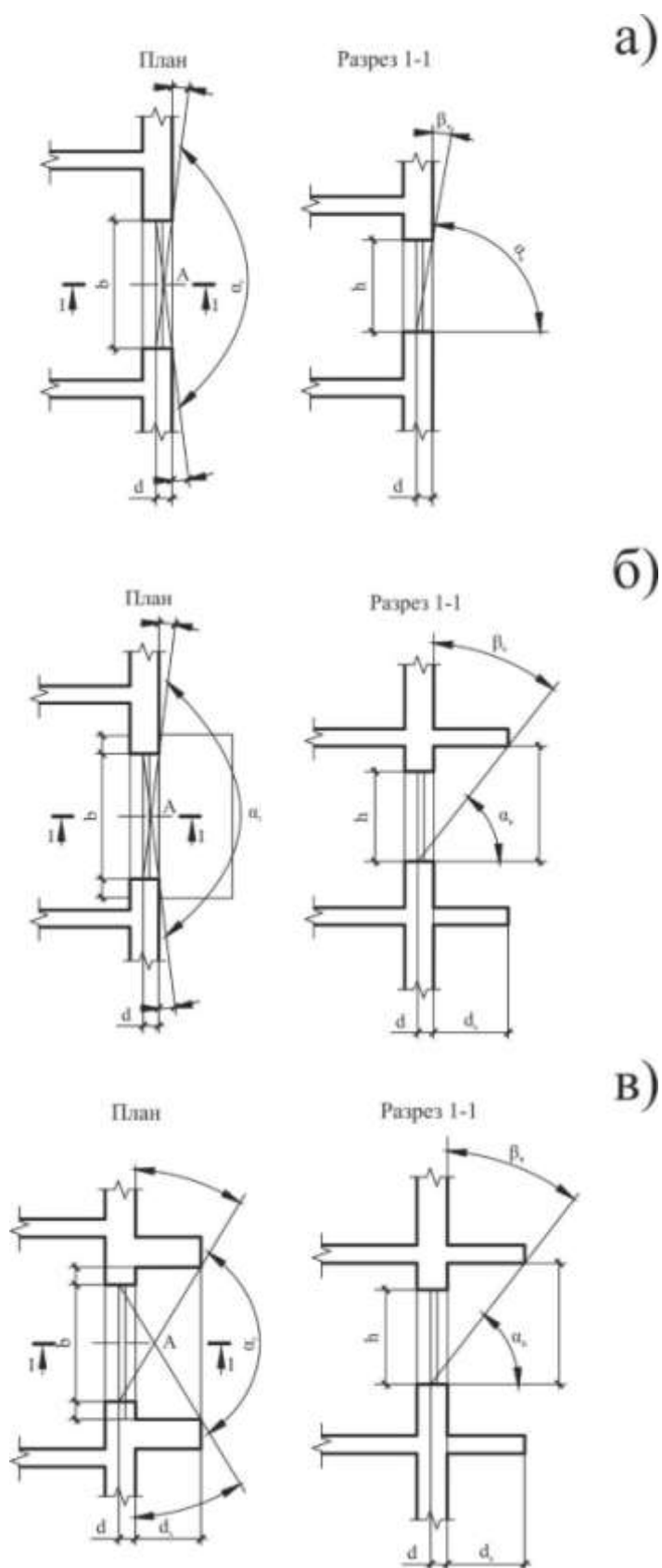


Рис. 5.20. Схема определения горизонтальных (по плану) и вертикальных (по разрезу) инсоляционных углов светопроемов и местоположения расчетных точек (А) в оконном проеме (а), оконном проеме с балконом (б) и оконном проеме с лоджией (в)

Подобные задачи целесообразнее рассматривать на числовых и графических примерах.

Пример 5.4. Определить продолжительность инсоляции помещения в здании № 1, расположенном вблизи здания № 2. Расположение зданий приведено на рисунке 5.21. Расчеты выполнить для 56° с.ш. на календарную дату – 22 апреля.

Для расчетов конструкцию окна примем по рис. 5.12. Для этой конструкции горизонтальные инсоляционные углы составляют:

- для окна $\pm 80^\circ$ от нормали к стене, которая проведена через расчетную точку;
- для окна с лоджией $\pm 60^\circ$ от нормали к стене, которая проведена через расчетную точку.

Вертикальные инсоляционные углы составляют: для окна – 75° ; для окна с лоджией – 50° .

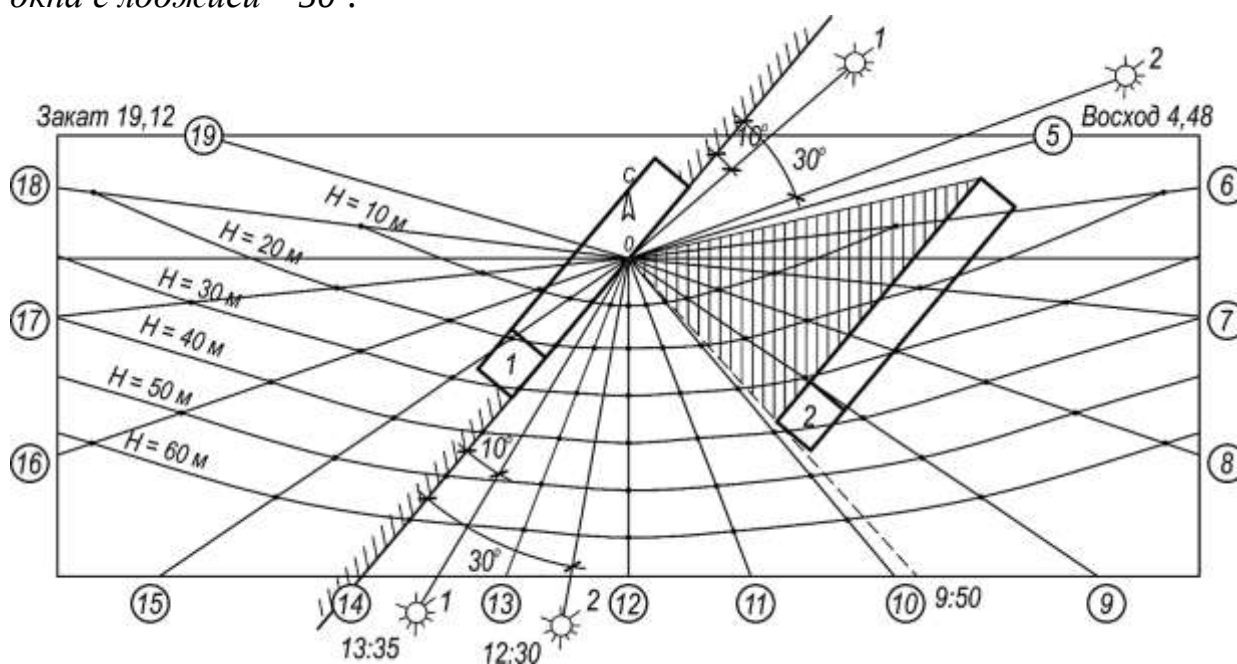


Рис. 5.21. Схема к определению продолжительности инсоляции помещения в здании № 1, расположенного вблизи здания № 2

Горизонтальные инсоляционные углы для окна 1-1 и для окна с лоджией 2-2

После совмещения инсографика с фрагментом застройки и нанесения на чертеже горизонтальных инсоляционных углов (1-1 и 2-2) и углов затенения от вертикальных ребер здания № 2 к расчетной точке можно оценить продолжительность инсоляции точки O (то есть РТ).

Без учета затенения зданием № 2 продолжительность инсоляции составит:

- для окна с 5^{48} до 13^{35} , то есть 7 часов 47 мин;
- для окна с лоджией с 5^{48} до 12^{30} , то есть 6 часов 42 мин.

С учётом затенения зданием № 2 продолжительность инсоляции составит:

- для окна с 9^{50} до 13^{35} , то есть 3 часа 45 мин;
- для окна с лоджией с 9^{50} до 12^{30} , то есть 2 часа 40 мин.

Таким образом, продолжительность инсоляции помещения в здании № 1 при всех вариантах соответствует требованиям СанПиН – не менее 2 часов.

5.4.4.2. Определение продолжительности инсоляции помещений по солнечной карте

Принцип определения продолжительности инсоляции помещений с использованием солнечной карты заключается в ее совмещении с картограммой светопроема и подсчете времени пребывания солнечного диска внутри картограммы светопроема.

При наличии в застройке зданий, расположенных со стороны солнечных лучей, требуется одновременно оценить вероятность затенения расчетной точки этими зданиями. Для этого солнечная карта совмещается не только с картограммой светопроема, но и с картограммами затенения соседними зданиями.

Азимут оси картограммы светопроема на солнечной карте должен совпадать с азимутом нормали к светопроему на плане застройки, и азимут оси картограммы затенения на солнечной карте должен совпадать с азимутом нормали к затеняющему зданию на плане застройки.

Пример 5.5. Задачу, рассмотренную в предыдущем примере 5.4, можно решить с использованием солнечной карты и картограмм затенения и светопроема.

Картограмма светопроема принята по рис. 5.12.

Горизонтальные инсоляционные углы составляют: для окна 80° , для окна с лоджией 60° от нормали к плоскости остекления, которая проведена через расчетную точку.

Вертикальные инсоляционные углы составляют: для окна – 75° , для окна с лоджией – 50° .

Картограмма светопроема помещения в здании № 1 приведена на рис. 5.13.

Картограмма затенения расчетной точки (точки О) зданием № 2 определяется путем построения и расчета углов затенения на плане застройки. Для этого на плане застройки проводят лучи затенения от точки О к вертикальным углам здания № 2 (лучи 1 и 2) и линию нормали N к плоскости фасада здания № 2. Горизонтальные углы затенения Б и В определяются между линией нормали N и лучом 1 – угол Б = 53° , а угол между линией нормали и лучом 2 – угол В = 8° , рис. 5.22.

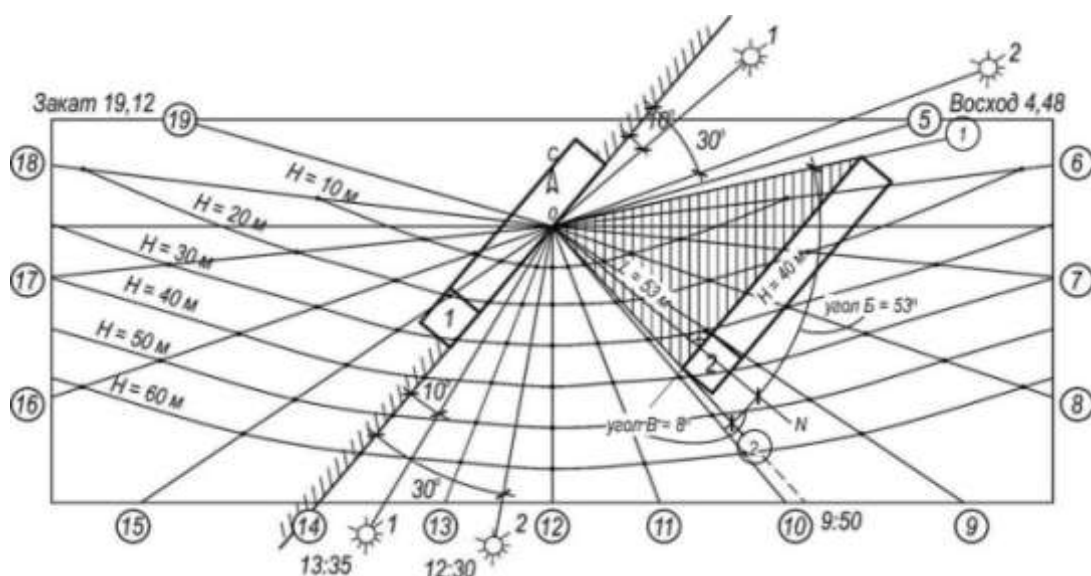


Рис. 5.22. Определение углов затенения Б и В на плане застройки

Вертикальный угол затенения А определяется расчетом через отношение высоты здания Н к расстоянию от точки О до здания № 2 по направлению нормали N – L.

$$\operatorname{tg} A = H/L = 40/53 = 0,7547, \text{ угол } A = 37^\circ.$$

Горизонтальные и вертикальный углы затенения переносятся на контурную сетку и образуют картограмму затенения точки О зданием № 2, рис. 5.23.

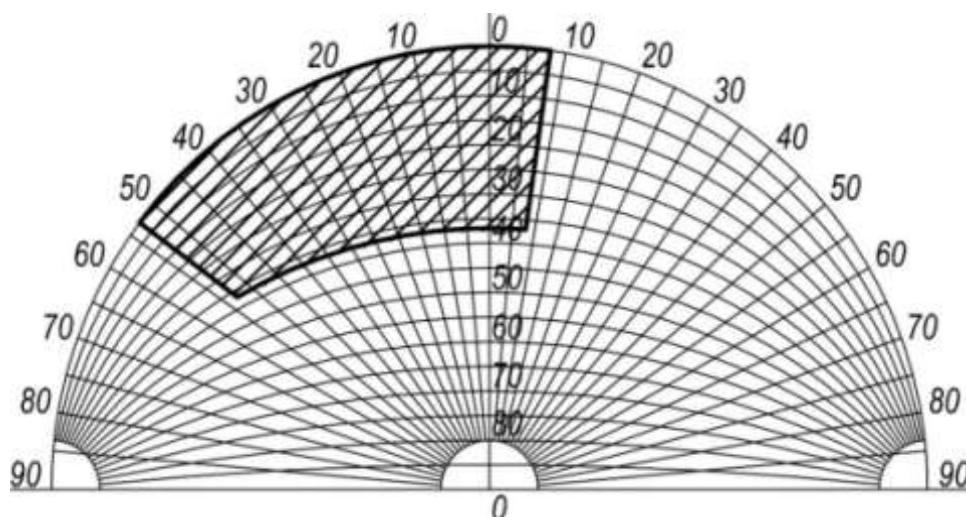


Рис. 5.23. Картограмма затенения точки О зданием № 2

Картограммы затенения и светопроема совмещаются с солнечной картой.

В рассматриваемом примере здание № 1 параллельно зданию № 2, поэтому азимуты оси картограммы светопроема и оси картограммы затенения зданием № 2 совпадают и составляют 50° от направления на юг, рис. 5.24.

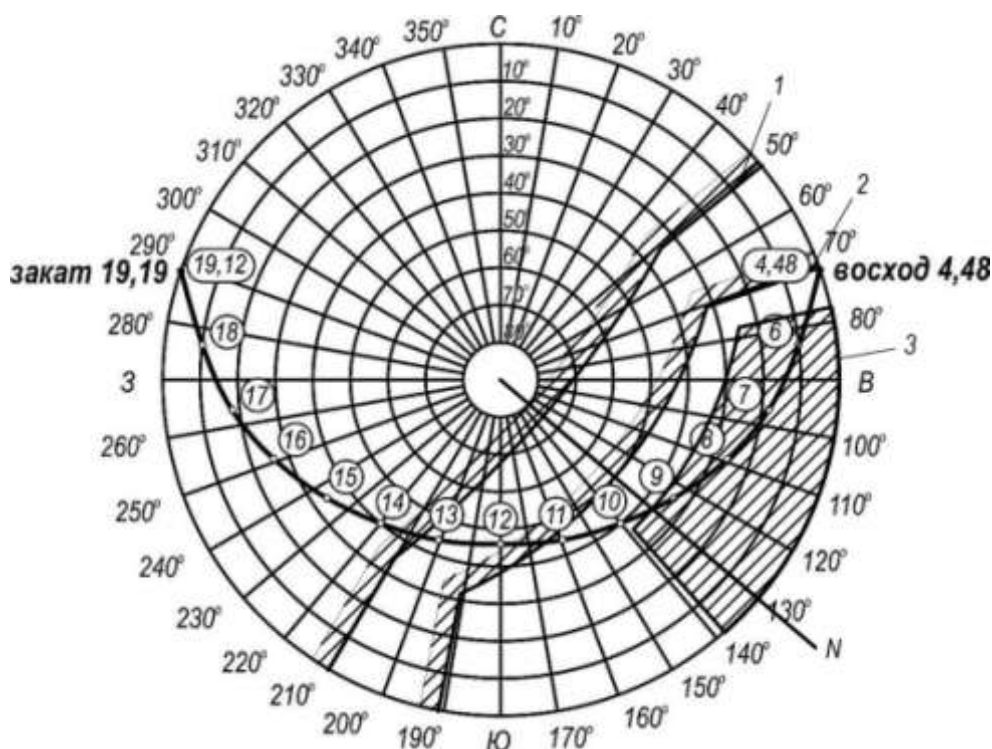


Рис. 5.24. Солнечная карта, совмещенная с картограммами светопроема и картограммой объекта затенения. 1 – картограмма окна; 2 – картограмма окна с лоджией;

3 – картограмма затенения зданием № 2.

N – нормаль к плоскости окна и плоскости фасада здания № 2

По солнечной карте можно определить значения продолжительности инсоляции помещения в здании № 1. Без учета затенения здания № 2 продолжительность инсоляции имеет следующие значения:

- для окна с 5^{40} до 13^{30} , – 7^{42} ;
- для окна с лоджией с 5^{48} до 12^{00} , – 6^{12} .

С учетом затенения зданием № 2 продолжительность инсоляции имеет следующие значения:

- для окна с 9^{50} до 13^{30} , – 3^{40} ;
- для окна с лоджией с 9^{50} до 12^{00} , – 2^{10} .

Сопоставление результатов, полученных с использованием солнечной карты и инсографика, указывает на совпадение результатов. Некоторое отклонение можно объяснить неточностью ручной графики.

РАДЕЛ VI. ЗАЩИТА ОТ ШУМА

6.1. Звук и шум. Основные понятия

Звук как физическое явление представляет собой волновое колебание упругой среды, в нашем случае – воздуха, воспринимаемое человеком через колебание ушной перепонки.

Шумом называют любой нежелательный звук или беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности.

Воздушные звуковые колебания возникают под действием колеблющихся тел – источников звука – и состоят из чередующихся друг за другом уплотнений и разрежений воздуха.

В воздушной среде возникает лишь один вид звуковых колебаний: волны сжатия и разрежения, то есть только продольные волны, в которых направление движения частиц совпадает с направлением звуковой волны. Это связано с тем, что воздушная среда имеет одну упругую постоянную – модуль упругости.

Твердые среды имеют две упругих постоянных: модуль упругости и модуль сдвига. В связи с этим в твердых телах образуются два вида волн – продольные и поперечные.

При поперечных волнах колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волн. В стержнях и пластинах эти волны проявляются колебаниями изгиба.

Физические состояния среды, в которой распространяется звуковая волна, характеризуются звуковым давлением – p и колебательной скоростью частиц среды – v .

Звуковое давление p – это разность между мгновенным значением давления и средним давлением в среде при отсутствии звуковой волны. В фазе сжатия звуковое давление положительное, в фазе разрежения – отрицательное. Единица измерения звукового давления – Н/м^2 , или Па.

Колебательная скорость частиц среды v – характеризуется мгновенным значением скорости колебательного движения частиц среды от своего положения покоя при распространении в ней звуковой волны. Колебательную скорость считают положительной, если частица движется в направлении распространения волны и отрицательной – при движении в обратную сторону. Единица измерения скорости частиц – м/с.

На рис. 6.1 дано представление о распространении звуковой волны от источника звука. Показано изменение звукового давления вдоль распространения звуковой волны (от $+p$ до $-p$), колебательная скорость частиц среды (от $+v$ до $-v$), показан период колебаний частиц (T) в секундах и длина волны (λ) в метрах.

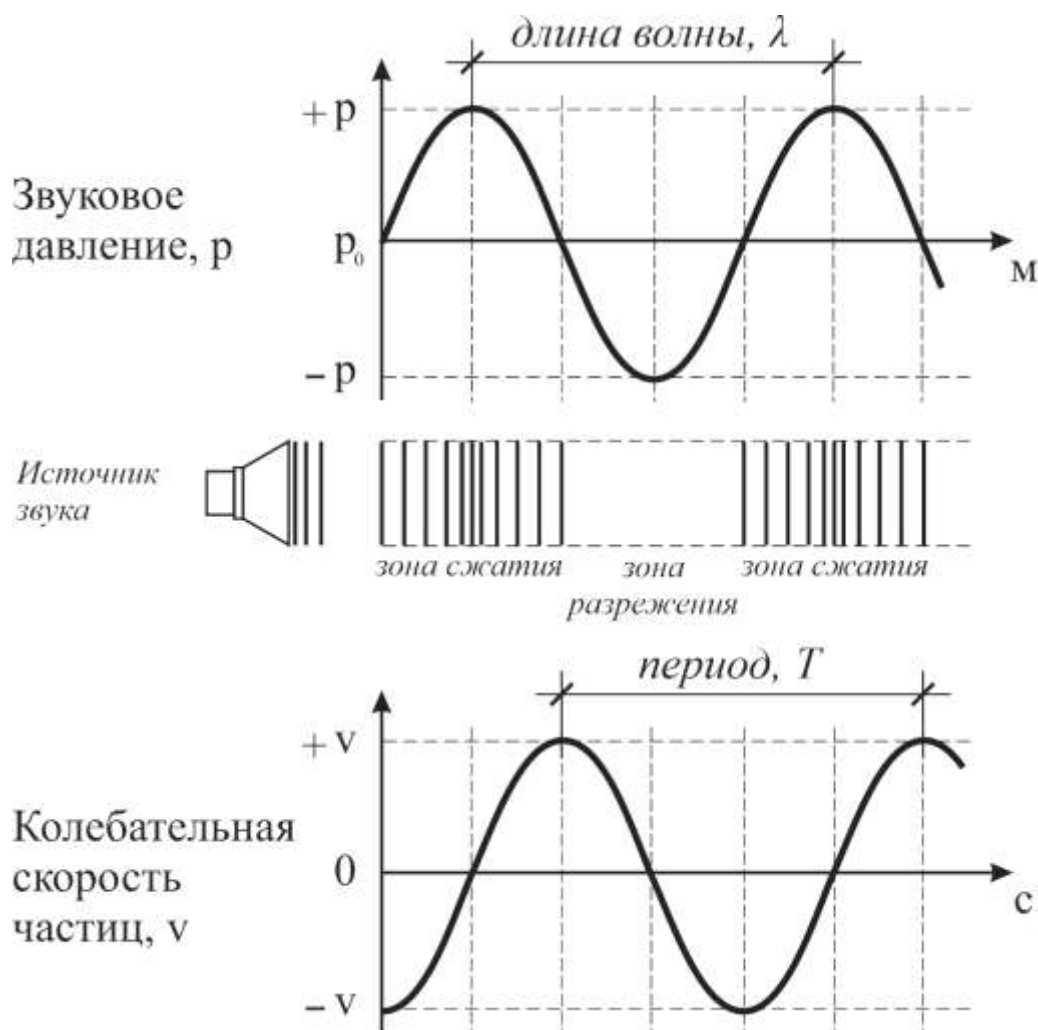


Рис. 6.1. Звуковое давление (p) и колебательная скорость частиц среды (v) в звуковой волне

Можно видеть, что фазы давления p и скорости v сдвинуты относительно друг друга на $\frac{1}{4}$ периода, то есть при экстремальных p скорость движения частиц v равна нулю, а при экстремальных скоростях v звуковое давление p равно нулевому значению p_0 . Во время одного периода T звуковая волна распространяется на одну длину волны λ .

Сформулированные представления позволяют получить параметры звуковой среды.

Скорость распространения звуковой волны, или скорость звука c , связана с периодом колебаний T или частотой колебаний f выражением:

$$c = \lambda \frac{1}{T} \text{ или } c = \lambda \cdot f, \text{ м/с.} \quad (6.1)$$

Скорость звука в воздухе зависит от температуры среды, однако в расчетах пользуются величиной скорости звука при 20°C – 340 м/с. Скорость звука в воде в 4 раза, а в металлах – в 10 раз выше, чем в воздухе. Частота звука f является важнейшей характеристикой звуковой волны. Частота определяет тон звуковой волны через число колебаний в единицу

времени. Единица измерения частоты – герц (Гц), одно колебание в секунду – 1 Гц.

По характеру шумов различают:

- **низкочастотные спектры**, у которых максимальное звуковое давление находится в области частот ниже 300 Гц;
- **среднечастотные спектры**, у которых максимальное звуковое давление находится в области частот 300–800 Гц;
- **высокочастотные спектры**, у которых максимальное звуковое давление находится в области частот выше 800 Гц.

В акустических расчетах чаще всего применяются октавные и третьоктавные (терциальные) полосы. В октавной полосе верхняя граничная частота в два раза больше нижней, в третьоктавной полосе это соотношение составляет 1,26. В таблице 6.1 приведены среднегеометрические частоты октавных и третьоктавных полос.

Таблица 6.1

Среднегеометрические частоты октавных и третьоктавных полос, Гц

Октавные полосы	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Третьоктавные полосы	50	100	200	400	800	1600	3150	6300
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000

Среднегеометрические частоты полос, представленные в таблице 6.1, определялись по формуле:

$$f_{cp} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}, \quad (6.2)$$

где f_1 – нижняя граничная частота, Гц;
 f_2 – верхняя граничная частота, Гц.

В соответствии со значениями среднегеометрических частот октавных полос (табл. 6.1) и формулы (6.2), длины волн в звуковых диапазонах лежат в пределах от 4,29 см до 5,44 м, что сопоставимо с размерами строительных конструкций и требует учета при анализе распространения в них звуковых волн.

6.2. Расчетные параметры звука

Звуковое давление – p – измеряется в Н/м² или Па.

Источник звука вызывает колебание частиц среды (молекул воздуха), непосредственно соприкасающихся с источником, которые, в свою очередь, передают колебания соседним частицам и т.д. – так возникает звуковая волна.

Чем больше мощность источника звука, тем больше амплитуда колебаний частиц среды и тем выше скорость частиц среды v . Таким образом, колебательная скорость частиц среды определяет величину звукового давления:

$$p = \rho \cdot c \cdot v, \quad (6.3)$$

где ρ – плотность воздуха (кг/м^3) и
 c – скорость звука в воздухе (м/с).

Произведение $\rho \cdot c$ называют удельным акустическим сопротивлением среды, через которую проходит звуковая волна. Для воздушной среды при нормальных условиях $\rho \cdot c = 420 (\text{Н} \cdot \text{с})/\text{м}^3$, тогда звуковое давление определится из выражения:

$$p = 420 \cdot v, \text{ Н/м}^2. \quad (6.4)$$

Интенсивность звука – J – это мощность на единицу площади в направлении распространения звуковой волны. Эту характеристику называют также силой звука:

$$J = \frac{p^2}{\rho \cdot c}, \text{ Вт/м}^2. \quad (6.5)$$

Звуковая мощность – W – это общее количество звуковой энергии, излучаемое источником звука в единицу времени. Звуковая мощность зависит от интенсивности звука J и от размеров источника звука, единица измерения – Вт:

$$W = \int_s J dS, \quad (6.6)$$

где s – замкнутая поверхность, окружающая источник звука, м^2 .

Величины звукового давления, интенсивности звука и звуковой мощности могут изменяться в очень широких пределах. Так, например, звуковое давление может изменяться от порога слышимости – $2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ до $2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, интенсивность звука – от 10^{-12} Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 .

Использовать в расчетах абсолютные значения рассматриваемых величин крайне неудобно, в связи с чем в технической акустике принято рассматривать их в относительных логарифмических единицах. Вводится понятие **уровня**, в котором абсолютные величины берутся в отношении к пороговым значениям и это отношение логарифмируется.

Уровень интенсивности звука L_i выражается в белах и определяется по формуле:

$$L_i = \lg \frac{J}{J_0}, \text{ бел}, \quad (6.7)$$

где J – интенсивность измеряемого звука, Вт/м²;
 J_0 – интенсивность порога слышимости – 10^{-12} Вт/м².

В практике акустических расчетов интенсивность звука оказалось удобнее измерять в децибелах, которые равны 1/10 бела, тогда формула (6.7) примет вид:

$$L_i = 10 \lg \frac{J}{J_0}, \text{ децибел (дБ)}. \quad (6.8)$$

Например, если интенсивность измеряемого звука $J=10^{-8}$ Вт/м², то уровень интенсивности этого звука по отношению к пороговому значению $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м² будет составлять:

$$L_i = 10 \lg \frac{J}{J_0} = 10 \lg \frac{10^{-8}}{10^{-12}} = 10 \lg 10^4 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ дБ}. \quad (6.9)$$

В силу того, что интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления (6.5), стало возможно записать при переходе на понятие уровень звукового давления:

$$L = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \text{ дБ}, \quad (6.10)$$

где p_0 – пороговое значение звукового давления ($2 \cdot 10^{-5}$ Н/м²).

Уровень звукового давления и уровень интенсивности звука изменяются по экспоненциальной зависимости, а человеческое ухо воспринимает их, как изменяющихся линейно.

Таблица 6.2

Сравнительная таблица характеристик звука от различных источников

Источник звука	Интенсивность звука, J , Вт/м ²	Звуковое давление p , Н/м ²	Уровень звукового давления L , дБ
Реактивный двигатель	100 – 10000	200 – 2000	140-160
Авиационный двигатель	1 – 100	20 – 200	120 – 140
Поезд, виброплощадка	1	20	до 120
Грузовик, компрессор	0,0001	0,2	80
Классная комната	0,000001	0,02	60

Этот факт наглядно иллюстрируется сравнительной таблицей различных источников звука (табл. 6.2).

Из таблицы можно видеть, что многостепенные изменения J и p в $Вт/м^2$ и $Н/м^2$ разных источников звука характеризуются простой линейной зависимостью уровней звукового давления L в дБ.

6.3. Источники шума и их шумовые характеристики

Шумы в зданиях, сооружениях и на городских территориях подразделяются на постоянные и непостоянные. **Постоянными** считаются шумы, уровни звукового давления которых изменяются во времени не более чем на 5 дБ. **Непостоянными** считаются шумы, уровни звукового давления которых изменяются во времени более чем на 5 дБ, рис. 6.2.

В соответствии с этим шумовые характеристики постоянного и непостоянного шума различаются.

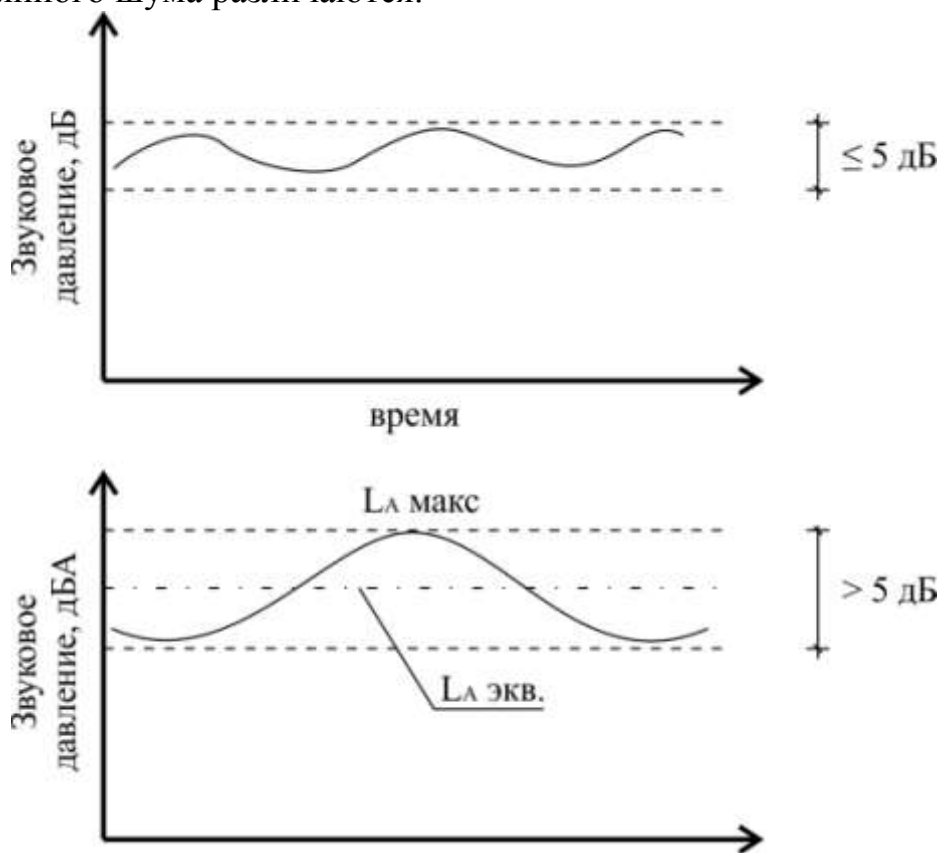


Рис. 6.2. Графическое представление о постоянном (а) и непостоянном (б) шуме

Шумовыми характеристиками постоянного шума являются уровни звукового давления L , дБ в восьми октавных полосах частот от 63 до 8000 Гц. Например, шум насосных станций, трансформаторных подстанций и т.п. оборудования, шум которых незначительно ($< 5 \text{ дБ}$) изменяется во времени. Шумовыми характеристиками непостоянного шума являются: эквивалентный уровень звука $L_{A \text{ экв}}$, дБА и максимальный уровень звука $L_{A \text{ макс}}$, дБА. Например, шум транспортного потока на автомагистралях, который минимален в ночное время и максимален в часы пик ($L_{A \text{ макс}}$, дБА).

Источники шума также подразделяются на внешние и внутренние по отношению к зданиям.

Основными источниками внешнего шума являются транспортные потоки на улицах и дорогах, железнодорожный, водный и воздушный транспорт, промышленные и энергетические предприятия и их отдельные установки, а также внутриквартальные источники шума (трансформаторные подстанции, центральные тепловые пункты, хозяйственные дворы магазинов, спортивные и игровые площадки, автомобильные стоянки, культурно-развлекательные объекты и др.).

Количественные характеристики источников внешнего шума приведены в таблицах 6.3–6.5.

Таблица 6.3

Уровни шума автомобильного транспорта

Класс шумности	Эквивалентный уровень звука, дБА (на расстоянии 7,5 м)	Скорость движения, км/ч	Категория автомобильных дорог и городских магистралей
I Малошумные	Свыше 55 до 60	До 40	Проезды, парковые дороги
II Повышенной шумности	Свыше 60 до 65	До 50	улицы и дороги местного значения, магистральные улицы районного значения
III Шумные	Свыше 65 до 70	До 60-70	Магистральные улицы транспортно-пешеходные
IV Очень шумные	Свыше 70 до 75	До 80-90	Магистральные улицы непрерывного и регулируемого движения
V Сверхшумные	Свыше 75 до 80	До 100-110	Магистральные дороги
VI Непереносимо шумные	Свыше 80	120	Скоростные дороги

Уровни шума авиационного транспорта современных реактивных и турбовинтовых самолетов достигают очень высоких значений: от 105 до 140 дБА. Однако поскольку авиатрассы пролегают на очень больших высотах, воздействию авиационного шума подвергаются только жители районов, непосредственно прилегающих к территории аэропортов.

Таблица 6.4

Уровни шума железнодорожного транспорта

Тип поезда	Скорость, км/ч	Уровень звука, дБА
Высокоскоростные («Сапсан», «Ласточка», «Стриж»)	100-220	68-86
Электропоезда	40-120	76-90
Пассажирские	40-130	78-88
Грузовые	30-90	78-88

Таблица 6.5

Уровни шума оборудования промышленных предприятий

Вид оборудования	Характеристика шума	Уровень шума, дБА
Станки металлорежущие	Механический, широкополосный, постоянный	75-98
Станки деревообрабатывающие	Механический, непостоянный, широкополосный и тональный	85-105
Машины кузнечно-прессовые		
Прессы механические	Механический, широкополосный	86-116
Прессы гидравлические	Механический и аэрогидродинамический	73-106
Молоты	Механический, широкополосный, импульсный	96-122
Машины компрессорные		
Компрессоры поршневые	Аэрогидродинамический, прерывистый	79-102
Турбовоздуходувки и газодувки	Аэрогидродинамический, постоянный	94-109
Технологическое оборудование промышленности стройматериалов		
Формовочные машины	Механический, непостоянный, широкополосный	104-121
Цементные мельницы	Механический, широкополосный	98-104
Насосы		
Центробежные	Механический, широкополосный	61-82
Поршневые	Аэрогидродинамический, непостоянный	78-93
Машины электрические		
Двигатели, генераторы, трансформаторы	Шум электромагнитного происхождения, постоянный, узкополосный	64-102
Оборудование подъемно-транспортное		
Мостовые краны	Механический, непостоянный	84-90
Конвейеры	Механический, постоянный или прерывистый	78-103

Основными источниками шума в зданиях являются внутренние – технологическое и инженерное оборудование, громкая музыка, танцы и т.п. и внешние – транспорт, шум промышленных предприятий и т.п.

В зданиях возможны три вида шумов:

- **воздушный шум**, когда звуковые колебания распространяются от источника шума по воздуху;
- **ударный шум**, когда звуковые колебания возникают при механическом воздействии на несущие конструкции (пол, перекрытие);
- **структурный шум**, когда звуковые колебания распространяются в материале конструкций.

Распространение в зданиях шумов того или иного вида имеет свои особенности. Общие представления о распространении шумов в зданиях приведены на рис. 6.3.

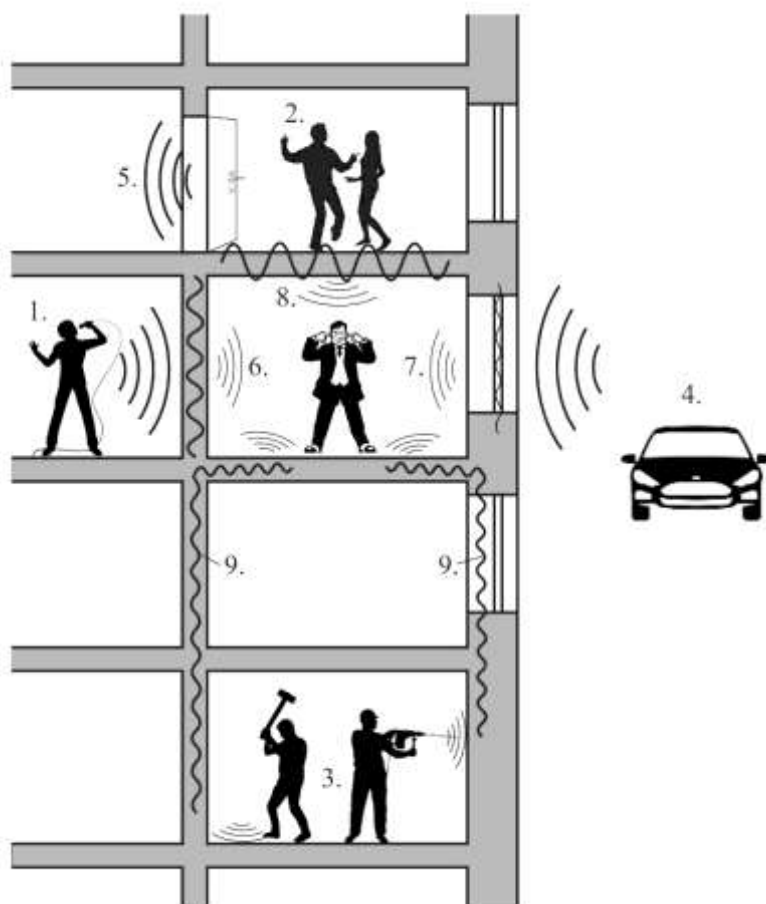


Рис. 6.3. Распространения шумов в зданиях

1 – внутренний источник воздушного шума, 2 – внутренний источник ударно-воздушного шума, 3 – внутренний источник структурного шума, 4 – внешний источник воздушного шума, 5 – прямой путь передачи воздушного шума через открытый проем, 6, 7 – прямой путь передачи воздушного шума через ограждение, 8 – прямой путь передачи ударного шума через ограждение, 9 – косвенный путь передачи структурного шума

Звуковая волна воздушного шума не только отражается или поглощается ограждением, она вызывает колебания ограждений, перегородок, стекол и т.п. и передает шум в соседние помещения.

Колебание ограждений сопровождается также косвенной передачей звука через материалы конструкций (рис. 6.3). И, наконец, воздушный шум может проникать через ограждение, непосредственно через поры и неплотности в узлах и стыках ограждающих конструкций.

Ударный и структурный шумы связаны с колебаниями ограждающих конструкций. В первом случае – при ударных, во втором – при вибрационных воздействиях на ограждение. Эти виды воздействий вызывают воздушные шумы в смежных помещениях и «обеспечивают» косвенные (обходные) пути передачи звука по материалам конструкций.

Количественные характеристики источников внутреннего шума в зданиях приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6

Уровни звукового давления воздушного и структурного шума в жилых помещениях

Источник шума	Уровень шума, дБА
Воздушный шум	
Телевизор	70
Музыкальный центр	85
Разговор (спокойный)	65
Детский плач	78
Игра на фортепиано	80
Работа пылесоса	75
- стиральной машины	68
- холодильника	42
- электробритвы	60
- вентилятора	42
- кондиционера	45
Приготовление пищи на плите	35-42
Наполнение ванны	36-58
Наполнение бачка в санузле	40-67
В	44-50
Структурный шум	
Перемещения лифта	34-42
Стук закрываемой двери лифта	44-52
Стук закрываемого мусоропровода	42-58
Стук по трубе центрального отопления	45-60
Вентиляторы	69-144
Кондиционеры	72-79

6.4. Воздействие шумов на человека

Воздействие шума на человека определяется его уровнем, частотой и продолжительностью воздействия.

С физиологической точки зрения понятие «звук» определяется как механическое волновое движение в слуховой области человеческого уха. Однако ухо обладает различной чувствительностью к звукам различной частоты и уровня. Субъективное качество слухового ощущения называется **громкостью**.

Громкость звука и ее связь с уровнем звукового давления определяется законом Вебера-Фехнера, согласно которому ухо человека оценивает не абсолютные, а относительные изменения внешнего раздражения.

Количественная оценка громкости проводится на основе сравнения измеряемого звука с эталонным (синусоидальный тон с частотой колебаний 1000 Гц). Измеряя уровень эталонного звука, добиваются того, что измеряемый звук и эталонный будут восприниматься ухом как равногромкие. Уровень громкости измеряется в фонах. Уровень громкости

в фонах численно равен уровню звукового давления в дБ при эталонной частоте 1000 Гц.

Ухо человека воспринимает не все колебания звуковых волн, а только определенные частоты от 20 Гц до 20 000 Гц. Звук с частотой менее 20 Гц называют **инфразвуком**, и в этой области частот звук воспринимается не как звук, а как сотрясения. Звук с частотой выше 20 000 Гц называют **ультразвуком**, и эти частоты не воспринимаются человеческим ухом. Указанные границы колеблются в зависимости от индивидуальных особенностей человека и возраста.

На рис. 6.4 представлены границы порога слышимости и порога болевого ощущения, а также области слышимости музыки и речи.

На рис. 6.5 в координатах «уровень звукового давления в дБ – частота звука в Гц» приведены кривые равной громкости (изофоны). Можно видеть, что чувствительность уха человека повышается с увеличением частоты колебаний. В области частот 500–2000 Гц уровень звукового давления (дБ) и уровень громкости (фоны) численно одинаковы. В области низких частот порог слышимости возрастает до 40–60 дБ, т.е. человек не слышит звуки при низких частотах даже при их уровне 40–60 дБ.

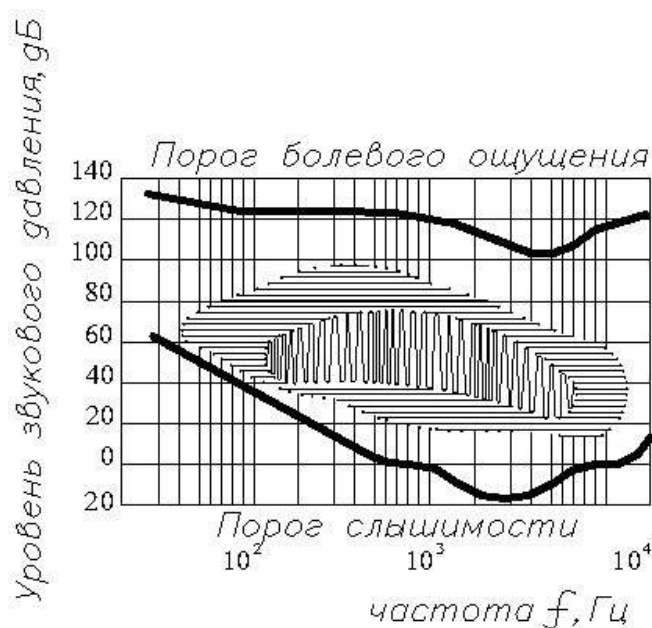


Рис. 6.4. Диаграмма, характеризующая восприятие звуков ухом человека:
горизонтальная штриховка – область слышимости музыки; вертикальная штриховка – область слышимости речи

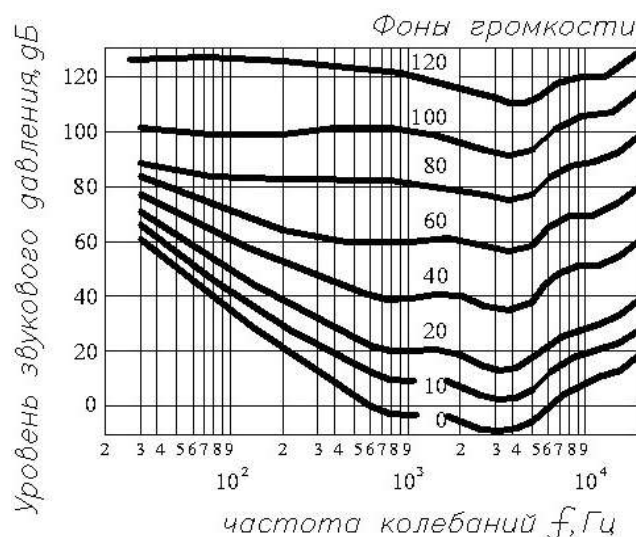


Рис. 6.5. Кривые равной громкости (по Д.Робинсону и Р. Дадсону)

Для приближения результатов объективных измерений уровней звука к субъективному восприятию уровня громкости вводится понятие скорректированного уровня шума. Коррекция заключается во введении поправок по каждому диапазону частот. Наиболее широко используется коррекция по шкале А, которая наиболее приближена к частотной характеристике чувствительности человеческого уха. При коррекции изменяется размерность уровня звукового давления добавлением индекса А – дБА. Скорректированный уровень шума (в дБА) определяется по формуле:

$$L_{Ai} = L_i - \Delta L_{Ai} , \quad (6.11)$$

где ΔL_{Ai} – поправка, зависящая от частот, табл. 6.7.

Таблица 6.7

**Стандартные значения поправок для частотной коррекции
по шкале А**

Частота, Гц	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Коррекция ΔL_A , дБА	80	42	26,3	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1,0	1,1

Различные источники шума генерируют различные уровни звукового давления (уровни шума), которые человек воспринимает по субъективной шкале от «тихо» до «невыносимо громко» в зависимости от мощности источника и расстояния до него, табл. 6.8. При небольшом уровне шума его воздействие на человека либо не проявляется совсем, либо проявляется незначительно, при увеличении уровня шума он начинает влиять на психоэмоциональное состояние человека, а при дальнейшем увеличении – и на физиологическое.

Уровень шума в 30–50 дБ человек ощущает как «очень тихо» или «тихо» (табл. 6.8), в связи с чем эта величина уровня шума положена в

основу нормирования шума в жилых и общественных зданиях (см. раздел «Нормирование шума»).

Таблица 6.8

Уровень шума и его восприятие

Уровень шума, дБ	Восприятие шума	Источник шума
130	Невыносимо	Винтовой самолет, 5 м
120	»	Пневматический молот, 1 м; реактивный самолет, 100 м
110	»	Пневматический молот, 3 м; ковка котла
100	Очень громко	Автомобильная сирена, 5 м; ткацкое производство
90	То же	Грузовой автомобиль, 5 м
80	»	Громкая радиомузыка
70	Громко	Разговор, 1 м
60	»	Разговор, 2 м; автомобиль 10 м.
50	Тихо	Разговор вполголоса, 2 м
40	»	Жилая квартира не на магистрали; холодильник.
30	Очень тихо	Тихий сад; тикание будильника, 5 м; тикание карманных часов
20	То же	Порог слышимости
10	Не слышно	
0	»	

При уровне шума 50–60 дБ наблюдается психологическая реакция на шум, а при уровне шума 70 дБ и выше проявляются физиологические реакции организма. Могут возникнуть нервные расстройства, нарушение сна, повреждение слуха, нарушение кровообращения, сердечной деятельности, мозгового кровообращения, желудочные расстройства, т.е. возникают последствия «шумового загрязнения среды».

Постоянное воздействие шума свыше 85 дБ приводит к потере слуха, возникает «тугоухость», что характерно для любителей шумных концертов, на которых мощность акустических систем может достигать 100 дБ и выше. Звуки и шумы болевого порога недопустимы во всех случаях.

Негативное воздействие шума на человека определяется не только его уровнем, но также продолжительностью воздействия. В таблице 6.9 приведена продолжительность безопасного воздействия шума того или иного уровня.

Из таблицы 6.9 видно, что шумы с уровнем свыше 100 дБ являются безопасными для человека при продолжительности воздействия менее 20 минут.

Таблица 6.9

Безопасная продолжительность воздействия шума от его уровня

Продолжительность воздействия	Предельно допустимые уровни, дБА
8 ч	90
4 ч	93
2 ч	96
1 ч	99
30 мин	102
15 мин	105
7 мин	108
4 мин	111
2 мин	114
1 мин	117
30 с	120

Снижение шумового воздействия среды снижает заболеваемость, повышает производительность труда, снижает число ошибок в письменных работах и математических расчетах.

6.5. Нормирование шума

Нормативы шума в помещениях жилых и общественных зданий устанавливаются такой величиной уровней звукового давления, при которых воздействие шума на человека не проявляется совсем или проявляется незначительно.

Нормирование шума зависит от вида шума (постоянный, непостоянный), назначения помещений (жилые комнаты, офисы, больничные палаты и т.п.) или виды трудовой деятельности (творческая деятельность, измерения и аналитическая работа в лабораториях и т.п. Для жилых зданий шум нормируется отдельно для дневного (с 7⁰⁰ до 23⁰⁰) и ночного (с 23⁰⁰ до 7⁰⁰) времени суток.

В качестве примера в таблице 6.10 приведены нормативы шума в помещениях жилых и общественных зданий, а в таблице 6.11 – в помещениях с различной трудовой деятельностью.

Нормативы шума должны быть обеспечены на городских территориях, непосредственно примыкающих к зданиям больниц, поликлиник, санаториев, жилых зданий, домов-интернатов, школ, детских дошкольных учреждений, площадок отдыха у жилых домов и т.п., табл. 6.12.

В таблицах 6.10–6.12 приведены нормы звукового давления для постоянного шума в октавных полосах частот от 31.5 до 8000 Гц L , дБ и для непостоянного шума: эквивалентного $L_{\text{АЭКВ}}$, дБА и максимального $L_{\text{Амакс}}$, дБА.

Таблица 6.10

**Допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные уровни звука
в помещениях жилых и общественных зданий (выборочно из табл. 1 СП 51.13330.2011)**

Наименование помещений	Время суток	Уровни звукового давления L, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц.									Уровни звука L _A и эквивалентные уровни звука L _{Aэкв} , дБА	Максимальные уровни звука L _{Aэкв макс} , дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Классные помещения, учебные кабинеты, аудитории учебных заведений	-	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
Гостиницы (пять и четыре звезды)	7.00- 23.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50
	23.00-7.00	69	51	39	31	24	20	17	14	13	25	40
Жилые комнаты квартир	7.00-23.00	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	55
	23.00-7.00	72	55	44	35	29	25	22	20	18	30	45
Жилые комнаты общежитий	7.00-23.00	83	67	57	49	44	40	37	35	33	45	60
	23.00-7.00	76	59	48	40	34	30	27	25	23	35	50

Таблица 6.11

**Допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука
для различных видов трудовой деятельности (выборочно из таблицы ГОСТ 12.1.003 – 83)**

Вид трудовой деятельности	Уровни звукового давления L, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука L _A и эквивалентные уровни звука L _{Aэкв} , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая деятельность, научная деятельность, конструирование и проектирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно – управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории	93	79	70	63	58	55	52	50	49	60
Выполнение работ на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Таблица 6.12

Нормативы шума на городских территориях

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Уровень звукового давления (эквивалентный уровень звукового давления) L, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука L _А (эквивалентный уровень звука L _{АЭКВ}), дБА	Максимальный уровень звука L _{Амакс} , дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1. Территории, непосредственно прилегающие к зданиям больниц и санаториев	7.00-23.00 23.00-7.00	86 79	71 63	61 52	54 45	49 39	45 35	42 32	40 30	38 28	50 40	65 55
2. Территории, непосредственно прилегающие к жилым зданиям, домам отдыха, домам-интернатам для престарелых и инвалидов	7.00-23.00 23.00-7.00	90 83	75 67	66 57	59 49	54 44	50 40	47 37	45 35	44 33	55 45	70 60
3. Территории, непосредственно прилегающие к зданиям поликлиник, школ и других учебных заведений, детских дошкольных учреждений, площадки отдыха микрорайонов и групп жилых домов		90	75	66	59	54	50	47	45	44	55	70

6.6. Расчет ожидаемых уровней шума в расчетных точках

Исходными данными для расчета ожидаемых уровней шума L в расчетных точках (РТ) помещений зданий являются объемно-планировочные и конструктивные решения зданий с расположением и мощностью источников шума (ИШ).

Рассчитанные уровни звукового давления в РТ L сравниваются с допустимыми уровнями шума $L_{\text{доп}}$, приведенными в нормативных документах. Если рассчитанные уровни шума будут меньше допустимых, то шумовой режим в помещении соответствует требованиям норм. Если $L > L_{\text{доп}}$, то требуется вносить коррективы в проектные решения с целью снижения уровня шума в помещении, а величина требуемого снижения уровня шума $L_{\text{тр}}$ определится по формуле:

$$\Delta L_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}}. \quad (6.12)$$

Расположение источников шума и расчетных точек может принимать самые различные сочетания в зависимости от генплана застройки, объемно-планировочных решений зданий, назначения помещений, технологических процессов, протекающих на территориях и в зданиях, расположения технологического и инженерного оборудования.

Все разнообразие сочетаний ИШ и РТ для территорий и помещений сводится к двум случаям:

1) ИШ и РТ находятся в одном помещении или на одном участке территории. В этом случае звуковая волна ИШ воздействует на РТ непосредственно (прямым и отраженным звуком) и требуется учет акустических свойств помещений или акустических характеристик территорий.

2) Звуковая энергия ИШ воздействует на РТ через ограждающую конструкцию из соседнего помещения или с территории. В этом случае к характеристикам определения уровней звукового давления в РТ, принятым для первого случая, добавляется изоляция воздушного шума ограждающими конструкциями.

На рис. 6.6 приведены расчетные схемы для определения уровней звукового давления в расчетных точках.

Расчет проводится в несколько этапов.

На первом этапе уточняется характеристика источников шума:

- октавные уровни звуковой мощности L_w , дБ;
- скорректированный уровень звуковой мощности L_{WA} , дБА;
- эквивалентный скорректированный уровень звуковой мощности $L_{WA_{\text{экв}}}$, дБА;
- максимальный скорректированный уровень звуковой мощности $L_{WA_{\text{макс}}}$, дБА;

- максимальный габарит источника шума – $\ell_{\text{макс.}}$

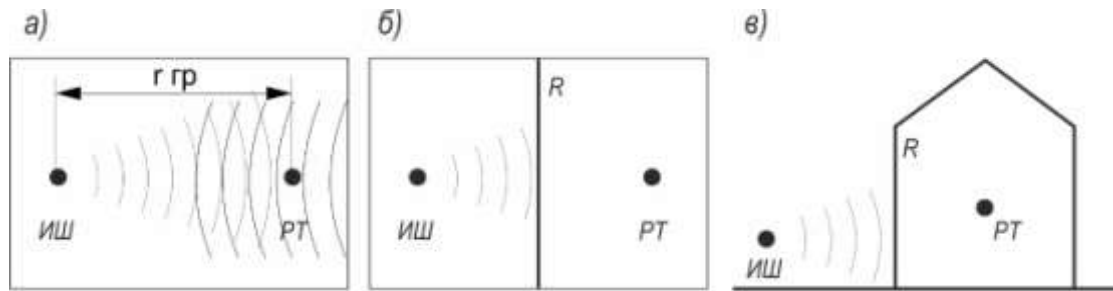


Рис. 6.6. Расчетные схемы для определения уровней звукового давления в расчетных точках. а) ИШ и РТ расположены в одном помещении; б) ИШ и РТ находятся в разных помещениях, разделенных ограждающей конструкцией; в) ИШ находится на территории, а РТ – в помещении

$L_{WA_{\text{экв}}}$ и $L_{WA_{\text{макс.}}}$ определяются для источников непостоянного шума. Обозначенные выше шумовые характеристики технологического и инженерного оборудования указываются заводом-изготовителем в технической документации или определяются экспериментально.

На втором этапе определяются акустические характеристики изолируемого помещения:

- суммарная площадь ограждающих поверхностей изолируемого помещения – $S_{\text{огр.}}$;
- эквивалентная площадь звукопоглощения изолируемого помещения – A , по формуле:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i, \quad (6.13)$$

где S_i – площадь поверхностей помещения с коэффициентом поглощения α_i .

(Если в изолируемом помещении использованы штучные звукопоглотители, то к найденной сумме $\alpha_i S_i$ добавляется сумма $A_i n_i$, где A_i – эквивалентная площадь звукопоглощения i -го штучного поглотителя, а n_i – количество штучных поглотителей);

- средний коэффициент звукопоглощения изолируемого помещения $\alpha_{\text{ср.}}$ по формуле:

$$\alpha_{\text{ср.}} = A / S_{\text{огр.}}, \quad (6.14)$$

- акустическая постоянная помещения B по формуле:

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{ср.}}}, \quad (6.15)$$

- устанавливается коэффициент k , учитывающий нарушение диффузности звукового поля в изолируемом помещении в зависимости от $\alpha_{\text{ср}}$;

- для помещения с одним источником шума определяется дополнительная акустическая характеристика изолируемого помещения – граничный радиус $r_{\text{гр}}$, м, то есть такое расстояние от акустического центра источника шума, на котором плотность энергии прямого звука равна плотности энергии отраженного звука по формуле:

$$r_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{B}{4\Omega}}, \quad (6.16)$$

где Ω – пространственный угол излучения источника, рад.

Если источник шума расположен на полу помещения, граничный радиус определяют по формуле:

$$r_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{B}{8\pi}} = \sqrt{\frac{B}{25,12}}. \quad (6.17)$$

На третьем этапе определяются уровни звукового давления в расчетных точках:

а) Расчетные точки и источник шума находятся в одном помещении.

В этом случае для соразмерных помещений (с отношением наибольшего размера помещения к наименьшему не более 5) октавные уровни звукового давления L , дБ в расчетных точках при работе **одного источника шума** в общем случае определяются по формуле:

$$L = L_w + 10 \lg \left(\frac{\chi \Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{kB} \right), \quad (6.18)$$

где L_w – октавный уровень звуковой мощности источника шума, дБ;
 r – расстояние, м, от акустического центра источника шума до расчетной точки;
 Φ – фактор направленности источника шума (для источников с равномерным излучением $\Phi=1$);
 χ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля в тех случаях, когда расстояние r меньше удвоенного максимального габарита источника шума ($r < 2\ell_{\text{max}}$);
 k – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении, в зависимости от среднего коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$;
 Ω и B – определены ранее.

Если расчетные точки находятся в зоне действия прямого звука (расстояние от ИШ до РТ менее 0,5 $r_{гр.}$), то октавные уровни звукового давления L , дБ следует определять по формуле:

$$L = L_w + 10\lg\Phi + 10\lg\chi - 20\lg r - 10\lg\Omega. \quad (6.19)$$

Если расчетные точки находятся в зоне действия отраженного звука (расстояние от ИШ до РТ более 2 $r_{гр.}$), то октавные уровни звукового давления L , дБ следует определять по формуле:

$$L = L_w - 10\lg B - 10\lg k + 6. \quad (6.20)$$

б) Расчетные точки находятся в одном помещении, а источник шума – в другом помещении или на территории.

В этом случае к акустическим характеристикам изолируемого помещения добавляется изоляция воздушного шума ограждающей конструкции, через которую проникает шум – R , дБ: в случае смежных помещений – это изоляция воздушного шума перегородки или изоляция воздушного шума наружного ограждения, если источник шума расположен на территории.

Если ограждающая конструкция состоит из участков с различной звукоизоляцией, например, имеет окна или двери, то изоляцию воздушного шума ограждающей конструкции в целом определяют по формуле:

$$R = 10\lg \frac{S}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{10^{0,1R_i}}}, \quad (6.21)$$

где S_i – площадь i -й части ограждения, m^2 ;

R_i – изоляция воздушного шума i -й частью ограждения, дБ;

S – площадь ограждающей конструкции, m^2 , $S = \sum_{i=1}^n S_i$.

После определения изоляции воздушного шума ограждающей конструкции, через которую проникает шум – R , дБ, октавные уровни звукового давления L , дБ, в расчетных точках изолируемого помещения следует определять по формуле:

$$L = L_w - R + 10\lg S - 10\lg B_{II} - 10\lg k, \quad (6.22)$$

где L_w – октавный уровень звукового давления в помещении с источником шума на расстоянии 2 м от разделяющего помещения ограждения, дБ; или октавный уровень звукового давления внешнего шума на расстоянии 2 м от фасада здания, дБ;

S – площадь ограждающей конструкции, m^2 ;

B_{II} – акустическая постоянная изолируемого помещения, m^2 ;

k – то же, что и в формуле (6.18).

Эквивалентный и максимальный уровни звука L_A , дБА, создаваемого внешним транспортом и проникающего в помещение через наружную стену с окном (окнами), следует определять по формуле:

$$L_A = L_{A2M} - R_{тран.0} + 10 \lg S_0 - 10 \lg B_H - 10 \lg k, \quad (6.23)$$

где L_{A2M} – эквивалентный (или максимальный) уровень звука снаружи на расстоянии 2 м от ограждения, дБА;

$R_{тран.0}$ – изоляция окном внешнего транспортного шума, дБА;

S_0 – площадь окна (окон), м²;

B_H – акустическая постоянная помещения, м² (в октавной полосе 500 Гц);

k – то же, что и в формуле (6.18).

Для отдельных помещений жилых и административных зданий, гостиниц, общежитий и др., площадь которых не превышает 25 м², эквивалентные и максимальные уровни звука L_A , дБА определяют по формуле:

$$L_A = L_{A2M} - R_{тран.0} - 5. \quad (6.24)$$

Как было показано в начале раздела, рассчитанное значение ожидаемого уровня шума L может оказаться больше допустимого для помещения данного назначения $L_{доп}$. В этом случае требуется вносить изменения в проектную документацию с целью снижения ожидаемого уровня шума.

Корректировка проектных решений должна быть направлена на:

- 1) снижение мощности источника шума.
- 2) увеличение звукопоглощения внутренней отделки помещений.
- 3) повышение звукоизоляции ограждающих конструкций, если источник шума находится в смежном помещении или на прилегающей территории.

6.7. Снижение шума в помещениях средствами звукопоглощения

В основе снижения шума в помещениях средствами звукопоглощения лежит снижение энергии отраженных звуковых волн за счет частичного поглощения этой энергии материалами ограждений. При поглощении звуковой волны материалами ограждений происходит процесс преобразования энергии звуковой волны в тепловую энергию.

Наиболее полно процесс превращения колебательной энергии звуковой волны в тепловую проявляется у материалов, имеющих высокую пористость (особенно у материалов, имеющих сквозную пористость), низкую плотность и максимально возможную удельную площадь поверхности пор. Подобные материалы и изделия на их основе получили название звукопоглощающих, а процесс – звукопоглощением.

Коэффициент звукопоглощения представляет собой отношение поглощенной энергии звуковой волны – $E_{\text{пог}}$ к падающей – $E_{\text{пад}}$:

$$\alpha = \frac{E_{\text{пог}}}{E_{\text{пад}}} = \frac{E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}. \quad (6.25)$$

В зависимости от структуры материалов их звукопоглощающие свойства различны для различных частот звуковой волны. Звукопоглощающие материалы подразделяются на следующие частотные диапазоны: **низкочастотные** (Н), максимальное звукопоглощение которых находится в октавных полосах частот 63, 125, 250 Гц; **среднечастотные** (С), максимальное звукопоглощение которых находится в октавных полосах частот 500, 1000 Гц, и **высокочастотные** (В) с максимальным звукопоглощением в октавных полосах частот 2000, 4000, 8000 Гц.

В каждом частотном диапазоне, в зависимости от величины среднеарифметического реверберационного коэффициента звукопоглощения α , звукопоглощающие материалы и изделия подразделяются на классы (табл. 6.13).

Следует обратить внимание на правильное прочтение данных таблицы. Если $\alpha = 0,8$, то этот звукопоглощающий материал относится ко второму классу, а если $\alpha = 0,4$ – к третьему классу.

Материалы, коэффициент звукопоглощения которых меньше 0,2, звукопоглощающими не являются.

Таблица 6.13

Классы звукопоглощающих материалов и изделий

Номер класса звукопоглощающих материалов	Среднеарифметический реверберационный коэффициент звукопоглощения α
Первый	свыше 0,8
Второй	от 0,8 до 0,4
Третий	от 0,4 до 0,2 включит.

В таблице 6.14 приведены коэффициенты звукопоглощения в октавных полосах частот некоторых облицовок. Из таблицы видно, что бетонные стены и стены из керамического кирпича, как неоштукатуренные, так и оштукатуренные, не являются звукопоглощающими ($\alpha < 0,2$).

Звукопоглощающие конструкции размещают, как правило, на потолке и в верхних частях стен. Целесообразно размещать звукопоглощающие конструкции отдельными участками или полосами. Площадь звукопоглощающих конструкций (или количество штучных звукопоглотителей) определяется расчетом по заданной величине требуемого снижения уровня шума $\Delta L_{\text{треб}}$.

Таблица 6.14

Коэффициент звукопоглощения различных отделок

№	Материал отделки	Коэффициент звукопоглощения при частотах в Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1.	Бетон неоштукатуренный	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
2.	Кладка из глиняного и силикатного кирпича, оштукатуренная	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
3.	Кладка из глиняного кирпича неоштукатуренная	0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,14
4.	Кладка из пензобетонных камней, неоштукатуренная	0,15	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60
5.	Дырчатые камни (HL _z , KSL). Дырки повернуты внутрь помещения, с 60-мм воздушной прослойкой перед несущей кладкой: прослойка пуста прослойка заполнена мин. ватой	–	0,06	0,12	0,20	0,13	0,10
		0,15	0,63	0,44	0,44	0,40	0,70
6.	Минераловатные плиты 50 мм, $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$	0,30	0,60	1,0	1,0	1,0	1,0
7.	Минераловатные плиты 16 мм, $\rho = 375 \text{ кг/м}^3$ 20 см расстояние до перекрытия	0,40	0,45	0,60	0,65	0,85	0,85
8.	Гипсокартонные плиты перфорированные 30 мм минераловолокнистое заполнение 20 см расстояние до перекрытия	0,40	0,95	0,90	0,70	0,70	0,60
9.	ДВП – легкие $d = 25 \text{ мм}$, жестко связанные со стеной	0,05	0,10	0,50	0,75	0,60	0,70
10.	Профильные доски шириной 100 мм с 10-мм открытыми швами. Пустота заполнена минераловатными плитами 20 мм толщиной: - при расстоянии до потолка 30 мм - при расстоянии до потолка 200 мм	0,10	0,25	0,80	0,70	0,30	0,40
		0,40	0,70	0,50	0,40	0,35	0,30
11.	Акустические плиты толщиной 2 см: наклеенные на стену на расстоянии 2 см (по обрешетке)	0,05	0,15	0,55	0,50	1,0	1,0
		0,10	0,20	0,85	1,0	1,0	1,0
12.	Ковролин 7 мм	0,05	0,05	0,15	0,30	0,50	0,60
13.	Настенные ковры на расстоянии от стены 50 мм	0,10	0,40	0,90	0,80	0,90	0,90
14.	Занавеси (среднее значение)	0,05	0,10	0,25	0,30	0,40	0,50

Величина снижения уровней звукового давления в расчетных точках ΔL , дБ после установки звукопоглощающей отделки определяется по формуле:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{k_1 \cdot B_1}{k \cdot B}, \quad (6.26)$$

где k и B – то же, что и в формуле (6.18);
 k_1 и B_1 – то же, но после установки звукопоглощающих конструкций

Расчету величины снижения уровня звукового давления в расчетных точках ΔL должен предшествовать анализ распределения уровней шума по спектру и выявления частот, в которых находится максимум уровня шума. Это позволит установить частотный диапазон звукопоглощающих материалов – Н, С или В с максимумом звукопоглощения в низких, средних или высоких частотах. Иными словами, максимальному уровню шума в каком-либо частотном диапазоне должно соответствовать максимальное звукопоглощение материала (или конструкции) в том же частотном диапазоне.

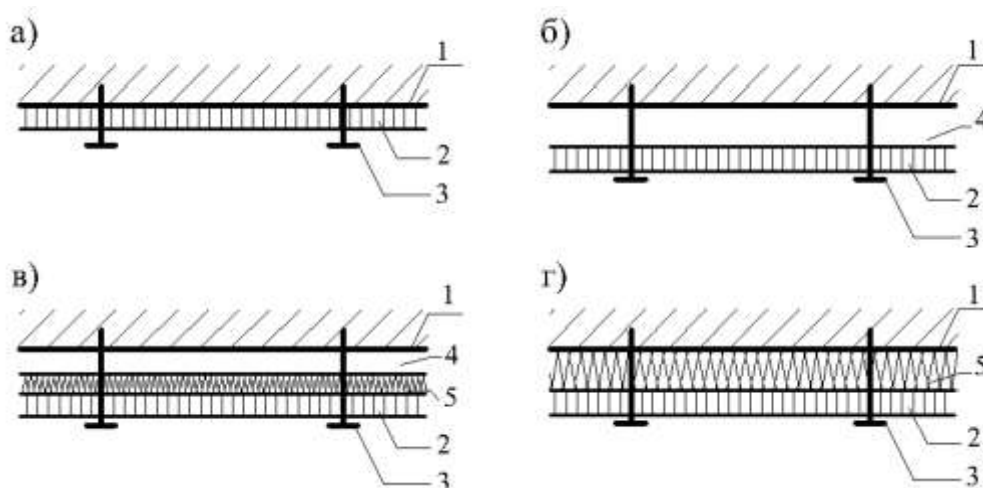


Рис. 6.7. Конструктивные схемы звукопоглощающих облицовок:

1 – ограждение; 2 – звукопоглощающий материал или изделие;

3 – элемент крепления; 4 – воздушная прослойка;

5 – второй звукопоглощающий материал или изделие

Акустическая отделка помещений звукопоглощающими материалами, изделиями и конструкциями не отличается большим конструктивным разнообразием. Звукопоглощающие панели могут крепиться непосредственно на ограждающие конструкции или на отnose от ограждения на некоторое расстояние (как правило, от 30 до 250 мм); зазор между ограждением и звукопоглощающей плитой может представлять собой воздушную прослойку или может быть заполнен другим звукопоглощающим материалом на всю толщину прослойки или на ее часть (рис. 6.7).

6.8. Звукоизоляция ограждающих конструкций

Под звукопоглощением понимается снижение энергии звуковой волны при ее переходе через ограждающие конструкции. В общем виде звукоизоляция ограждающих конструкций определяется формулой:

$$R = 10 \lg (E_{\text{пад}} / E_{\text{прош}}) \quad (6.27)$$

где $E_{\text{пад}}$ и $E_{\text{прош}}$, соответственно, падающая и прошедшая через ограждающие конструкции энергия звуковой волны.

Для внутренних ограждающих конструкций (стен и перегородок) звукоизоляция определяется индексом изоляции воздушного шума R_w , а для перекрытий – приведенным индексом изоляции ударного шума L_{pw} и индексом изоляции воздушного шума R_w . Нормативные требования к параметрам звукоизоляции воздушного (R_w) и ударного (L_{pw}) шума приведены в таблице 6.15.

Таблица 6.15

Требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума ограждающих конструкций и приведенные уровни ударного шума перекрытий при передаче звука сверху вниз

Наименование и расположение ограждающей конструкции	R_w , дБ	L_{pw} , дБ
Жилые здания		
1 Перекрытия между помещениями квартир и перекрытия, отделяющие помещения квартир от холлов, лестничных клеток и используемых чердачных помещений	52	60
2 Перекрытия между помещениями квартир и расположенными под ними магазинами	55	60
3 Перекрытия между комнатами в квартире в двух уровнях	45	63
4 Перекрытия между жилыми помещениями общежитий	50	60
5 Перекрытия между помещениями квартиры и расположенными под ними ресторанами, кафе, спортивными залами	57	63
6 Перекрытия между помещениями квартиры и расположенными под ними административными помещениями, офисами	52	63
7 Стены и перегородки между квартирами, между помещениями квартир и офисами; между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями	52	-
8 Стены между помещениями квартир и магазинами	55	
9 Стены и перегородки, отделяющие помещения квартир от ресторанов, кафе, спортивных залов	57	
10 Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире	43	
11 Перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры	47	
12 Стены и перегородки между комнатами общежитий	50	
13 Входные двери квартир, выходящие на лестничные клетки, в вестибюли и коридоры	32	-
Административные здания, офисы		
14 Перекрытия между рабочими комнатами, кабинетами, секретариатами и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования (вестибюли, холлы)	45	63
15 Стены и перегородки между кабинетами и отделяющие кабинеты от рабочих комнат	45	-
16 Стены и перегородки между офисами различных фирм, между кабинетами различных фирм	48	-

Наименование и расположение ограждающей конструкции	R_w , дБ	L_{nw} , дБ
Больницы и санатории		
17 Перекрытия между палатами, кабинетами врачей	48	60
18 Перекрытия между операционными и отделяющие операционные от палат и кабинетов	54	60
19 Перекрытия, отделяющие палаты, кабинеты врачей от помещений общего пользования (вестибюли, холлы)	50	63
20 Перекрытия, отделяющие палаты, кабинеты врачей от столовых, кухонь	54	63
21 Стены и перегородки между палатами, кабинетами врачей	48	-
22 Стены и перегородки между операционными и отделяющие операционные от других помещений	54	-
Учебные заведения		
23 Перекрытия между классами, кабинетами, аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования (коридоры, вестибюли, холлы)	47	63
24 Перекрытия между музыкальными классами средних учебных заведений	55	58
25 Перекрытия между музыкальными классами высших учебных заведений	57	55
26 Стены и перегородки между классами, кабинетами и аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	48	-
27 Стены и перегородки между музыкальными классами средних учебных заведений и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования	55	
28 Стены и перегородки между музыкальными классами высших учебных заведений	57	
Детские дошкольные учреждения		
29 Перекрытия между групповыми комнатами, спальнями	47	63
30 Перекрытия, отделяющие групповые комнаты, спальни от кухонь	51	63
31 Стены и перегородки между групповыми комнатами, спальнями и между другими детскими комнатами	47	-
32 Стены и перегородки, отделяющие групповые комнаты, спальни от кухонь	52	-

6.8.1. Основные параметры звукоизоляции ограждающих конструкций

При падении на ограждающие конструкции звуковая волна преобразуется в несколько составных частей, рис. 6.8. Из рисунка следует, что часть энергии отражается, часть энергии поглощается ограждением и переходит в тепловую, а часть распространяется в ограждении в виде структурного шума. Часть энергии проходит через неплотности ограждающих конструкций и поры в материале, а часть энергии передается через ограждение за счет его колебаний.

Перенос звуковой энергии через неплотности в ограждающих конструкциях и поры в материалах могут быть устранены проектными средствами за счет создания плотных слоев, например, штукатурки.

Передача звуковой энергии за счет колебания ограждающих конструкций зависит от конструкции ограждения, свойств материалов и частоты звуковых волн.

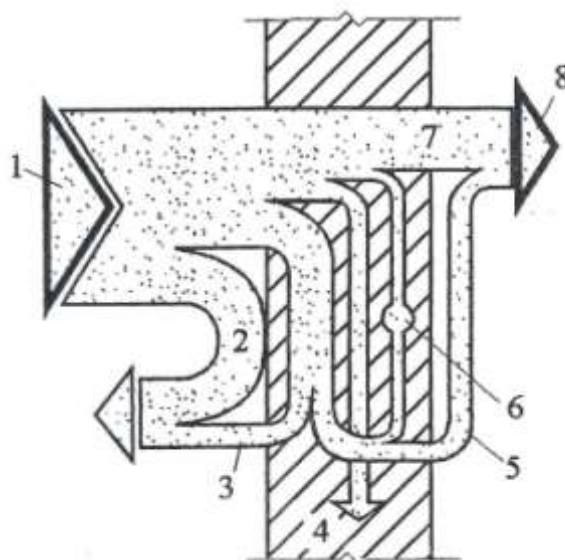


Рис. 6.8. Схема передачи звуковой энергии через ограждающую конструкцию:

1 – звуковая энергия, падающая на конструкцию; 2 – отраженная звуковая энергия; 3,5 – энергия, излучаемая колеблющейся конструкцией в смежные помещения; 4 – энергия структурного шума; 6 – энергия, трансформирующаяся в тепловую; 7 – звуковая энергия, прошедшая через поры и неплотности; 8 – суммарная звуковая энергия, прошедшая через конструкцию

С акустической точки зрения, ограждающие конструкции подразделяются на однослойные (однородные), которые колеблются как одно целое, и многослойные, у которых колебание слоев происходит с разной амплитудой. К акустически однородным конструкциям относятся однослойные конструкции (например, кирпичная кладка) или конструкции, состоящие из нескольких акустически аналогичных слоев, плотно связанных между собой (например, кирпичная кладка со штукатуркой).

Многослойные конструкции состоят из нескольких слоев, не имеющих жесткой связи между слоями (например, перегородка из гипсокартонных листов по каркасу). Между слоями может быть воздушная прослойка или легкие звукопоглощающие заполнители из пористых или волокнистых материалов.

Звукоизоляция однослойных ограждений от воздушного шума зависит как от массы ограждающих конструкций, так и от частоты звуковой волны, принципиальная схема такой зависимости приведена на рис. 6.9.

На рисунке 6.9 выделены три характерные области частот. Закономерности звукоизоляции в которых различаются.

Область 1 (низкие частоты) – область резонансов. Звукоизоляция в этом диапазоне часто определяется жесткостью конструкции и резонансными явлениями. Звукоизоляция в этой области частот практически не поддается расчету. Однако у большинства однородных ограждений частота собственных колебаний лежит ниже границы

нормируемого диапазона частот (ниже 100 Гц), поэтому звукоизоляция ограждений в этой области частот, как правило, не учитывается.

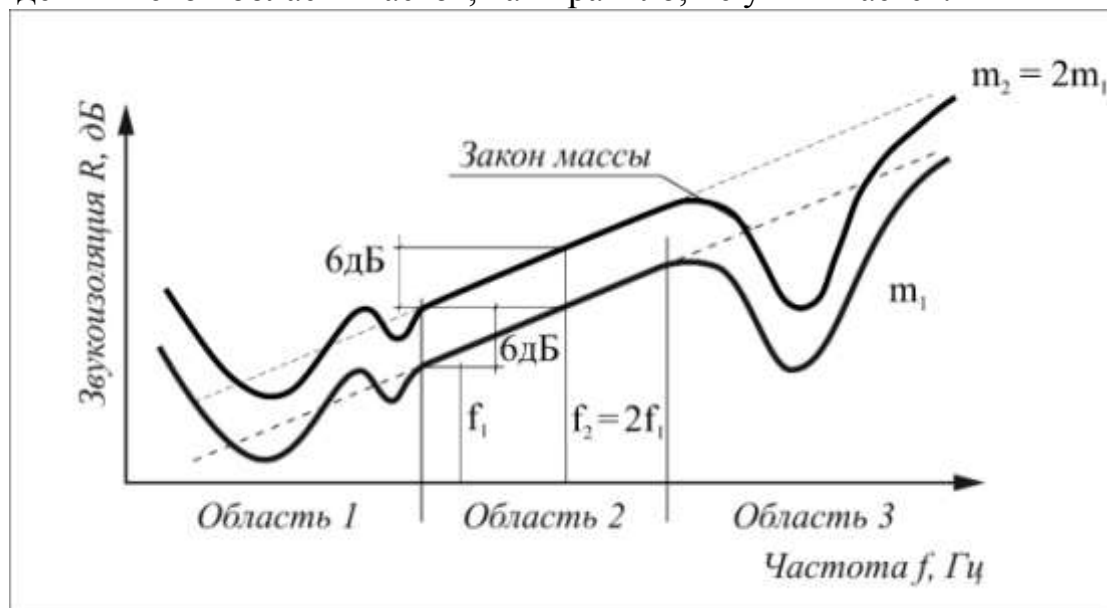


Рис. 6.9. Зависимость звукоизоляции воздушного шума однородного ограждения от массы (m) и частоты звуковой волны (f) (частотная характеристика звукоизоляции)

Область 2 (средние частоты) – область закона масс. В этой области частот звукоизоляция зависит от массы ограждений и частоты звуковой волны. Ограждение можно рассматривать как сумму большого количества отдельных масс, колеблющихся независимо одна от другой. а звукоизоляция определяется по так называемому закону масс:

$$R = 20 \cdot \lg(f \cdot m) - 47,5, \quad (6.28)$$

где m – поверхностная плотность ограждений, кг/м²;

f – частота звуковой волны, Гц.

На рисунке 6.9 приведены зависимости $R(f)$ для двух ограждений с разными массами, причем m_2 вдвое больше, чем m_1 , то есть $m_2 = 2m_1$, и можно видеть, что в этой области частот увеличение массы ограждения в два раза увеличивает звукоизоляцию на 6 дБ. На рисунке 6.9 видно также, что увеличение частоты звуковой волны в два раза увеличивает звукоизоляцию также на 6 дБ.

Область 3 (высокие частоты) – область волновых совпадений. Звуковая волна может падать на ограждение как по нормали к его поверхности, так и под некоторым углом. В этом случае в ограждении возникают не только поперечные волны изгиба ограждения, но и продольные волны изгиба (бегущая волна).

При наклонном падении звуковых волн изгибная волна в ограждении может оказаться равной проекции падающей волны.

$$\lambda_{\text{изг}} = \lambda_{\text{пад}} \cdot \sin \theta, \quad (6.29)$$

где θ – угол между направлением падающей волны и нормалью к плоскости ограждения.

В результате такого совпадения амплитуда изгиба ограждения резко возрастает и наступает максимальная передача звуковой энергии на противоположную сторону ограждения. В результате резко снижается звукоизоляция ограждения. Это явление получило название «геометрического резонанса» или «волнового совпадения», рис. 6.10.

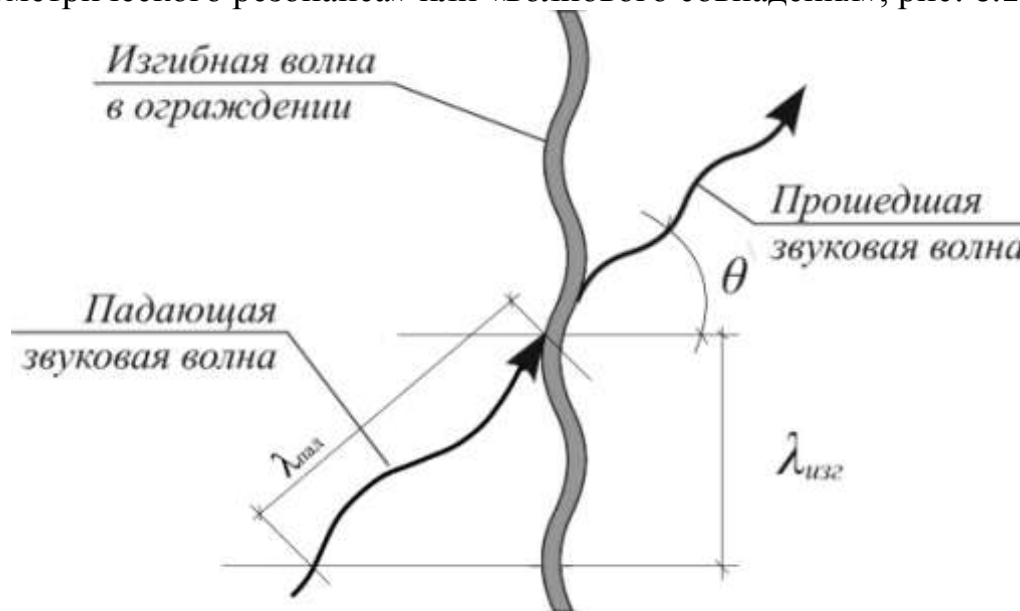


Рис. 6.10. Эффект волнового совпадения

Эффект волнового совпадения наиболее часто проявляется в тонколистовых ограждениях. Причем это явление зависит как угла падения звуковой волны (Q), так и от частоты звуковой волны (f).

Зависимость звукоизоляции ограждающих конструкций от частоты, приведенную на рис. 6.9, называют **частотной характеристикой звукоизоляции воздушного шума**. Эта характеристика дает наиболее полное представление о звукоизоляции на разных частотах (октавных или третьоктавных) в зависимости от частотных характеристик источников шума.

Сопоставление частотных характеристик с нормативными оценочными кривыми звукоизоляции воздушного или ударного шума позволяет наиболее объективно оценить основные параметры звукоизоляции ограждающих конструкций: индекс изоляции воздушного шума R_w и приведенный индекс изоляции ударного шума $L_{пw}$. Оценочные кривые воздушного и ударного шумов приведены в таблице 6.16.

Следует обратить внимание на более узкие диапазоны частот при построении частотных характеристик звукоизоляции ограждающих конструкций (третьоктавные полосы частот от 100 до 3150 Гц) по сравнению с нормируемым диапазоном частот допустимых уровней

звукового давления в помещениях зданий (октавные полосы частот от 63 до 8000 Гц).

Таблица 6.16

Значения оценочной кривой изоляции воздушного шума, ударного шума и эталонного спектра шума транспортного потока

Третьоктавные полосы частот Показатель Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Оценочная кривая изоляции воздушного шума, дБ	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
Оценочная кривая приведенного уровня ударного шума, дБ	62	62	62	62	62	62	61	60	59	58	57	54	51	48	54	52
Эталонный спектр шума транспортного потока L_T , дБ	55	55	56	59	60	61	62	63	64	66	67	66	65	64	62	60

В следующем разделе приведены методы построения частотных характеристик изоляции воздушного шума наиболее распространенных ограждающих конструкций: однородных массивных и тонколистовых.

6.8.2. Определение частотных характеристик изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями

Частотную характеристику ограждающих конструкций получают путем испытания ограждений в акустических камерах. Однако частотная характеристика, полученная в акустических камерах, оказывается заниженной, поскольку лабораторные испытания не учитывают структурного шума в реальных зданиях.

Экспериментальные исследования в акустических камерах, тем более в натуральных условиях зданий, весьма трудоемки и требуют много времени. В связи с этим нормативная литература предусматривает определение частотной характеристики ограждений расчетным путем с учетом конструкции ограждения и физико-технических свойств материалов.

Расчет параметров частотной характеристики является в известной мере эмпирическим, в нем используются геометрические параметры конструкций ограждения, свойства материалов ограждения и справочные таблицы, приведенные в нормативной литературе.

Построение частотной характеристики изоляции воздушного шума массивными ограждающими конструкциями

Под массивными ограждающими конструкциями понимают конструкции сплошного сечения с поверхностной плотностью от 100 до 800 кг/м² (из бетона, железобетона, кирпича, керамзитобетона и подобных материалов). Частотную характеристику изоляции воздушного шума массивными ограждающими конструкциями согласно СП 275.1325800.2016 «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции» следует определять, изображая ее в виде ломаной линии, аналогичной линии *ABCD* на рис. 6.11.

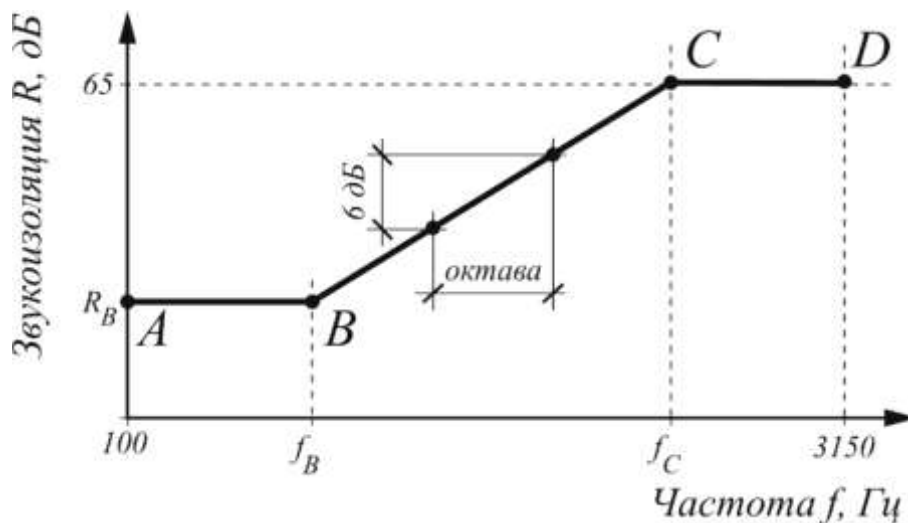


Рис. 6.11. Частотная характеристика изоляции воздушного шума массивным однослойным плоским ограждением

Построение выполняется в следующей последовательности:

а) По таблице 6.17 в зависимости от толщины и плотности материала конструкции определяется абсцисса точки *B* – f_B , Гц.

Значение f_B следует округлять до среднегеометрической частоты, в пределах которой находится f_B . Границы третьоктавных полос приведены в таблице 6.1.

б) Определяется эквивалентная поверхностная плотность ограждения m_3 по формуле:

$$m_3 = Km, \text{ кг/м}^2, \quad (6.30)$$

где m – поверхностная плотность, кг/м² (для ребристых конструкций принимается без учета ребер),

K – коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью. ($K = 1,1 \div 1,7$),

$$m = \gamma h, \text{ кг/м}^2, \quad (6.31)$$

где γ – объемная плотность материала ограждающей конструкции, кг/м^3 ,
 h – толщина ограждающей конструкции, м.

Для сплошных ограждающих конструкций плотностью $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$ и более $K = 1$.

Таблица 6.17

Определение абсциссы точки В

Плотность материала γ , кг/м^3	f_B , Гц
1800	$29000/h$
1600	$31000/h$
1400	$33000/h$
1200	$35000/h$
1000	$37000/h$
800	$39000/h$
600	$40000/h$
Примечания: 1. h - толщина ограждения, мм 2. Для промежуточных значений частота f_B определяется интерполяцией	

в) Определяется ордината точки В – $R_{BВ}$ зависимости от эквивалентной поверхностной плотности m_3 по формуле:

$$R_B = 20 \lg m_3 - 12, \text{ дБ.} \quad (6.32)$$

Значение R_B следует округлять до 0,5 дБ.

г) На график по рассчитанным абсциссе и ординате наносится точка В.

д) Для построения точки А из точки В влево проводится горизонтальный отрезок ВА до частоты 100 Гц. Если абсцисса точки В лежит ниже 100 Гц, отрезок ВА не строится.

е) Вправо от точки В проводится отрезок ВС с наклоном 6 дБ на октаву до точки С с ординатой $R_C = 65 \text{ дБ}$,

ж) Из точки С вправо проводится горизонтальный отрезок CD. Если точка С лежит за пределами нормируемого диапазона частот ($f_C > 3150 \text{ Гц}$), отрезок CD отсутствует.

Пример 6.1. Построить частотную характеристику изоляции воздушного шума стеной из керамического кирпича толщиной 250 мм и плотностью 1400 кг/м^3 .

а) Принимая по таблице 6.17 формулу для расчета, определяется абсцисса точки В:

$$f_B = \frac{33000}{h} = \frac{33000}{250} = 132 \text{ Гц.}$$

Полученное значение округляется по таблице 6.1 до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы:

$$f_B = 132 \text{ Гц} \approx 125 \text{ Гц.}$$

б) Определяется поверхностная плотность ограждающей конструкции:

$$m = \gamma h = 1400 \cdot 0,25 = 350 \text{ кг/м}^2.$$

Коэффициент K примем равным 1,2 (в силу того, что плотность ограждения $\gamma < 1800 \text{ кг/м}^3$).

в) Определяется эквивалентная поверхностная плотность конструкции:

$$m_{\Sigma} = Km = 1,2 \cdot 350 = 420 \text{ кг/м}^2.$$

г) Определяется ордината точки В:

$$R_B = 20 \cdot \lg m_{\Sigma} - 12 = 20 \cdot \lg 420 - 12 = 40 \text{ дБ}.$$

д) Строится частотная характеристика по методике, описанной выше.

е) Построенная частотная характеристика изоляции воздушного шума представляется в табличной форме в нормируемом диапазоне частот:



f, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R, дБ	40	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	65	65
	A	B												C		D

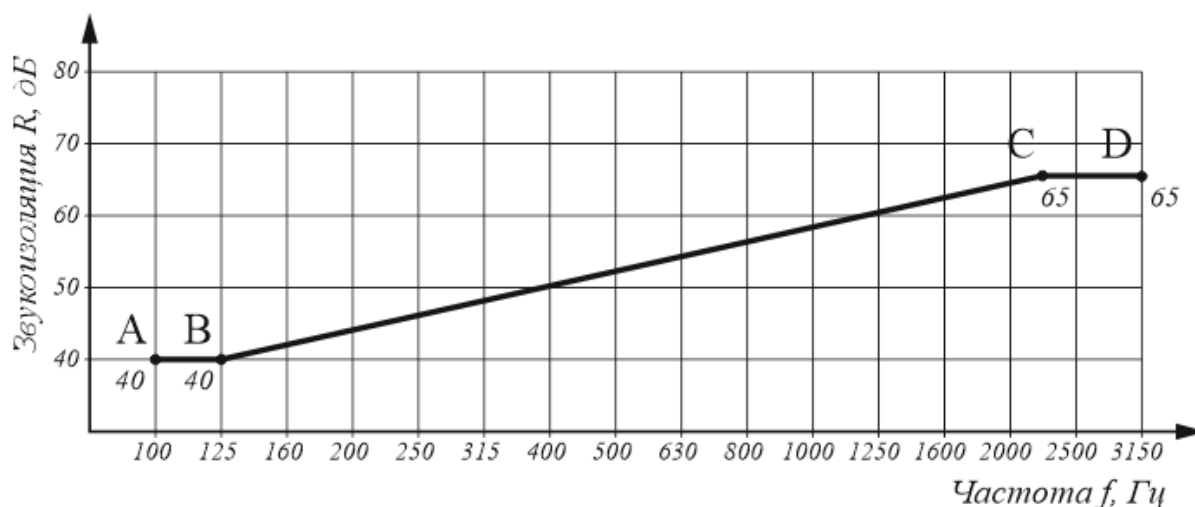


Рис. 6.12. Частотная характеристика кирпичной кладки (к примеру 6.1)

Построение частотных характеристик изоляции воздушного шума тонколистовыми ограждающими конструкциями

Частотную характеристику изоляции воздушного шума однослойной плоской тонкой ограждающей конструкцией из металла, стекла, асбоцементного листа, гипсокартонных листов и тому подобных материалов следует определять графическим способом, изображая ее в виде ломаной линии, аналогичной линии ABCD на рис. 6.13.

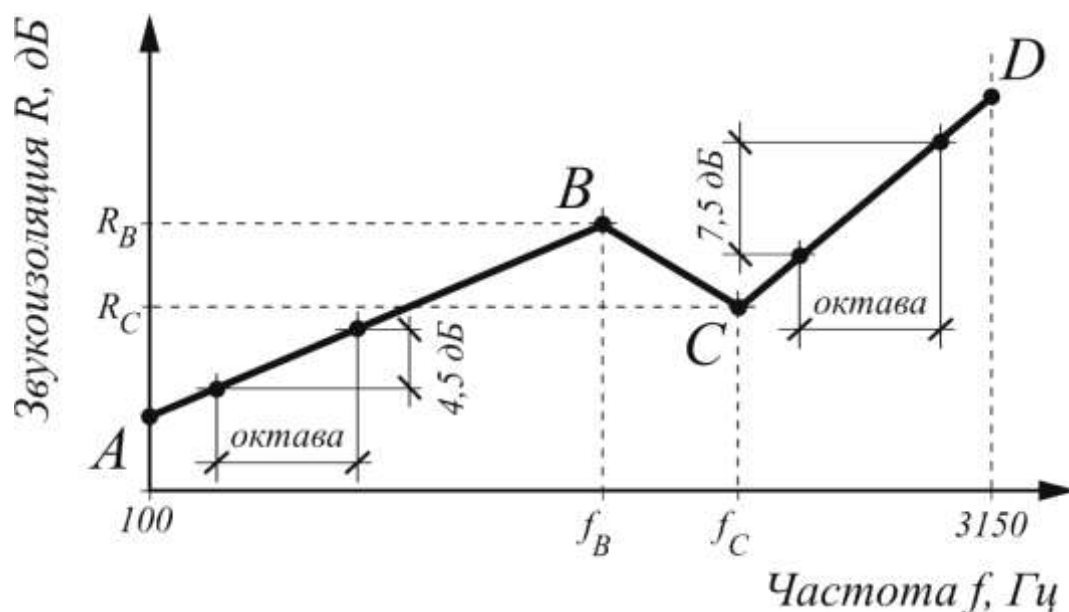


Рис. 6.13. Частотная характеристика изоляции воздушного шума однослойным плоским тонким ограждением

Построение выполняется в следующей последовательности:

а) По таблице 6.18 определяются координаты точек B и C , при этом значения f_B и f_C округляются до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы (табл. 6.1)

б) От точки B влево проводится отрезок AB с наклоном 4,5 дБ на октаву (рис. 6.13)

в) От точки C вправо проводится отрезок CD . Наклон участка CD следует принимать равным 7,5 дБ на октаву.

Таблица 6.18

Определение координат точек B и C

Материалы	Плотность γ , кг/м ³	f_B , Гц	f_C , Гц	R_B , дБ	R_C , дБ
1. Сталь	7800	6000/h	12000/h	40	32
2. Алюминиевые сплавы	2500 - 2700	6000/h	12000/h	32	22
3. Стекло силикатное	2500	6000/h	12000/h	35	29
4. Стекло органическое	1200	17000/h	34000/h	37	30
5. Асбоцементные листы	2100	9000/h	18000/h	35	29
	1800	9000/h	18000/h	34	28
	1600	10000/h	20000/h	34	28
6. Гипсокартонные листы (сухая гипсовая штукатурка)	1100	19000/h	38000/h	36	30
	850	19000/h	38000/h	34	28

7. Древесно-стружечная плита (ДСП)	850	13000/h	26000/h	32	27
	650	13500/h	27000/h	30,5	26
8. Твердая древесно-волокнистая плита (ДВП)	1100	19000/h	38000/h	35	29

Пример 6.2. Построить частотную характеристику изоляции воздушного шума перегородкой из гипсокартонного листа толщиной 25 мм и плотностью 1100 кг/м³.

а) По таблице 6.18 определяется абсцисса точки В; полученное значение округляется до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы по таблице 6.1:

$$f_B = \frac{19000}{h} = \frac{19000}{25} = 760 \text{ Гц} \approx 800 \text{ Гц}.$$

б) По таблице 6.18 определяется абсцисса точки С; полученное значение округляется до ближайшей среднегеометрической частоты третьоктавной полосы по таблице 6.19:

$$f_C = \frac{38000}{h} = \frac{38000}{25} = 1520 \text{ Гц} \approx 1600 \text{ Гц}.$$

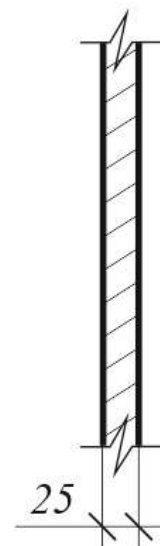
в) Значения ординат точек В и С определяются по таблице 6.18:

$$R_B = 36 \text{ дБ}, R_C = 30 \text{ дБ}.$$

г) В соответствии с методикой, описанной выше, строится частотная характеристика изоляции воздушного шума.

д) Представляем построенную частотную характеристику изоляции воздушного шума в табличной форме в нормируемом диапазоне частот:

f, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R, дБ	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36	34	32	30	32,5	35	37,5
	A									B			C			D



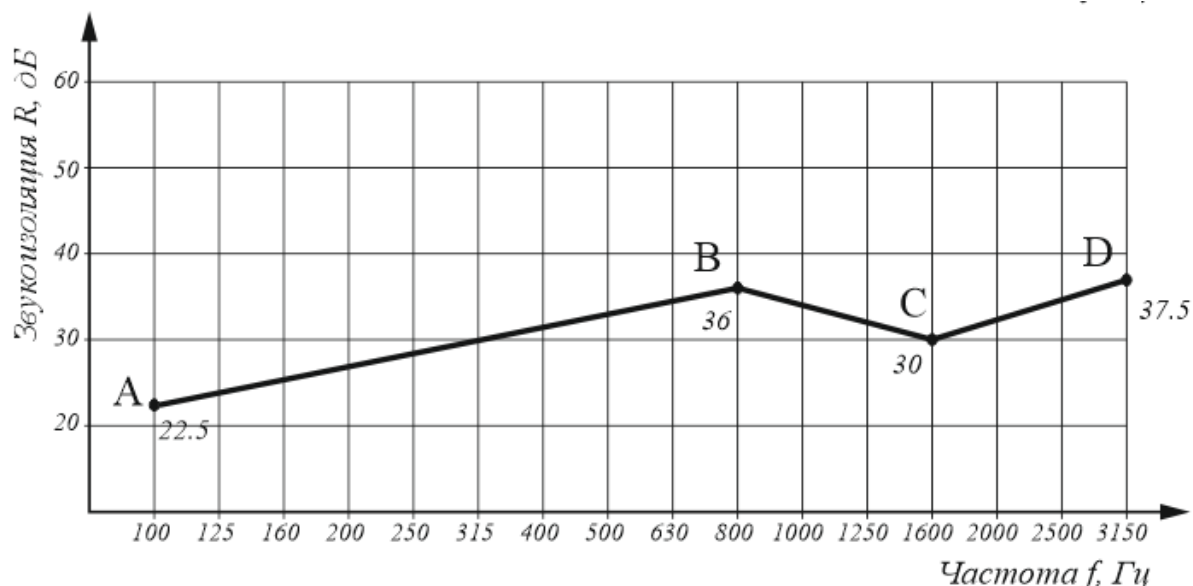


Рис. 6.14. Частотная характеристика гипсокартонного листа (к примеру 6.2)

6.8.3. Определение параметров звукоизоляции ограждающих конструкций

Звукоизоляция ограждающих конструкций зависит от их конструктивного решения, геометрических параметров, плотности материалов (объемной, кг/м^3 и поверхностной, кг/м^2), изгибной жесткости конструкции и ее резонансной частоты, динамического модуля упругости и других характеристик.

Звукоизоляция от воздушного шума определяется индексом изоляции воздушного шума R_w , дБ, а звукоизоляция от ударного шума – индексом приведенного уровня ударного шума $L_{пw}$, дБ.

Параметры звукоизоляции R_w и $L_{пw}$ определяются по методам, изложенным в СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» и СП 275.1325800.2016 «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции».

При ориентировочных расчетах параметры R_w и $L_{пw}$ могут быть определены по расчетным формулам в зависимости от параметров конструкции ограждения и свойств материалов.

Для более точного определения параметров R_w и $L_{пw}$ используют частотные характеристики ограждающих конструкций.

Определение индекса изоляции воздушного шума R_w с использованием частотной характеристики ограждения

Частотная характеристика изоляции воздушного шума ограждающей конструкции представляет собой зависимость величины изоляции воздушного шума R , дБ от частоты, Гц. При оценке звукоизоляции ограждающих конструкций используется не весь диапазон возможных

частот шума, а диапазон частот от 100 Гц до 3150 Гц, который разделен на 16 интервалов со среднегеометрическими частотами третьоктавных полос 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 Гц.

Индекс изоляции воздушного шума R_w ограждающей конструкции с известной частотной характеристикой определяют путем сопоставления частотной характеристики ограждения с оценочной кривой. Оценочная кривая изоляции воздушного шума приведена в таблице 6.19.

При сопоставлении частотной характеристики конкретного ограждения с оценочной кривой отмечают отклонения значений изоляции воздушного шума ограждения от оценочной кривой в каждой третьоктавной полосе частот. Отклонения считаются неблагоприятными, если значения изоляции воздушного шума ограждения меньше значений изоляции воздушного шума оценочной кривой. При графическом сопоставлении кривых – это отклонение вниз от оценочной кривой (рис. 6.15).

Для оценки величины индекса изоляции воздушного шума R_w определяются неблагоприятные отклонения $(R_i^{ou} - R_i^{orp})$ по каждой третьоктавной полосе и их сумма в интервале частот от f_1 до f_2 :

$$\sum (R_i^{ou} - R_i^{orp}) \quad (6.33)$$

Если найденная сумма неблагоприятных отклонений превышает 32 дБ, то оценочная кривая смещается вниз на целое число дБ так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала 32 дБ (кривая (3) на рис. 6.15).

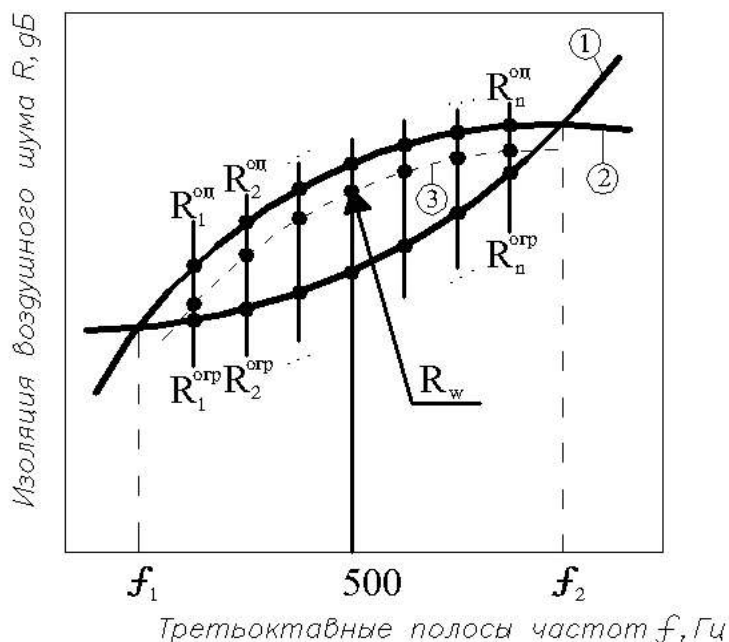


Рис. 6.15. Сопоставление частотной характеристики ограждения (1) с оценочной кривой воздушного шума (2): (3) – оценочная кривая после перемещения (в данном случае – вниз)

Если окажется, что сумма неблагоприятных отклонений отсутствует совсем или будет значительно меньше 32 дБ, то оценочная кривая смещается вверх на целое число дБ так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала 32 дБ.

После перемещения оценочной кривой вверх или вниз, при сохранении условия непревышения суммы неблагоприятных отклонений величины 32 дБ, за величину индекса изоляции воздушного шума R_w принимают величину изоляции в дБ на оценочной кривой, соответствующей частоте 500 Гц (рис. 6.15).

Определение индекса приведенного уровня ударного шума L_{nw} с использованием частотной характеристики перекрытия

По аналогии с определением индекса изоляции воздушного шума R_w (п.6.2.1), определение индекса приведенного уровня ударного шума L_{nw} проводят также путем сопоставления частотной характеристики перекрытия с оценочной кривой приведенного уровня ударного шума из табл. 2.6. Сопоставление кривых приведено на рис. 6.16.

Для вычисления индекса L_{nw} необходимо определить сумму неблагоприятных отклонений данной частотной характеристики от оценочной кривой по третьоктавным полосам частот. В отличие от определения индекса R_w , при определении индекса L_{nw} неблагоприятными считаются отклонения вверх от оценочной кривой.

Определяется величина неблагоприятного отклонения по каждой третьоктавной полосе $(L_i^{ozp} - L_i^{ou})$ и определяется сумма всех неблагоприятных отклонений:

$$\sum_{i=1}^n (L_i^{ozp} - L_i^{ou}) \quad (6.34)$$

Если сумма неблагоприятных отклонений превышает 32 дБ, оценочная кривая смещается вверх на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой не превышала 32 дБ.

Если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют совсем, оценочная кривая смещается вниз на целое число дБ так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой не превышала 32 дБ.

После перемещения оценочной кривой вверх или вниз при сохранении условия непревышения суммы неблагоприятных отклонений величины 32 дБ, за величину индекса приведенного уровня ударного шума L_{nw} принимают ординату перемещенной оценочной кривой, соответствующей частоте 500 Гц (рис. 6.16).

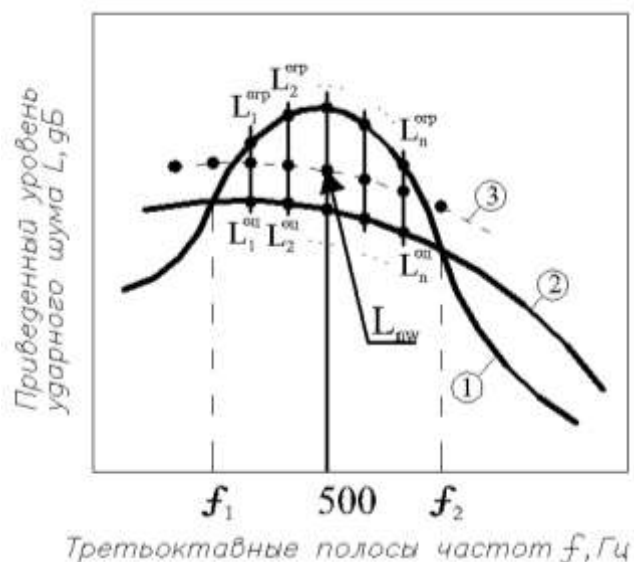


Рис. 6.16. Сопоставление частотной характеристики перекрытия (1) с оценочной кривой ударного шума (2): (3) – оценочная кривая после перемещения (в данном случае вверх)

6.9. Защита от шума на территориях городской застройки

Городские территории заполнены шумами различной природы. Это шумы от промышленных предприятий, отдельно стоящего оборудования, автомобильного, рельсового и железнодорожного транспорта, от внутриквартальной хозяйственной и развлекательной деятельности. Шумовой фон города возрастает на 0,5 дБ в год.

Уровень шума на контролируемых территориях определяется закономерностями распространения звуковых волн в открытом пространстве и в условиях застройки, при экранировании звуковых волн зданиями или экранами.

6.9.1. Распространение звуковых волн в открытом пространстве

В открытом пространстве распределение звуковых волн определяется типом источника шума и его мощностью. Точечный сферический источник шума, находящийся над поверхностью земли, распространяет звуковую волну равномерно во все стороны, возникает шаровая волна. При этом волновые фронты образуют расходящиеся шары (рис. 6.17 а). Если подобный источник шума находится на поверхности земли, то волновые фронты заполняют полусферу (рис. 6.17 б).

Точечный сферический источник шума встречается достаточно редко. В реальности источники шума излучают звуковые волны неравномерно по различным направлениям, что зависит от конструктивных решений технологического и инженерного оборудования. В этом случае следует учитывать фактор направленности звука.

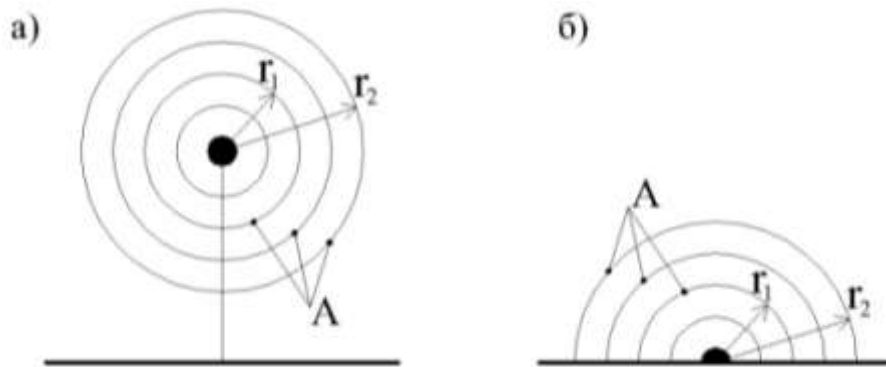


Рис. 6.17. Распространение звуковых волн от точечного сферического источника, установленного в открытом пространстве (а) и на поверхности земли (б): A – волновой фронт, r_1 и r_2 – радиусы волнового фронта

Движущийся состав поезда, автомагистраль представляют собой линейный источник шума, который характеризуется цилиндрической звуковой волной (рис. 6.18).

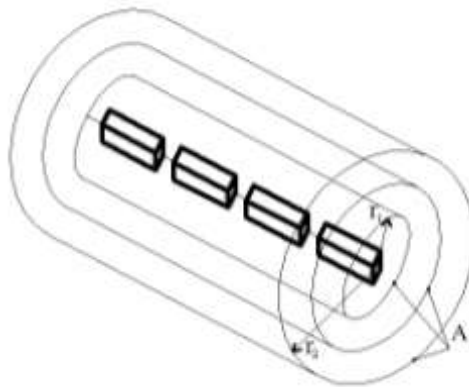


Рис. 6.18. Цилиндрическая звуковая волна от движущегося состава поезда: A – волновой фронт, r_1 и r_2 – радиусы цилиндрической звуковой волны

С увеличением расстояния от источника шума его интенсивность снижается, поскольку все время образуются новые шары (или цилиндры), а та же энергия распределяется по всё большей поверхности. Эта форма звукового воздействия называется геометрически расширяющимся затуханием. Уровень шума такой звуковой волны в свободном звуковом поле обратно пропорционален расстоянию (рис. 6.19).

Если известен уровень звука L_1 на расстоянии r_1 от источника шума, то уровень шума на расстоянии r_2 можно рассчитать по формуле:

$$L_2 = L_1 - 20 \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (6.35)$$

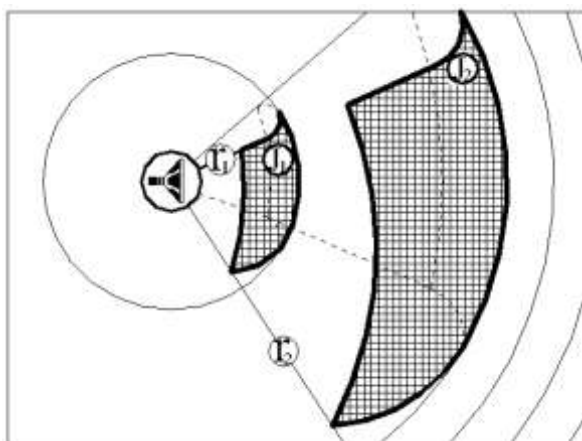


Рис. 6.19. Затухание звуковой волны в открытом пространстве:
 r_1 и r_2 – радиусы волнового фронта; J_1 и J_2 – интенсивность звука на расстоянии r_1 и r_2 от источника

Если расстояние r_2 будет вдвое больше r_1 , то $\lg(2r_1/r_1) = \lg 2 = 0,3$ и формула примет вид:

$$L_2 = L_1 - 20 \cdot 0,3 = L_1 - 6. \quad (6.36)$$

Из этого следует, что в открытом пространстве при увеличении расстояния в два раза уровень звука снижается на 6 дБ.

Для линейного источника звука (рис. 6.18) снижение уровня шума с расстоянием определится формулой:

$$L_2 = L_1 - 10 \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (6.37)$$

При условии удвоения расстояния, когда $r_2 = 2r_1$, снижение уровня звука составит 3 дБ.

Если звуковая волна в открытом пространстве встречает достаточно большое препятствие, то, по законам геометрической акустики, она отражается от препятствия (угол падения равен углу отражения), а по законам дифракции звуковая волна будет огибать препятствие, если длина волны больше или соизмерима с размером препятствия (рис. 6.20)

Из рис. 6.20 следует, что за препятствием вообще не существует зоны «звуковой тени». В действительности зона звуковой тени за препятствием определяется размером препятствия и длиной волны.

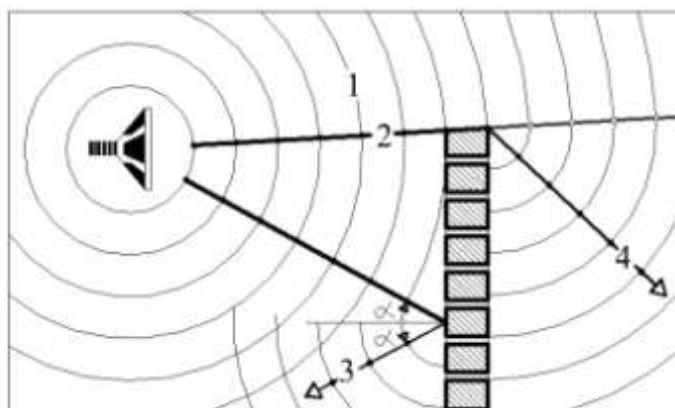


Рис. 6.20. Распространение звуковой волны в открытом пространстве при наличии препятствия:

1 – волновой фронт; 2 – волновой луч; 3 – волновой луч отраженной звуковой волны; 4 – волновой луч звуковой волны при огибании препятствия

Для высокочастотных звуков, когда длина волны измеряется сантиметрами и десятками сантиметров, зона звуковой тени будет большой. Для низкочастотных звуков, когда длина волны измеряется метрами и десятками метров, размер зоны звуковой тени за препятствием будет уменьшаться с увеличением длины звуковой волны.

На рис. 6.21 показана схема образования звуковой тени за препятствием при плоских звуковых волнах.

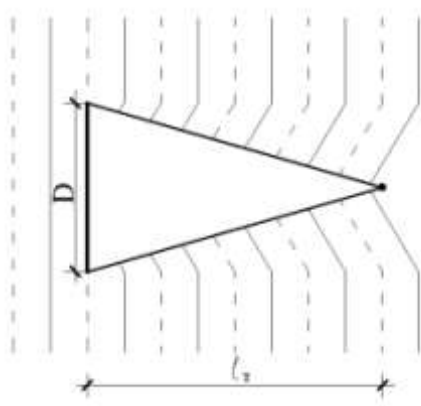


Рис. 6.21. Схема образования звуковой тени за препятствием при плоских звуковых волнах:

D – ширина препятствия; ℓ_t – длина зоны звуковой тени

Длина зоны звуковой тени ℓ_t за экраном шириной D может быть определена по формуле:

$$\ell_t = D^2 / 4\lambda, \quad (6.38)$$

где λ – длина волны в м.

Пример 6.3. Если $\lambda = 3,5$ м ($f = 100$ Гц) и $D = 10$ м, то $\ell_t = 10^2 / 4 \cdot 3,5 = 7,1$ м.

6.9.2. Источники городских шумов и их характеристики

Обобщенные характеристики источников городских шумов в размерности эквивалентных уровней звукового давления $L_{A_{экв}}$, дБА приведены в таблицах 6.19–6.22.

Таблица 6.19

Обобщенная шумовая характеристика потоков автомобильного транспорта

Характеристика улиц и дорог	Число полос движения в обе стороны	Эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$, дБА
Магистральные дороги скоростного движения	8	83
	6	82
	4	81
Магистральные улицы общегородского значения: - непрерывного движения - регулируемого движения	8	80
	6	79
	4	78
	8	78
	6	77
	4	76
Магистральные дороги регулируемого движения	6	76
	4	75
	2	73
Магистральные улицы районного значения	4	75
	2	73

Таблица 6.20

Шумовые характеристики источников шума внутри групп жилых домов

Источники шума	Эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$, дБА
Разгрузка товаров и погрузка тары	70
Работа мусороуборочной машины	71
Игры детей	74
Купание детей в плескательных бассейнах	76
Спортивные игры:	
настольный теннис	58
теннис	61
хоккей	65
баскетбол	66
городки	71
волейбол	74
футбол	75

Таблица 6.21

Шумовые характеристики потоков железнодорожного транспорта

Поезда	Эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$, дБА, при интенсивности движения, пар/ч											
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	25	30
Пассажирские	66	69	71	72	73	74	75	76	78	79	80	81
Электропоезда	72	75	77	78	79	80	81	82	84	84	86	87
Грузовые	76	79	81	82	83	84	85	86	88	88	90	91

Таблица 6.22

Шумовая характеристика потоков трамваев

Основание	Эквивалентный уровень звука, $L_{Aэкв}$ дБА, при интенсивности движения, пар/ч												Расчетный максимальный уровень звука, $L_{A макс}$ дБА
	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	
Шпально-песчаное	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	82
Шпально-щебеночное на монолитной бетонной плите	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	83
Шпально-щебеночное	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	86
Монолитно-бетонное	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	92

6.9.3. Выбор расчетных точек и определение в них уровня шума

В селитебных зонах города автомобильный транспорт является основным источником шума, поэтому в дальнейшем будем рассматривать этот вид шумового воздействия.

Источником шума автомобильного транспорта (ИШ) является не отдельное транспортное средство, а автомобильные потоки, в связи с чем источник шума является линейным и располагается вдоль автомагистрали. В соответствии с ГОСТ 20444-2014 «Транспортные потоки. Методы определения шумовых характеристик» источник шума автомагистрали располагается на расстоянии 7,5 метров от оси первой полосы движения, однако допускается и другое расположение ИШ, например, на бровке первой полосы движения.

Уровень шума транспортных потоков $L_{Aэкв}$ может быть определен по укрупненным таблицам (например, 6.25), стадия ТЭО. При определении на стадии $L_{Aэкв}$ ПДП требуется детальный учет транспортных потоков и характеристик дорог:

- интенсивность движения транспорта, ед/час;
- средняя скорость потока, км/час;
- доля грузового и общественного транспорта, %;
- тип покрытия проезжей части дороги;
- число полос движения;
- продольный уклон дороги.

При проектировании защиты от шума в городской застройке возникают, как правило, две задачи:

1. Обеспечение уровня шума на детских, спортивных, придомовых и других аналогичных площадках. В этом случае расчетная точка (РТ) располагается на границе площадки, ближайшей к ИШ, на высоте 1,5 м.

2. Определение уровня шума у фасадов зданий для обеспечения нормируемого шума в помещениях зданий путем подбора звукоизоляции окна. В этом случае РТ располагается на расстоянии 2 м от фасада здания.

К расчетной точке на территории застройки звук может приходить как с разных участков одной автомагистрали, так и с нескольких улиц или дорог. Расчетная точка может находиться в зоне прямой видимости источника шума и может быть экранирована зданиями или другими экранами. В реальной застройке к одной расчетной точке с различных участков автомагистралей может подходить как прямой звук, так и экранированный.

Для систематизации расчетов уровней звука в реальной застройке проводят разбивку территории так, чтобы выделить все возможные зоны поступления к расчетной точке как прямого, так и экранированного звука. Для этого из РТ проводят лучи, которые разбивают участок на зоны прямого и экранированного звука.

На рис. 6.22 в качестве примера приведена схема жилого микрорайона на пересечении магистральных улиц городского и районного значения.

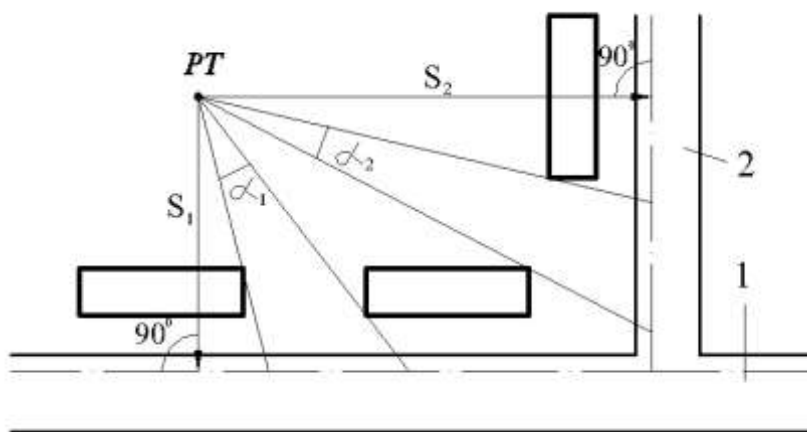


Рис. 6.22. Схема жилого микрорайона на пересечении магистральных улиц городского (1) и районного (2) значений:

α_1 и α_2 – сектора прямого звука; S_1 и S_2 – кратчайшие расстояния до магистралей для экранированного звука; РТ – расчетная точка

Проведено деление территории микрорайона на участки прямого звука, приходящего к расчетной точке (РТ) – секторы, ограниченные углами α_1 и α_2 , и выделены кратчайшие пути для экранированного звука – направления S_1 и S_2 .

Таким образом, для расчетной точки на территории будет получено несколько значений $L_{A \text{ экв}}$ или $L_{A \text{ макс}}$. Для случая, представленного на рис. 6.22, будет получено два значения уровней для прямого звука в секторах α_1 и α_2 и два значения уровней звука, экранированных зданиями по линиям S_1 и S_2 .

Для получения одного значения уровня звука в расчетной точке (из нескольких) используется таблица сложения уровней звука (табл. 6.23).

Таблица 6.23

Таблица для сложения уровней звука

Разность двух складываемых уровней, дБ или дБА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15	20
Добавка к большему уровню, дБ или дБА	3	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Последовательное сложение уровней звукового давления (уровней звука) начинается с максимального уровня. Определяют разность двух складываемых уровней, затем по таблице 6.23 находят добавку, которую прибавляют к большему из складываемых уровней. Далее находят разность между полученной суммой и третьим значением уровня звука. По значению этой разности по таблице 6.23 находят вторую добавку и прибавляют к полученной ранее сумме и т.д.

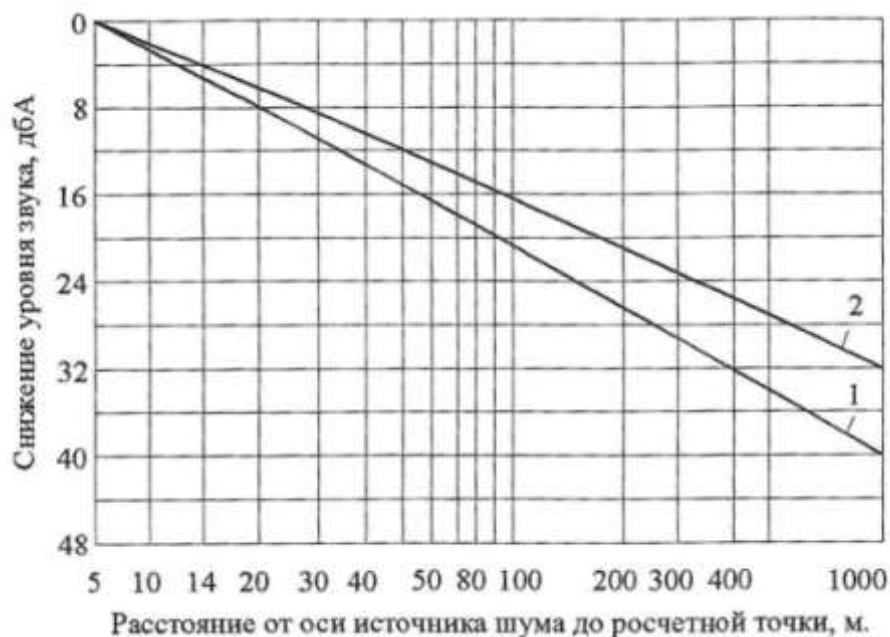


Рис. 6.23. График снижения уровня звука при удалении от источника шума:

- 1 – транспортные потоки с интенсивностью движения $n \leq 500$ ед/ч, внутриквартальные источники шума, трансформаторные подстанции;
2 – транспортные потоки с интенсивностью движения $n > 500$ ед/ч, железнодорожные поезда

Пример 6.4. Требуется сложить три уровня звука: $L_1 = 76$ дБА; $L_2 = 72$ дБА и $L_3 = 68,5$ дБА и найти суммарный уровень звука.

Находим разность $L_1 - L_2 = 76 - 72 = 4$ дБА. Из таблицы 7.23 находим величину добавки – 1,5 дБА и складываем с уровнем L_1 ; получим: $76 + 1,5 = 77,5$ дБА. Находим разность между этой суммой и L_3 .

77,5 – 68,5 = 9 дБА и по таблице 7.23 находим добавку – 0,5 дБА, складываем 77,5 + 0,5 = 78 дБА. Суммарный уровень звука из трех значений $L_1 = 76$ дБА, $L_2 = 72$ дБА и $L_3 = 68,5$ дБА составит 78 дБА.

Эквивалентный уровень прямого (неэкранированного) звука в расчетной точке $L_{Аэ\kappa\text{в.}}^{\text{п}}$, дБА, от автомагистралей определяется по формуле:

$$L_{Аэ\kappa\text{в.}}^{\text{п}} = L_{Аэ\kappa\text{в.}} - \Delta L_{А\text{рас}} \mp \Delta L_{А\text{пок}} - \Delta L_{А\text{зел}} - \Delta L_{А\alpha}, \quad (6.39)$$

где $L_{Аэ\kappa\text{в.}}$ – шумовая характеристика транспортного потока, дБА;
 $\Delta L_{А\text{рас}}$ – снижение уровня звука в зависимости от расстояния между ИШ и РТ, дБА, рис. 6.23;
 $\Delta L_{А\text{пок}}$ – снижение (увеличение) уровня звука в зависимости от вида покрытия территории, дБА, табл. 6.24;
 $\Delta L_{А\text{зел}}$ – снижение уровня звука полосами зеленых насаждений, дБА, табл. 6.26;
 $\Delta L_{А\alpha}$ – снижение уровня звука вследствие ограничения угла видимости улицы или дороги из расчетной точки, дБА, табл. 6.25.

Формула применима для определения уровня шума в РТ как на территории детских (и других) площадок, так и у фасадов зданий.

Таблица 6.24

Снижение уровня звука над акустически мягким покрытием

σ	1,1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	4,1	5,2	6,8	9,3	14,5
$\Delta L_{А\text{пок}}$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Примечание: $\sigma=0,07d_{\text{п}}/h_{\text{РТ}}$. Для определения $L_{Аэ\kappa\text{в}}$ на территории площадки отдыха $d_{\text{п}} = l_{\text{п}}$. Для определения уровня шума у фасадов зданий $L_{Аэ\kappa\text{в.тер}} d_{\text{п}} = r_{\text{п}}$. $h_{\text{РТ}}$ – высота РТ над поверхностью земли, м; $l_{\text{п}}$ – проекция $r_{\text{п}}$ на условную плоскость, м (см. рисунок 6.25).

Таблица 6.25

Зависимость снижения уровня звука $\Delta L_{А\alpha}$ от угла видимости

α , град	6	7	9	11	14	18	22	30	35	45	55	70	90	115	140
$\Delta L_{А\alpha}$, дБА	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Таблица 6.26

Ориентировочные величины снижения уровня звука полосами зеленых насаждений

Полосы зеленых насаждений	Ширина полос, м	Снижение уровня звука. $\Delta L_{Аэ\kappa\text{в}}$, дБА
Однорядная при шахматной посадке деревьев внутри полосы с двухъярусной живой изгородью на переднем плане	10-15	4-5
То же	15-20	5-8
Двухрядная при расстояниях между рядами 3-5 м; ряды аналогичны однорядной посадке	21-25	8-10
Двух- или трехрядная при расстояниях между рядами 3 м; ряды аналогичны однорядной посадке	26-30	10-12

Пример 6.5. Определить уровень шума на площадке отдыха у жилых домов на высоте $h_{pm}=1,5$ м от автомагистрали. допустимый уровень шума на площадке $L_A^{don} = 55$ дБА (табл. 6.12, строка 2).

Расчет выполнен по формуле 6.39.

$$L_{A_{экв}}^{\Pi} = L_{A_{экв}} - \Delta L_{A_{рас}} \mp \Delta L_{A_{пок}} - \Delta L_{A_{зел}} - \Delta L_{A_{\alpha}},$$

Расчетная схема приведена на рисунке 6.24.

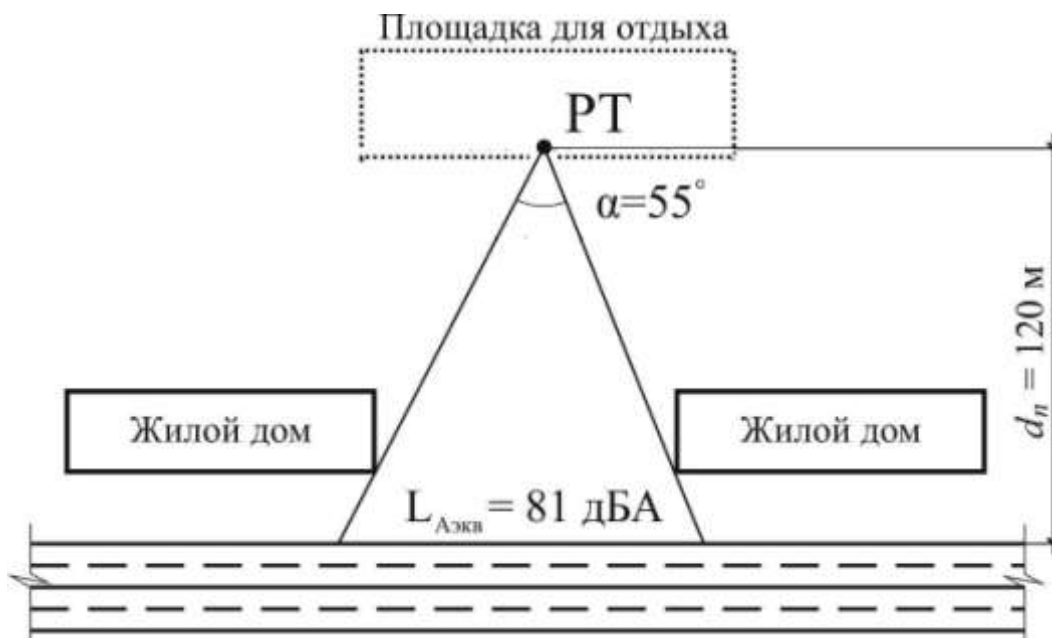


Рис. 6.24. Расчетная схема

Уровень шума четырехполосной автомагистрали равен: $L_{A_{экв}} = 81$ дБА (табл. 6.25), расстояние от магистрали до РТ $d_n = 120$ м (см. схему) и в соответствии с рисунком 6.22 $\Delta L_{A_{рас}} = 24$ дБА. Расстояние от магистрали до РТ имеет газонное покрытие

$$\sigma = 0,07d_n / h_{РТ} = 0,07 \cdot 120 \cdot 1,5 = 5,6.$$

При $\sigma = 5,6$ по таблице 6.24 определено: $\Delta L_{A_{пок}} = 8,5$ дБА.

Зеленые насаждения отсутствуют, следовательно, $\Delta L_{A_{зел}} = 0$.

Угол видимости магистрали со стороны РТ составляет 55° (см. схему) и $\Delta L_{A_{\alpha}} = 5$ дБА по таблице 6.25.

Расчет

$$L_{A_{экв}}^{\Pi} = L_{A_{экв}} - \Delta L_{A_{рас}} \mp \Delta L_{A_{пок}} - \Delta L_{A_{зел}} - \Delta L_{A_{\alpha}} = 81 - 24 - 8,5 - 0 - 5 = 43,5 \text{ дБА}.$$

Рассчитанный уровень шума $L_{A_{экв}}^{\Pi}$ не превышает допустимый уровень L_A^{don} .

$$L_A^{don} = 55 > L_{A_{экв}}^{\Pi} = 43,5 \text{ дБА},$$

следовательно, шумовой режим площадки отдыха соответствует требованиям норм.

При определении уровня звука у фасадов зданий первой линии застройки определяющим является прямой звук транспортного потока и отраженный звук от фасадов зданий, расположенных на противоположной стороне улицы:

$$L_{A_{экв.тер2}} = L_{A_{экв.}} - \Delta L_{A_{рас}} + \Delta L_{A_{отр}}, \quad (6.40)$$

где $\Delta L_{A_{отр}}$ – поправка, учитывающая влияние отраженного звука, дБА (табл. 6.27).

Таблица 6.27

К определению $\Delta L_{A_{отр}}$ у фасадов зданий, обращенных к источнику шума

Снижение уровня звука	Тип застройки							
	Односторонняя	Двусторонняя при отношении $h_{рт}/B$						
		0,05	0,25	0,4	0,55	0,8	0,9	1
$\Delta L_{A_{отр}}$, дБА	1,5	1,5	2,0	2,5	3	4	5	6

Примечание: $h_{рт}$ – высота РТ над поверхностью земли, В – ширина улицы между фасадами

Шумовая характеристика транспортного потока может выражаться через эквивалентный ($L_{A_{экв.}}$) или максимальный ($L_{A_{макс}}$) уровни звука. В этом случае уровень звука у фасада ($L_{A_{экв.тер2}}$) будет иметь эквивалентное или максимальное значение.

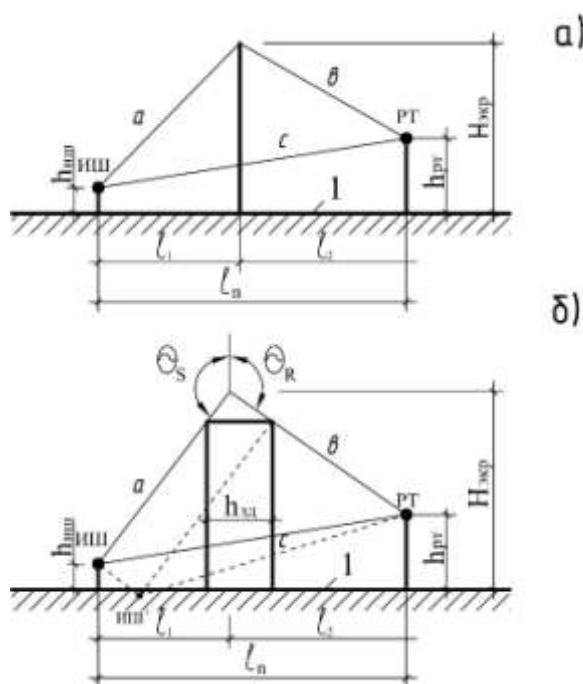


Рис. 6.25. Расчетные схемы для определения снижения уровня звука); экраном-стенкой (а) и экраном-зданием (б):

1 – отражающая или поглощающая плоскость; РТ – расчетная точка; ИШ – источник шума; ИШ¹ – мнимый источник шума

Если между ИШ и РТ расположено препятствие, то уровень звука в РТ сначала определяется без учета препятствия, как для прямого звука $L_{Аэ\kappa\upsilon}^{\Pi}$, затем эта величина снижается на величину потери уровня звука препятствием. В итоге уровень шума в РТ за препятствием определится по формуле:

$$L_{Аэ\kappa\upsilon} = L_{Аэ\kappa\upsilon}^{\Pi} - \Delta L_{Аэ\kappa\rho}. \quad (6.41)$$

Препятствиями могут быть экраны-стенки и экраны-здания. Расчетные схемы для снижения уровня шума экраном-стенкой $\Delta L_{Аэ\kappa\rho.ст}$ и экраном-зданием $\Delta L_{Аэ\kappa\rho.зд}$ приведены на рис. 6.25 а и б. Методы расчета снижения шума экранами приведены в специальной литературе.

6.9.4. Определение соответствия рассчитанных значений уровней шума в РТ нормативным

Последним этапом расчета шумового режима территорий и помещений является сопоставление рассчитанных значений уровня звука в РТ – $L_{Аэ\kappa\upsilon}^{расч}$ с нормативными $L_{Аэ\kappa\upsilon}^{доп}$, которые представлены в нормативных документах (например, в таблицах 6.10 и 6.11 для помещений зданий и в таблице 6.12 для территорий детских, спортивных и других аналогичных площадок).

Если расчетное значение будет больше нормативного $L_{Аэ\kappa\upsilon}^{доп}$, то их разность укажет на величину требуемого снижения уровня шума.

$$\Delta L_{Аэ\kappa\upsilon}^{тр} = L_{Аэ\kappa\upsilon}^{расч} - L_{Аэ\kappa\upsilon}^{доп} \quad (6.42)$$

В этом случае необходимо предусмотреть мероприятия по снижению уровня шума в РТ.

Для территории застройки – это изменение планировочных решений или введение дополнительных мероприятий по снижению шума (зеленые насаждения, экраны и т.п.).

Для помещений зданий – это увеличение звукоизоляции оконных конструкций или увеличение звукопоглощения внутренней отделки помещений.

6.9.5. Подбор звукоизоляции окон по характеристикам транспортного шума

Слабым местом в защите помещений зданий от транспортного шума являются окна. Шумозащита окон на порядок ниже шумозащиты наружных стен. Увеличение размеров окон в современных зданиях, вплоть до полностью остекленных фасадов, предъявляет повышенные требования к звукоизоляции оконных конструкций.

Исследование звукоизоляции оконных конструкций показывает, что величина звукоизоляции зависит от толщины стекол и их количества в стеклопакетах, толщины воздушных промежутков между стеклами, количества уплотняющих прокладок в открывающихся створках и степени герметичности заделки стеклопакетов в оконных коробках. Это подтверждается таблицами 6.28 и 6.29, в которых приведены характеристики оконных конструкций и их звукоизоляция.

Таблица 6.28

Звукоизоляция окон и глухих остекленных витражей наиболее массовых конструкций

№ п/п	Конструкция окна	Формула остекления (толщина стекол и воздушных промежутков в мм)	Количество уплотняющих прокладок в притворе	R _{Атрап} , дБА
Окна деревянные				
1	Одинарное со стеклопакетом ОСП (ГОСТ 24700-81)	3+12+3	1	25
2	То же	4+16+4	2	27
3	Спаренное ОС (ГОСТ 11214-86)	3+57+3	1	26
4	То же	4+56+4	2	28
5	Раздельное ОР (ГОСТ 11214-86)	3+92+3	1	28
6	То же	3+92+3	2	30
7	То же	4+91+4	2	31
8	То же	3+90+6	2	32
9	Раздельное со стеклопакетом и стеклом 03 РСР (ГОСТ 24699-81)	3+16+3+57+3	3	32
10	То же	4+14+4+57+4	3	33
11	Раздельно-спаренное 03 РС (ГОСТ 16289-80)	3+54+3+46+3	3	33
12	То же	4+54+4+46+4	3	35
13	Дерево-алюминиевый оконный блок спаренный	5+70+5	2	31
Металлические витражи с глухим остеклением				
14	Одинарный со стеклопакетом	4+16+4	-	28
15	То же	4+30+4	-	29
16	То же	8+25+8	-	33
17	Двойной	4+100+4	-	33
18	То же	4+200+4	-	35
19	То же	8+100+8	-	37
20	То же	8+200+8	-	39
21	То же	8+400+8	-	41
22	То же	8+650+8	-	43

Таблица 6.29

**Конструкция окон повышенной звукоизоляции
и шумозащитные вентиляционные окна**

№ п/п	Конструкция окна	Формула остекления (толщина стекол и воздушных промежутков в мм)	Количество уплотняющих прокладок в притворе	R _{Атран} , дБА
Окна повышенной звукоизоляции				
1	Окно раздельное 2 РШ (МНИИТЭП)	5+129+5	2	36
2	Окно раздельное со стеклопакетом и стеклом (МНИИТЭП)	6+8+4+117+6	2	41
3	Окно алюми-ниевое со стеклопакетом и стеклом	4+20+4+150+4	2	39
Шумозащитные вентиляционные окна				
4	Раздельное окно с клапаном-глушителем (КГ) 300 мм (МНИИТЭП)	4+90+4	2	31/22
5	ОШВ, окно с тройным остеклением (КТБ МОСМ, НИИСФ)	3+22+3+92+3	2	33/23
6	Окно спаренное с вертикальным каналом (НИИСФ)	3+57+3	1	26/24
7	Окно раздельное ОШВМ (КТБ МОСМ, НИИСФ)	3+117+3	2	31/24
8	Окно раздельное с КГ 600 мм (МНИИТЭП)	4+90+4	2	31/26
9	Окно раздельное с вертикальным каналом (НИИСФ)	4+90+4	2	31/28
Примечание: для шумозащитных вентиляционных окон величины звукоизоляции R _{Атран} , даны в закрытом положении (числитель) и в режиме вентиляции (знаменатель).				

Из таблицы 6.29 видно, что в режиме вентиляции звукоизоляция окна снижается на 2–10 дБА в зависимости от конструкции окна и количества уплотняющих прокладок.

Обеспечение требуемой звукоизоляции окон вступает в противоречие с обеспечением естественного воздухообмена в помещениях, для которых приток свежего воздуха через оконную конструкцию является основным. С увеличением притока воздуха в помещение через неплотности или специальные отверстия в оконных конструкциях неизбежно увеличивает уровень шума, поступающего в помещение через эти неплотности или отверстия.

Для решения этой проблемы в приточных отверстиях оконных конструкциях устанавливают глушители шума. Внутренние поверхности глушителя шума склеены звукопоглощающими материалами, за счет чего и происходит снижение шума. Пример окна с глушителями шума

конструкции МНИИТЭП с резонаторами 300 мм и 600 мм приведены на рис. 6.26. Эти окна установлены в здании по Б. Тульской улице в Москве.

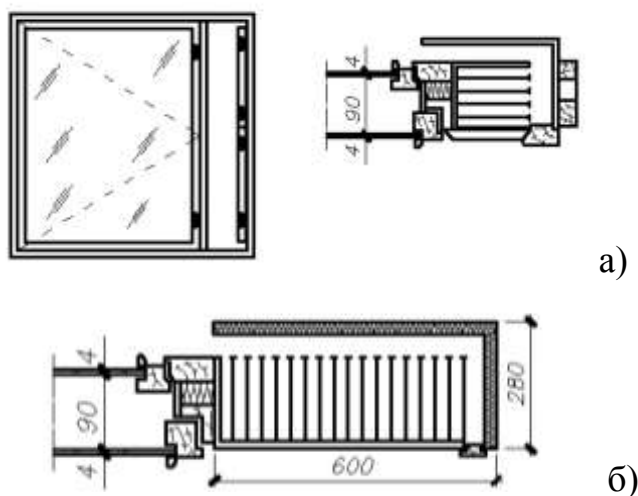


Рис. 6.26. Схемы воздухопроницаемых клапанов-глушителей в окнах конструкции МНИИТЭП: а – резонатор 300 мм, б – резонатор 600 мм

Требуемая звукоизоляция оконной конструкции $R_{Атрans}^{тр}$ определяется разностью уровней звукового давления ($L_{Аэкв.тер2}$) и нормируемым уровнем звука в помещении ($L_A^{доп}$):

$$R_{Атрans}^{тр} = L_{Аэкв.тер2} - L_A^{доп}. \quad (6.43)$$

Расчет выполняется по методу раздела 6.9.3 для помещений зданий, расположенных на первом, среднем и верхнем этажах. Расчетная схема приведена на рис. 6.27

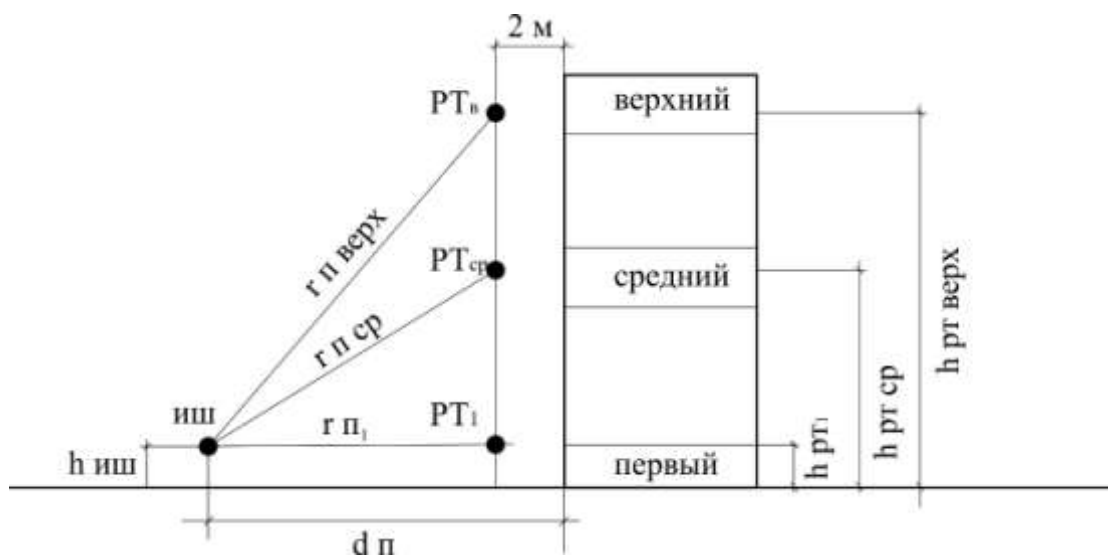


Рис. 6.27. Расчетная схема для определения уровня звука у фасадов зданий

Для помещений площадью 25 м^2 и менее требуемая звукоизоляция окна определяется по упрощенному методу в зависимости от уровня звука и назначения помещения. Для помещений площадью более 25 м^2 значимое влияние на уровне шума в помещении оказывает звукопоглощение материалов внутренней отделки, которое снижает величину требуемой звукоизоляции окна.

Для помещений площадью менее 25 м^2 требуемая звукоизоляция окна $R_{\text{Атран}}^{\text{тр}}$ определяется в зависимости от эквивалентного уровня транспортного шума у фасада здания (на расстоянии 2 м от фасада) в часы пик и назначения помещений в соответствии с таблицей 6.30.

Таблица 6.30

**Нормативные требования к звукоизоляции окон
для помещений площадью менее 25 м^2**

Назначение помещений	Требуемое значение $R_{\text{Атран}}$, дБА, при эквивалентных уровнях звука у фасадов зданий от транспортного шума в часы «пик», дБА				
	60	65	70	75	80
Палаты больниц, санаториев, кабинеты медицинских учреждений	15	20	25	30	35
Жилые комнаты квартир в домах:					
Категории А	15	20	25	30	35
Категории Б и В	-	15	20	25	30
Жилые комнаты общежитий	-	-	15	20	25
Номера гостиниц:					
Категории А	15	20	25	30	35
Категории Б	-	15	20	25	30
Категории В	-	-	15	20	25
Жилые помещения домов отдыха, домов-интернатов для инвалидов	15	20	25	30	35
Рабочие комнаты, кабинеты в административных зданиях и офисах:					
Категории А	-	-	15	20	25
Категории Б и В	-	-	-	15	20

Пример 6.6. Определить требуемую звукоизоляцию окна для жилой комнаты площадью 20 м^2 , расположенной в жилом доме категории Б при эквивалентном уровне звука у фасада здания $L_{\text{Аэкв.тер}2} = 70 \text{ дБА}$ и подобрать оконную конструкцию соответствующей звукоизоляции.

По таблице 6.30 находим, что при $L_{\text{Аэкв.тер}2} = 70 \text{ дБА}$, для жилого дома категории Б $R_{\text{Атран}} = 20 \text{ дБА}$.

Для этой комнаты применимо окно со звукопоглощением 25 дБА (строчка 1 в табл. 6.28).

Для помещений площадью более 25 м² требуемая звукоизоляция окна $R_{\text{Атран}}^{\text{тр}}$ зависит не только от величины транспортного шума, на также от акустических характеристик помещения (размера окна, объема помещения и звукопоглощения отделочных материалов). Для таких помещений расчет требуемой звукоизоляции окна выполняется по формуле:

$$R_{\text{Атран}}^{\text{тр}} = L_{\text{Аэквтер}2} - L_{\text{А}}^{\text{доп}} - 10\lg B + 10\lg S_0 - 10\lg k, \text{ дБ}, \quad (6.44)$$

где $L_{\text{Аэквтер}2}$ – эквивалентный уровень шума на расстоянии 2 м от фасада здания, дБА;

$L_{\text{доп А}}$ – допустимый уровень шума в помещении, дБА;

S_0 – площадь окна, м²;

B – акустическая постоянная изолируемого помещения, м²;

k – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении, принимается в зависимости от среднего коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$ в изолируемом помещении, табл. 6.31.

Таблица 6.31

$\alpha_{\text{ср}}$	k	$10\lg k, \text{ дБ}$
0,2	1,25	1,0
0,4	1,6	2,0
0,5	2,0	3,0
0,6	2,5	4,0

Пример 6.7. Определить требуемую звукоизоляцию окон двух типов помещений в жилом доме и подобрать оконные конструкции соответствующей звукоизоляции.

Исследуемые окна для помещений площадью меньше и больше 25 м² расположены на пятом этаже девятиэтажного жилого дома, который находится на первой линии вдоль магистральной дороги скоростного движения.

Расчетная схема приведена на рис. 6.28.

Исходные данные

Уровень шума магистральной дороги скоростного движения равен $L_{\text{Аэкв}} = 81$ дБА (таблица 6.25). Интенсивность движения транспорта менее 500 ед. в час. Территория застройки от магистрали до жилого дома имеет газонное покрытие, остальные параметры расчета приведены на рис. 6.28.

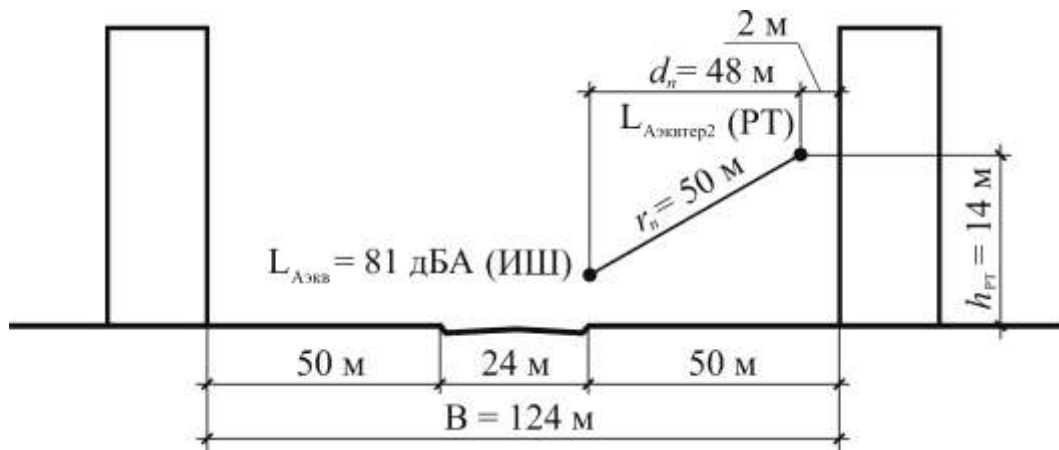


Рис. 6.28. Расчетная схема к определению уровня шума в расчетной точке (РТ)

Допустимый уровень шума в жилых помещениях в дневное время $L_{\text{доп}} = 40$ дБА (табл. 6.10).

Определение уровня шума в РТ, $L_{\text{Аэквтер2}}$

Воспользуемся формулой:

$$L_{\text{Аэкв.тер2}} = L_{\text{Аэкв.}} - \Delta L_{\text{Арас}} - \Delta L_{\text{Анок}} + \Delta L_{\text{Аотр}}, \quad (6.45)$$

$\Delta L_{\text{Арас}}$ определяется по расстоянию от ИШ до РТ (на рис. 6.28 это r_n) по кривой 1 (< 500 ед/ч) рисунка 6.23 $\Delta L_{\text{Арас}} = 17$ дБА.

$\Delta L_{\text{Анок}}$ определяется по параметру σ (табл. 6.27).

$$\sigma = 0,07d_n / h_{\text{РТ}} = 0,07 \cdot 48 / 14 = 5,6, \quad \Delta L_{\text{Анок}} = 0,5 \text{ дБА.}$$

Увеличение уровня шума в РТ за счет звука, отраженного домами, расположенными на противоположной стороне улицы, определяется по таблице 6.27. Соотношение $h_{\text{РТ}}/B = 14/124 = 0,11$, $\Delta L_{\text{Аотр}} = 1,5$ дБА.

$$L_{\text{Аэкв.тер2}} = 81 - 17 - 0,5 + 1,5 = 65 \text{ дБА.}$$

Определение требуемой звукоизоляции окна для помещения площадью менее 25 м^2

Для помещений площадью менее 25 м^2 требуемая звукоизоляция окна $R_{\text{Атран}}$ определяется по таблице 6.30 в зависимости от эквивалентного уровня шума у фасада здания $L_{\text{Аэквтер2}}$ и назначения помещения. Для жилых комнат квартир в домах категории А и $L_{\text{Аэквтер2}} = 65$ дБА требуемая звукоизоляция окна $R_{\text{Атран}} = 20$ дБА.

Для величины $R_{\text{Атран}} = 20$ дБА наиболее подходит конструкция шумозащитного вентиляционного окна МНИИТЭП – «окно разделенное с КГ 600 мм», 4-90-4 (табл. 6.29, строка 8). С работающим резонатором, т.е. с воздухообменом, $R_{\text{Атран}} = 26$ дБА, с заглушенным – $R_{\text{Атран}} = 31$ дБА. Конструкция окна приведена на рис. 6.26.

Данная конструкция окна обеспечивает в помещении следующий уровень шума: с работающим резонатором $65 - 26 = 39$ дБА, с неработающим резонатором $65 - 31 = 34$ дБА, что ниже допустимого уровня шума $L_{\text{доп}} = 40$ дБА.

Определение требуемой звукоизоляции окна для помещений площадью более 25 м².

Расчет требуемой звукоизоляции окна выполняется по формуле (6.44):

$$R_{\text{Атран}}^{\text{тр}} = L_{\text{Аэквтер2}} - L_{\text{А}}^{\text{доп}} - 10 \lg B + 10 \lg S_0 - 10 \lg k, \text{ дБ},$$

где S_0 – площадь окна (окон), м²;

B – акустическая постоянная изолируемого помещения;

k – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля (определяется по таблице 6.31 в зависимости от среднего коэффициента звукопоглощения отделки изолируемого помещения).

Для определения параметров S_0 , B и k требуется анализ объемно-планировочных и конструктивных параметров изолируемого помещения.

Примем, что изолируемое помещение имеет площадь $6 \times 6 = 36 \text{ м}^2$, высоту помещения 3 м и два окна общей площадью 6 м². Стены кирпичные оштукатуренные, потолок покрыт акустическими плитами толщиной 2 см, а пол покрыт ковролином толщиной 7 мм.

Суммарная площадь ограждающих конструкций за вычетом площади окон $S_{\text{огр}}$:

$$S_{\text{огр}} = 6 \times 6 \times 2 + 6 \times 3 \times 4 - 6 = 138 \text{ м}^2.$$

По таблице 6.14 определим коэффициенты звукопоглощения α материалов внутренней отделки при частоте 500 Гц:

- кирпичная кладка оштукатуренная, $\alpha = 0,02$ (строка 3);
- акустические плиты, $\alpha = 0,55$ (строка 11);
- ковролин, $\alpha = 0,15$ (строка 12).

Акустические характеристики изолируемого помещения:

- эквивалентная площадь звукопоглощения A :

$$\begin{aligned} A = \sum \alpha_i \cdot S_i &= 0,02 \cdot (6 \cdot 3 \cdot 4 - 6) + 0,55 \cdot 36 + 0,15 \cdot 36 = \\ &= 1,32 + 19,8 + 5,4 = 26,5 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

- средний коэффициент звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$:

$$\alpha_{\text{ср}} = A / S_{\text{огр}} = 26,5 / 138 = 0,19,$$

- акустическая постоянная изолируемого помещения:

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{ср}}} = \frac{26,5}{1 - 0,19} = 32,7 \text{ м}^2.$$

$$R_{\text{Атран}}^{\text{тр}} = 65 - 40 + 10 \lg 6 - 10 \lg 32,7 - 10 \lg 1,4 =$$

$$65 - 40 + 7,8 - 15,1 - 1,5 = 16,2 \text{ дБА}.$$

Такой звукоизоляции соответствует любая оконная конструкция, приведенная в таблицах 6.28 и 6.29.

Можно принять одинарное окно со стеклопакетом 3-12-3 по ГОСТ 24700-81. $R_{\text{Атран}} = 25 \text{ дБА}$. (строка 1, табл. 6.28).

РАЗДЕЛ VII. АКУСТИКА ЗАЛОВ

Теоретические основы архитектурной акустики основываются на принципах распространения звуковых волн в закрытых помещениях. Так, если в открытом пространстве существует только понятие прямого звука, который ослабевает по мере удаления от источника к слушателю, то в закрытом пространстве, помимо прямого звука от источника, имеется значительное количество отраженных звуковых волн от поверхностей помещения (рис. 7.1).

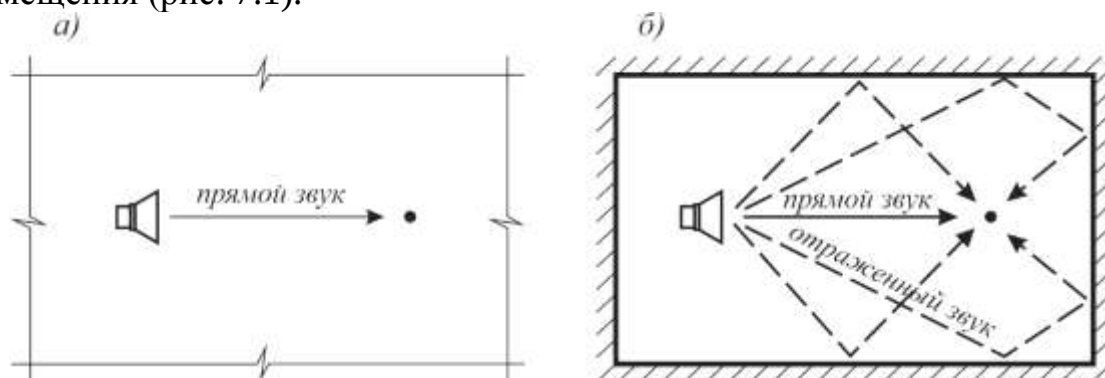


Рис. 7.1. Распространение звука в открытом (а) и закрытом (б) пространстве

При одновременном действии на слушателя нескольких звуковых сигналов (прямого и отраженного или нескольких отраженных) суммарная интенсивность звука усиливается, что позволяет проектировать залы большей вместимости и удаленности от источника звука, чем в открытом пространстве. Связано это с тем, что вследствие физиологии человеческого слуха звуковые сигналы, приходящие с небольшим запаздыванием (менее 0,05 с (50 мс)) воспринимаются как один сигнал, усиленный по сравнению с каждым в отдельности.

Характер восприятия человеком звука в закрытом пространстве связан с тремя основными акустическими характеристиками помещения:

- диффузность звукового поля;
- структура ранних отражений;
- время реверберации.

7.1. Диффузность звукового поля

Вследствие присутствия в закрытом пространстве большого количества отраженных звуковых лучей при наличии источника звука формирование звукового поля происходит сложным образом. Характер возникновения звукового поля в закрытом помещении отражен на рис. 7.2.

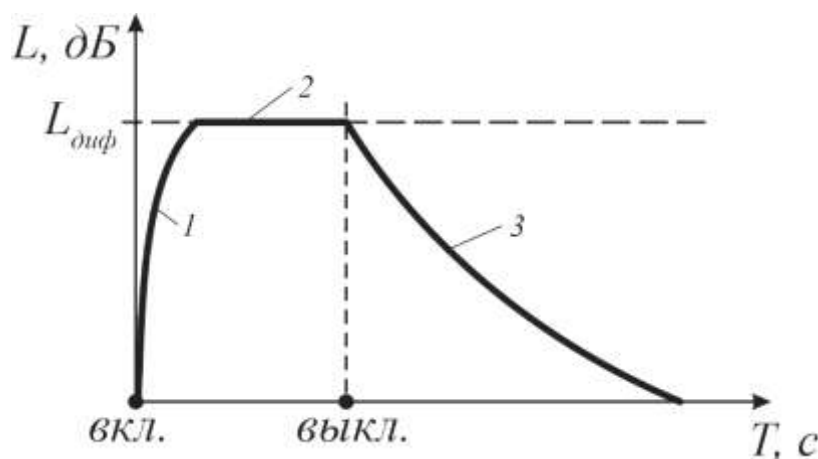


Рис. 7.2. Процесс формирования звукового поля в закрытом пространстве: 1 – процесс нарастания, 2 – стационарное состояние, 3 – процесс реверберации

При включении источника звука звуковые волны распространяются до поверхностей помещения, частично ими поглощаясь. Отраженные от поверхностей волны распространяются по помещению до тех пор, пока полностью не произойдет их звукопоглощение. Так как в течение этого времени источник звука не прекращает излучать звуковую энергию, то и звукопоглощение происходит непрерывно. В итоге, через определенное время наступает состояние, при котором в помещении поглощается такое же количество звуковой энергии, которое излучает источник звука – т.е. наступает состояние звукового равновесия, создается так называемое диффузное звуковое поле. Диффузное поле характеризуется изотропностью и однородностью. Под изотропностью понимают равенство средних потоков энергии по различным направлениям, под однородностью – равномерное распределение звуковой энергии по объему помещения.

Уровень звука в диффузном звуковом поле определяется мощностью источника звука, L_w , и величиной звукопоглощения, A , в помещении.

$$L_{\text{диф}} = L_w - 10 \lg A + 6. \quad (7.1)$$

Представление о диффузности звукового поля в закрытых помещениях является идеализированным. В большинстве случаев, когда звук распространяется в обычных помещениях (без специальной обработки поверхностей), звуковое поле не обладает в полной мере свойствами диффузности. В этой связи первой задачей архитектурной акустики является создание в помещении **диффузного звукового поля**.

Если теоретически представить ситуацию, при которой звукопоглощение в помещении отсутствует (что физически невозможно), то состояние звукового равновесия не наступало бы, и уровень звука в помещении непрерывно бы нарастал из-за постоянного увеличения количества отраженных звуковых волн.

7.2. О процессе реверберации в залах

При выключении источника звука (рис.7.2) происходит процесс спада звуковой энергии в помещении. В первую очередь за короткий промежуток времени пропадает прямой звук от источника, затем постепенно происходит процесс окончательного звукопоглощения отраженных звуковых волн в помещении. Таким образом, после выключения источника звука слушатель все еще воспринимает прозвучавший сигнал в течение некоторого временного интервала.

Процесс спада звуковой энергии в закрытом помещении называется **реверберационным процессом**, а само явление – **реверберацией**.

Субъективно данный процесс воспринимается слушателем как гулкость помещения: чем дольше длится реверберация, тем более гулким воспринимается помещение.

Реверберация является одним из важнейших критериев, определяющих хорошую слышимость в помещениях. За счет реверберации звук в помещении становится громче и продолжительней, чем в открытом пространстве. Увеличение громкости играет положительную роль, так как появляется возможность строить залы большой вместимости без применения специальных систем звукоусиления.

Увеличение продолжительности звучания в известной мере также играет положительную роль при исполнении мелодичной музыки, придавая ей новые оттенки, но может оказаться и вредным при звучании речи или ритмичной музыки, так как снижает разборчивость.

Для количественной оценки реверберации введено понятие **стандартного времени реверберации** – T , с. Это время, за которое энергия звука уменьшается в 10^6 раз (что соответствует уменьшению уровня звукового давления на 60 дБ). Стандартное время реверберации может быть рассчитано по формуле У.Сэбина (7.2) или Эйринга (7.3):

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A}, \quad (7.2)$$

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S \cdot \varphi(\alpha) + n \cdot V}, \quad (7.3)$$

где V – объем зала, м^3 ;

S – площадь поверхностей помещения, м^2 ;

A_0 – эквивалентная площадь звукопоглощения, м^2 ;

n – коэффициент поглощения звука воздухом;

α – средний коэффициент звукопоглощения в зале;

$\varphi(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$.

Формула Сэбина (7.2) справедлива при среднем коэффициенте звукопоглощения не более 0,2. При больших значениях следует пользоваться формулой Эйринга (7.3). При этом учитывать поглощение

воздухом следует только на частотах выше 2000 гц. Как видно из формулы (7.2), время реверберации помещения зависит от его объема и звукопоглощения поверхностей и находящихся в нем предметов. Поэтому оно может регулироваться архитектурно-строительными средствами.

Опытным путем определены оптимальные значения времени реверберации для различных по назначению и объему залов. Их можно определить по графику, приведенному в качестве примера на рис. 7.3.

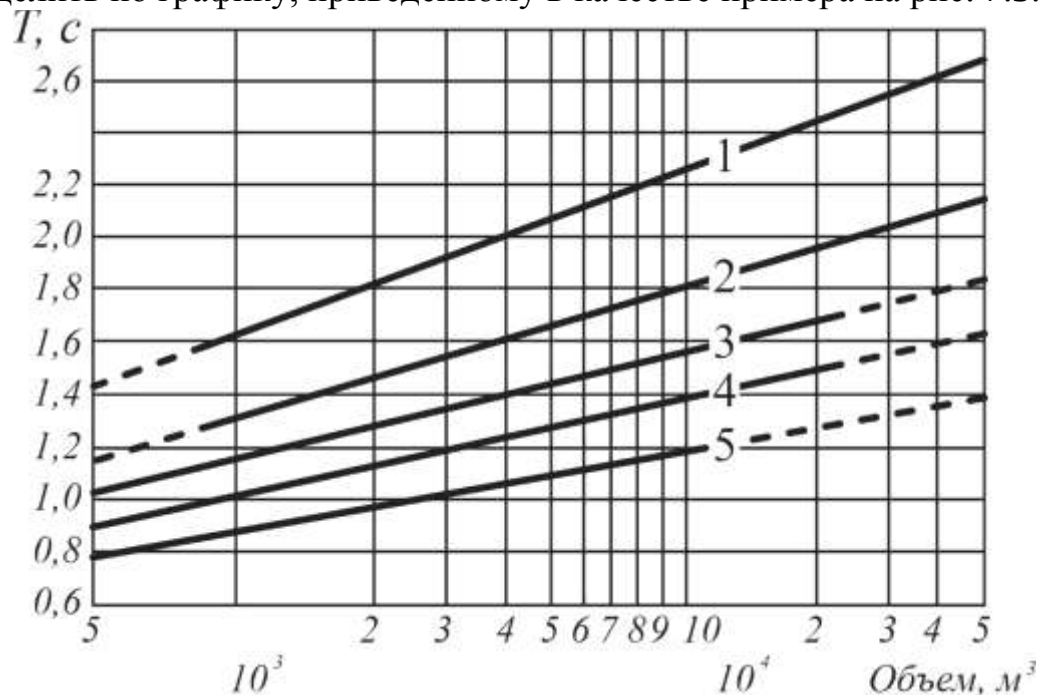


Рис. 7.3. Зависимость оптимального времени реверберации на средних частотах (500–1000 Гц) для залов различного назначения от их объема:

1 – залы для ораторий и органной музыки, 2 – залы для исполнения симфонической музыки, 3 – залы для исполнения камерной музыки, залы оперных театров, 4 – залы многоцелевого назначения, залы музыкально-драматических театров, спортивные залы, 5 – лекционные залы, залы заседаний, залы драматических театров, кинозалы

7.3. Структура звуковых отражений

В структуре процесса реверберации при акустическом проектировании выделяют два интервала: ранние отражения и собственно реверберация.

Под ранними отражениями понимают звуковые сигналы, доходящие от источника до слушателя с минимальным запаздыванием по отношению к прямому звуку. Формирование структуры звуковых отражений показано на рис. 7.4.

К распложенному в зале слушателю сначала приходит прямой звук от источника, так как путь этого звука самый короткий. Затем поступают однократные и многократные отражения от различных внутренних поверхностей (главным образом, от стен и потолка). Время запаздывания

прихода данных отражений определяется разностью путей отраженного и прямого звука.

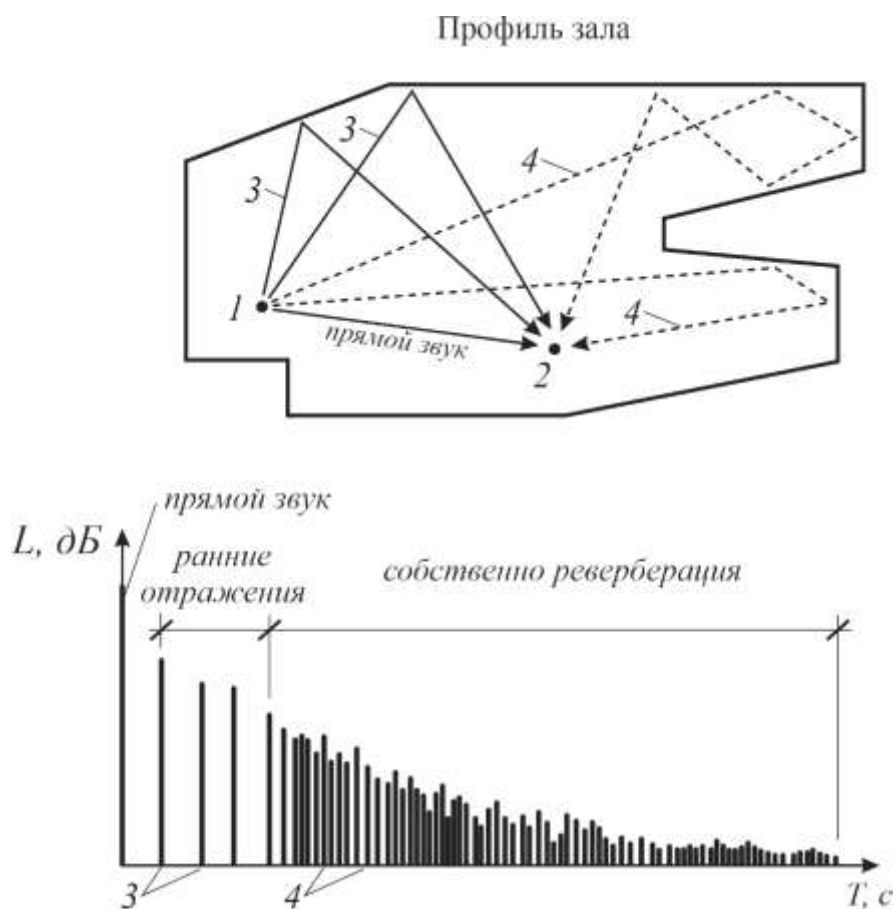


Рис. 7.4. Формирование структуры ранних отражений и реверберации в зале:
1 – источник звука, 2 – слушатель, 3 – ранние отражения, 4 – поздние отражения

Такие отраженные звуковые волны за счет однократного звукопоглощения обладают большой звуковой энергией и оказывают на слушателя наибольшее влияние после прямого звука. Кроме того, ранние отражения доходят до слушателя сразу после прихода прямого звука, т.е. обладают наименьшим запаздыванием и способностью усилить прямой звук.

Если время запаздывания первого отражения по отношению к приходу прямого звука составляет менее 50 мс, то такое отражение считается положительным, так как человеческим слухом воспринимается как усиление прямого звука. Если отраженный звук будет подходить к слушателю с запаздыванием по отношению к прямому сигналу на 100 мс для продолжительных сигналов (музыка) и 50 мс – для коротких сигналов (речь), то слушатель будет воспринимать отраженный сигнал как эхо. Чтобы этого не происходило, необходимо ограничить размеры зала или разместить на удаленных отражающих поверхностях эффективные поглотители звука.

Кроме того, важное значение имеет направление прихода первых отражений по отношению к слушателю. Приход отражений спереди и сбоку улучшает пространственность звучания. Приход отражений сзади дезориентирует слушателя.

7.4. Качественные характеристики акустики залов

Акустическое качество зала (зоны слушательских мест) в конечном счете определяется субъективной оценкой условий слухового восприятия речевых и музыкальных программ. Объективные параметры звукового поля надежно характеризуют акустику зала лишь в том случае, когда между ними и субъективными критериями существуют достаточно прочные корреляционные связи.

К субъективным акустическим характеристикам помещения можно отнести:

- слышимость речи
- звучание музыки
- гулкость зала
- ясность звучания
- пространственность звучания
- громкость звучания
- эхо
- мешающие шумы.

Слышимость речи. Основным субъективным фактором, определяющим качество передачи речи в помещении, — ее разборчивость. Для определения разборчивости речи применяются так называемые артикуляционные испытания, позволяющие получить разборчивость в процентах. В ходе испытаний в помещение с помощью диктора или фонограммы передается испытательный текст, а слушатели, находящиеся в помещении, записывают этот текст. Отношение правильно записанных на слух фонетических элементов к общему количеству переданных и определяет процент разборчивости.

Накопленный опыт и результаты многочисленных исследований показали, что для хорошей разборчивости требуется достаточно высокий уровень речи, низкий уровень шума, небольшое время реверберации и структура отражений, характеризующаяся наличием интенсивных ранних отражений при отсутствии поздних интенсивных отражений (типа эха). Существующие в настоящее время методы объективной оценки разборчивости в той или иной степени связаны с перечисленными акустическими характеристиками.

Звучание музыки. В отличие от речевых программ, основу субъективной оценки которых составляет разборчивость речи, оценка

качества звучания музыки в зале осуществляется по целому ряду субъективных критериев. Наиболее распространенными критериями являются реверберация (гулкость зала), ясность, пространственность, громкость и тембр звучания. Между этими критериями и параметрами звукового поля в настоящее время установлены определенные связи.

Гулкость зала – понятие, характеризующее длительность процесса затухания звука на месте прослушивания. Субъективная оценка зависит от вида музыки (органная, симфоническая, камерная) и ее стиля. Основным объективным показателем гулкости помещения является стандартное время реверберации T .

Ясность звучания характеризует разделение звуков отдельных инструментов или групп инструментов как во времени (особенно при быстрых пассажах), так и в звуке одновременно играющих инструментов.

Пространственность звучания – субъективный параметр, характеризующий ощущение закрытого пространства. Это ощущение ранее связывалось со временем реверберации или соотношением энергии ранних и поздних отражений в импульсном отклике. Увеличение времени реверберации или преобладание энергии поздних отражений сопровождается увеличением пространственного впечатления. Более поздние исследования выявили очень важную роль ранних боковых отражений в формировании пространственного впечатления. Было установлено, что ощущение пространства возрастает с увеличением энергии боковых отражений, причем отражения, приходящие по направлению оси уха слушателя, вызывают наибольшее пространственное впечатление. Пространственный эффект не меняется, если запаздывание отражений находится в пределах 8–100 мс, а также в том случае, когда небольшое число интенсивных отражений заменяется большим числом слабых отражений, имеющих такую же общую энергию.

Отражения от потолка не увеличивают пространственного впечатления, однако и не оказывают маскирующего действия на отражения от боковых стен. Потолочные отражения увеличивают ясность звучания. Боковые отражения с запаздыванием 25–80 мс увеличивают как пространственность, так и ясность звучания.

Громкость звучания – субъективный критерий, характеризующий громкость источника музыки при игре фортиссимо по отношению к некоторой ожидаемой громкости на месте прослушивания. Субъективное ощущение силы звука (громкость) прямо пропорционально плотности звуковой энергии в стационарном состоянии.

Тембр звучания – понятие, характеризующее восприятие отдельных составляющих спектра звука музыкального источника на месте прослушивания. Речь идет о том, в какой степени свойства помещения изменяют типичный тембр данного источника. Тембр звучания до сих пор связывался только с частотной характеристикой времени реверберации

$T(f)$ причем для музыкальных помещений считается весьма желательным подъем $T(f)$ в сторону низких частот. В качестве оптимального обычно рекомендуется такой подъем, при котором время реверберации на частоте 125 Гц возрастает примерно на 20% по сравнению со временем реверберации на частотах 500–1000 Гц.

Очень важным условием нормального восприятия как речи, так и музыки является отсутствие мешающих акустических факторов, к которым относятся эхо, порхающее эхо, нарушение локализации источника звука, тембровые искажения и шумы.

Эхо. Поздние звуковые отражения при определенных условиях могут вызвать эхо – заметное на слух повторение прямого звука. Заметность эха и его мешающее действие зависят от ряда объективных параметров. Наиболее важными из них являются время запаздывания и интенсивность отражения по отношению к прямому звуку, а также тип звукового сигнала. Взаимосвязь этих трех параметров характеризуют пороги заметности эха (рис. 9.14), усредненные по данным измерений многих авторов. Наиболее низкий порог – для речи, а наиболее высокий – для медленных скрипичных пассажей. Эхо, заметное при речевом сигнале, может совсем не мешать при исполнении музыкальных произведений.

На субъективную оценку эха влияют и другие физические параметры звукового поля. Ослаблению эха способствуют, например, достаточно интенсивные промежуточные отражения, расположенные (по времени запаздывания) между эхом и прямым звуком, а также уменьшение абсолютного уровня прямого звука.

Порхающее эхо. Многократное, или порхающее, эхо представляет собой периодическую последовательность эха. Порхающим обычно считается, по крайней мере, трехкратное эхо. Минимальный временной интервал (период), при котором возникает порхающее эхо, зависит от разницы в уровнях предыдущего и последующего отражений, а также от типа звукового сигнала. Для речи этот интервал близок к 50 мс, а для музыки – к 100 мс. Мешающее действие порхающего эха (как и однократного) уменьшается при наличии промежуточных отражений.

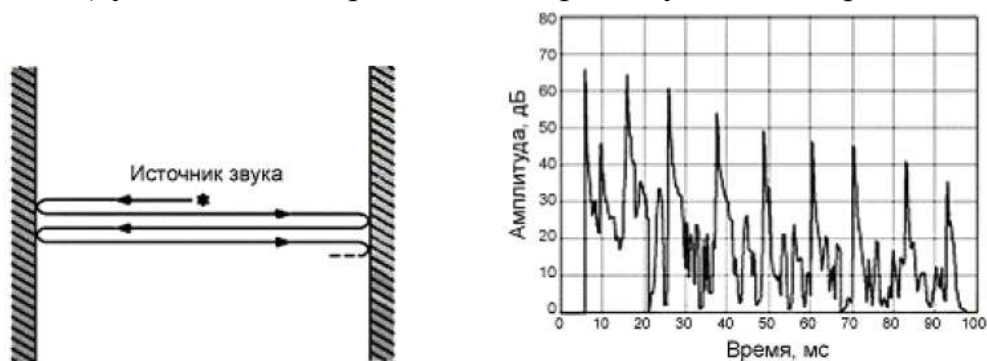


Рис. 7.5. Структура звуковых колебаний при образовании порхающего эха

Нарушение локализации источника звука. Правильная локализация источника звука (совпадение зрительного образа со слуховым) особенно важна в речевых помещениях. В концертных залах требование правильной локализации не столь жесткое, некоторое «рассеяние» звукового образа иногда даже желательно. Тем не менее сильное нарушение локализации недопустимо и в этом случае.

Причиной нарушения локализации источника звука является, как правило, значительная концентрация отражений, направление прихода которых отличается от направления прихода прямого звука. При значительном запаздывании эти отражения могут также вызвать эхо. В залах, где эхо или концентрация отражений отсутствуют, нарушения локализации обычно не наблюдается.

Искажение тембра. Искажение первоначального звукового сигнала может возникнуть при наличии порхающего эха, если период последовательности отражений меньше 20 мс (частота более 50 Гц). В этом случае слушатель, помимо основного сигнала, воспринимает тон, частота которого равна частоте последовательности. Аналогичный эффект наблюдается при отражении звука от поверхностей, имеющих членения с мелким регулярным шагом. Свидетельством тембровых искажений являются также резкие пики и провалы в частотных характеристиках реверберации или звукопередачи.

Мешающие шумы. В условиях эксплуатации шумовой режим залов определяется шумом, создаваемым публикой, и проникающими шумами. Шум, создаваемый людьми, находящимися внутри зала, не нормируется, так как, в основном, зависит от их дисциплинированности и физического состояния (например, большое число простуженных в зале) или может быть связан с жестким полом помещения (шорох), наличием жестких старых кресел (скрип), а также с плохой акустикой, вызывающей нервозность слушателей. Обычно уровень шума публики в паузах составляет 40–50 дБА.

Когда говорят о мешающих шумах, то, как правило, имеют в виду шумы, проникающие в зал из соседних помещений или с улицы, а также создаваемые различным инженерным оборудованием здания. Измеренные уровни проникающего шума в октавных полосах частот в диапазоне 63–8000 Гц не должны превышать нормативных значений.

7.5. О применении звукоусиления

Размеры залов с естественной акустикой ограничены возможностями человеческого голоса и музыкальных инструментов и не могут превышать, как правило, 30 м в длину. При больших размерах зала необходимо применение электроакустических систем звукоусиления. Простейшие системы звукоусиления малых залов состоят из микрофона, усилителя и

динамических громкоговорителей, устанавливаемых в передней части зала.

Такие системы практически не требуют каких-либо дополнительных строительно-акустических мер по сравнению с залами с естественной акустикой.

Современное развитие электроники позволило создать ряд новых систем с различными акустическими возможностями. К их числу относятся многоканальные системы широкоформатных кинотеатров, позволяющие по ходу действия на экране воспроизводить звук в разных зонах зрительного зала; амбиофонические системы, изменяющие время реверберации и создающие эффект эха. Создаются звукорежиссерские пульта, объединяющие указанные системы и позволяющие менять тональную окраску звучания по ходу театрального действия или музыкального исполнения. В настоящее время такими пультами оборудуются большие залы универсального назначения, телевизионные и радиостудии. Собственное время реверберации таких залов, достигаемое архитектурно-строительными средствами, должно составлять около 1,8 с. Такое время обеспечивает комфортные условия для находящихся в зале людей. Поглощающие материалы и конструкции в залах с электроакустическими системами должны быть распределены равномерно по всем поверхностям.

7.6. Общие принципы акустического проектирования залов. Основы геометрической акустики

Цель архитектурной акустики – обеспечение архитектурно-строительными средствами хорошей слышимости естественной речи и музыки, а также звуков, воспроизводимых электроакустической аппаратурой.

При проектировании залов к таким средствам относятся:

- размеры и форма залов,
- членение поверхностей стен и потолков различными объемными элементами,
- обработка ограждений материалами, отражающими или поглощающими звук,
- размещение в залах специальных звукопоглощающих и резонирующих конструкции, акустических диффузоров и т.д.,
- применение мебели с определенными звукопоглощающими характеристиками.

7.6.1. Требования к размерам и форме зала

В каждом зале должны быть выдержаны основные требования к его объемно-планировочному решению, дифференцированные в зависимости от конкретного назначения зала следующим образом.

Удельный воздушный объем на одно зрительское место должен составлять, м:

в залах драматических театров, аудиториях и конференц-залах	4-5;
в залах музыкально-драматических театров (оперетта)	5-7;
в залах театров оперы и балета	6-8;
концертные залы камерной музыки	6-8;
концертные залы симфонической музыки	8-10;
залы для хоровых и органых концертов	10-12;
многоцелевые залы	4-6;
концертные залы современной эстрадной музыки (киноконцертные залы)	4-6

Максимальная длина залов должна составлять, м:

в залах драматических театров, аудиториях и конференц-залах	24-25;
в театрах оперетты	28-29;
в театрах оперы и балета	30-32;
в концертных залах камерной музыки	20-22;
в концертных залах симфонической музыки, хоровых и органых концертов	42-46;
в многоцелевых залах, не имеющих сценической коробки	27-28;
в многоцелевых залах со сценической коробкой (от задней стены до занавеса)	24-26;
в концертных залах современной эстрадной музыки	48-50

Для получения достаточной диффузности звукового поля следует правильно выбрать форму и пропорцию зала.

$$L \leq L_{\text{доп}}; \quad B = S_{\text{п}} / L; \quad H = V / S_{\text{п}}; \quad 1 < L/B < 2; \quad 1 < B/H < 2,$$

где L – длина зала по его центральной оси, м;

$L_{\text{доп}}$ – предельно допустимая длина зала, м;

B и H – соответственно, средние ширина и высота зала, м;

V – общий воздушный объем зала, м³;

$S_{\text{п}}$ – площадь пола зала, м².

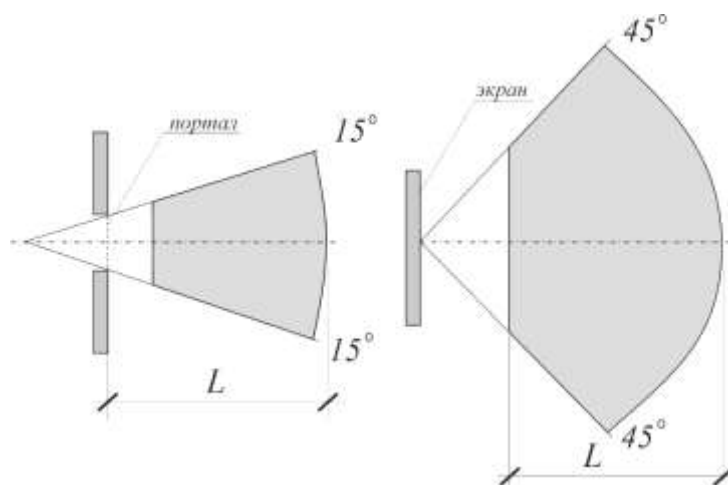


Рис. 7.6. Зоны размещения зрителей в залах театров (слева) и кинотеатров (справа)

Окончательный выбор размеров и пропорций залов может корректироваться на основании результатов акустического расчета.

Прямоугольная форма в плане с плоским горизонтальным потолком допустима только для небольших лекционных залов вместимостью до 200 человек. Во всех других случаях зрительных залов оптимальной формой плана является трапецевидная с углом раскрытия $10 - 12^\circ$.

В залах вместимостью более 600 мест целесообразно устраивать балконы и галереи. Это позволяет:

- уменьшить длину зала;
- улучшить условия видимости и слышимости для удаленных зрителей;
- расчленить пространство зала, способствуя созданию диффузного звукового поля. При проектировании балконов следует учитывать следующие правила (рис.7.7):

Вынос балкона не должен превышать 1,5 средней высоты пазухи под балконом.

Глубина балкона не должна превышать более чем в 2 раза среднюю высоту пазухи над балконом.

Профиль пола балкона строится также как в партере.

Глубина ложи – не более полторы ее высоты.

Минимальная высота пазухи под балконом – 3,5 м.

От потолка до головы последнего зрителя на балконе д.б. не менее 2,1 м.

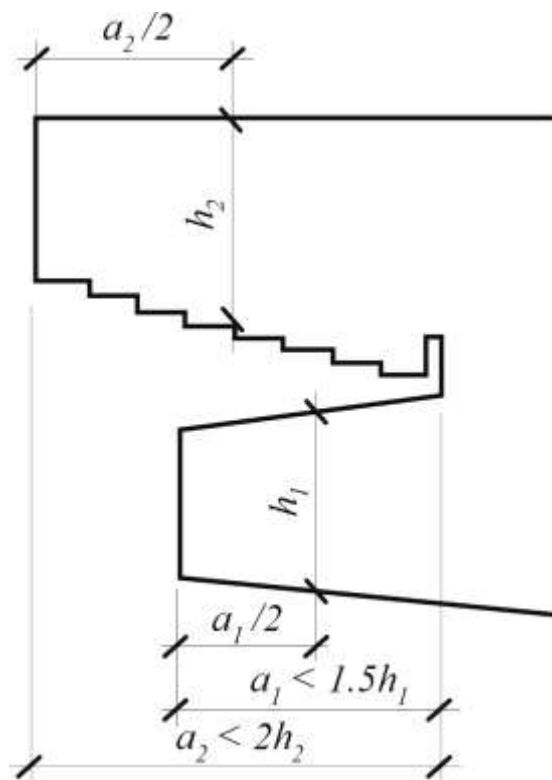


Рис. 7.7. Геометрические параметры балконов в зале

7.6.2. Построение профиля пола

Пол партера и балкона должен иметь профиль, обеспечивающий хорошую видимость эстрады или сцены. Это важно и для акустики зала, так как при соблюдении указанного требования уменьшаются поглощение прямого звука при его распространении над сидящими слушателями и экранирование слушателями друг друга. С этой же целью высота эстрады или авансцены над уровнем прилегающего пола партера должна быть не менее 1 м. Профиль пола партера и балконов строится по правилам архитектурного проектирования зрительных залов.

Для построения профиля пола необходимо учитывать следующее:

- Положение расчетной точки видимости (р.т.в) принимается:
 - в кинотеатрах – в центре нижней кромки киноэкрана,
 - в лекционных залах – в центре нижней кромки аудиторной доски или проекционного экрана,
 - в остальных залах – на уровне пола сцены или эстрады на красной линии.
- Красная линия сцены проходит по передней грани портала сцены. Красная линия эстрады – на 1 м от переднего края эстрады.
- Положение головы зрителя, сидящего в 1 ряду по оси зала, принимается на высоте 1,2 м от уровня пола.
- Значение допустимого превышения луча зрения зрителя над головой впереди сидящего принимается равным 0,12 м. Допускается в театрах при шахматном расположении кресел принимать превышение 0,06 м.

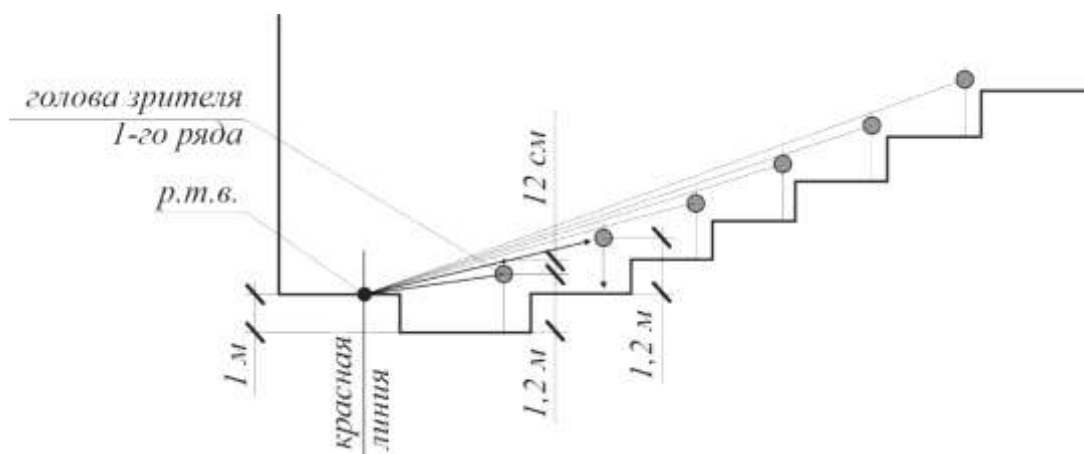


Рис. 7.8. Построение кривой наименьшего подъема пола

Профиль пола может быть построен в виде кривой наименьшего подъема или ломаной линии по участкам. Для построения кривой наименьшего подъема, как показано на рис. 13, откладывают превышение над головой первого зрителя (0,12 или 0,06 м), и полученную точку соединяют с расчетной точкой видимости. Эту линию продолжают до пересечения с положением спинки кресла сзади сидящего зрителя. Точка пересечения определяет положение его головы. Повторяя это построение

для каждого следующего ряда, находят положение головы всех зрителей по данной оси зала. Профиль пола проходит параллельно, на 1,2 м ниже по уровню.

7.6.3. Построение профиля потолка

Цель построения – оптимальное распределение по залу звуковой энергии, отраженной от потолка и направленной к зрителям, так называемых первых ранних отражений.

Процесс построения потолка заключается в нахождении такого положения отдельных его участков, при котором:

- отраженная энергия распределяется в речевых залах на всех зрителей, а в музыкальных – на сидящих далее 8 м от красной линии сцены или эстрады;
- чем дальше сидят зрители, тем большее количество отражений от разных участков они получают;
- смежные зоны отражений от участков потолка перекрываются;
- создается оптимальная структура ранних отражений (рис. 7.9).

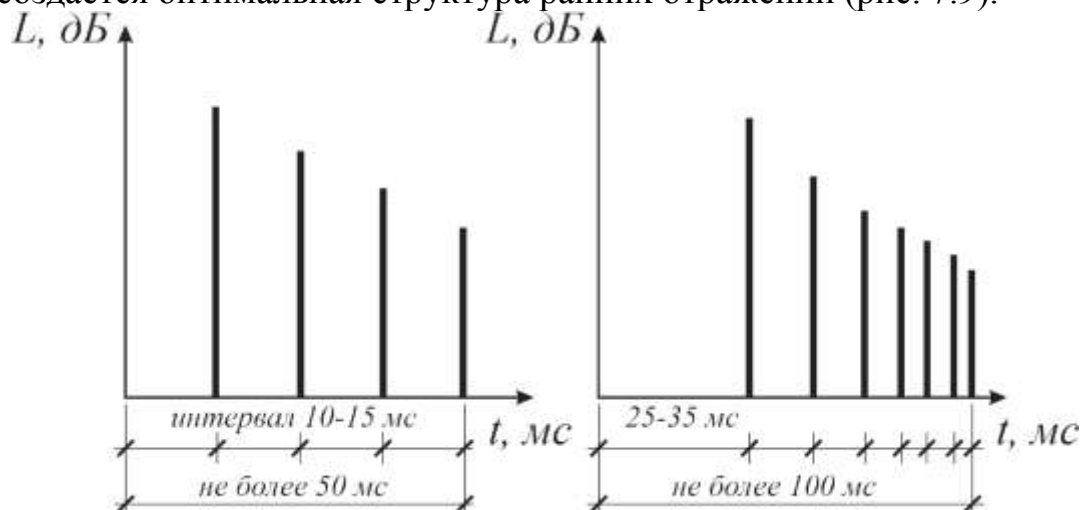


Рис. 7.9. Оптимальная структура ранних отражений в речевых (слева) и музыкальных (справа) залах

Поскольку путь, которым отраженный звук проходит от источника до зрителя, больше прямого, происходит отставание – запаздывание во времени отраженной энергии. Это запаздывание не должно превышать допустимых значений:

- 0,05 сек – для речевых залов,
- 0,1 сек – для музыкальных.

При скорости распространения звуковой энергии в зале, равной 340 м/с, допустимые значения разницы путей прямого и отраженного звука в метрах составят:

- 17 м – для речевых залов,
- 34 м – для музыкальных.

Для определения пути, проходимого отраженным звуком, используют графический метод фокальных точек. При определенных условиях можно вместо звуковых волн рассматривать звуковые лучи, в направлении которых распространяются эти волны. Распространение таких лучей аналогично распространению световых лучей в геометрической оптике, и построение геометрических (лучевых) отражений широко применяется в архитектурной акустике:

1) падающий и отраженный от какой-либо точки поверхности луч образует равные углы (угол падения и угол отражения) с нормалью к отраженной поверхности в этой точке;

2) падающий и отраженный лучи лежат совместно с нормалью в одной плоскости (лучевая плоскость).

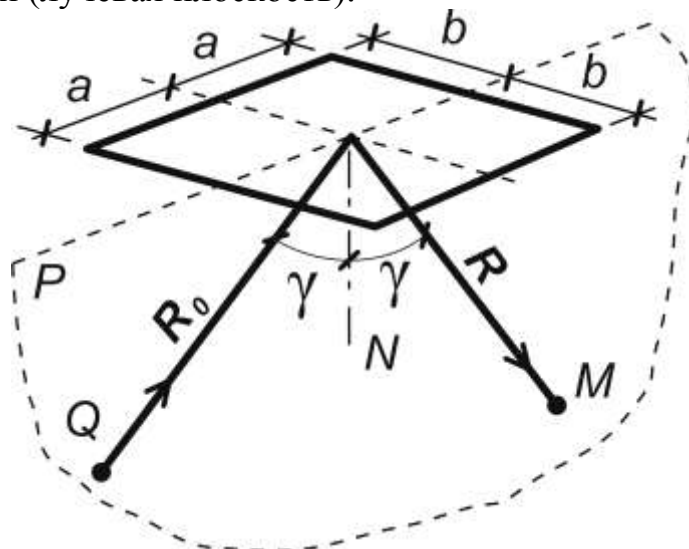


Рис. 7.10. К определению допустимости применения методов геометрической акустики

Допустимость применения способа геометрических (лучевых) отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема.

- Звуковое поле в помещении диффузно.
- Наименьшая сторона участка отражающей поверхности (экрана, ограждения) не менее чем в 1,5 раза превышает длину отражаемой звуковой волны.
- Отражающая поверхность должна при этом иметь массу не менее 20 кг/м², и ее коэффициент звукопоглощения α для рассматриваемых частот не должен превышать 0,1.
- Отклонение в значениях уровня звука в точке приема М от строго геометрического не превышает 5 дБ. Эта величина вычисляется по формуле (7.4).

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{v} \right). \quad (7.4)$$

В этой формуле

$$u = a \cdot \cos \gamma \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}; v = b \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}; \lambda = \frac{c}{f},$$

где λ – длина звуковой волны;

c – скорость звука (340 м/с);

f – нижнее значение частоты звука, характерное для звучания, принимаемое: для речевых залов – 200 Гц, для музыкальных – 100 Гц, для универсальных – 150 Гц,

a и b – половины сторон отражающего участка ограждения, м.

На рис. 7.10 отражающая поверхность взята в виде прямоугольного плоского отражателя со сторонами, равными $2a$ и $2b$, центр его совпадает с точкой геометрического отражения O , а сторона $2a$ параллельна лучевой плоскости P , в которой лежат падающий звуковой луч QO , отраженный луч OM и нормаль ON ; R_0 – расстояние от источника Q до точки O ; R – расстояние от точки O до точки приема M ; γ – углы падения и отражения звукового луча.

При выполнении условий, описанных выше, построение пути отраженного звука выполняют методом фокальных точек, представленным на рис. 7.11.

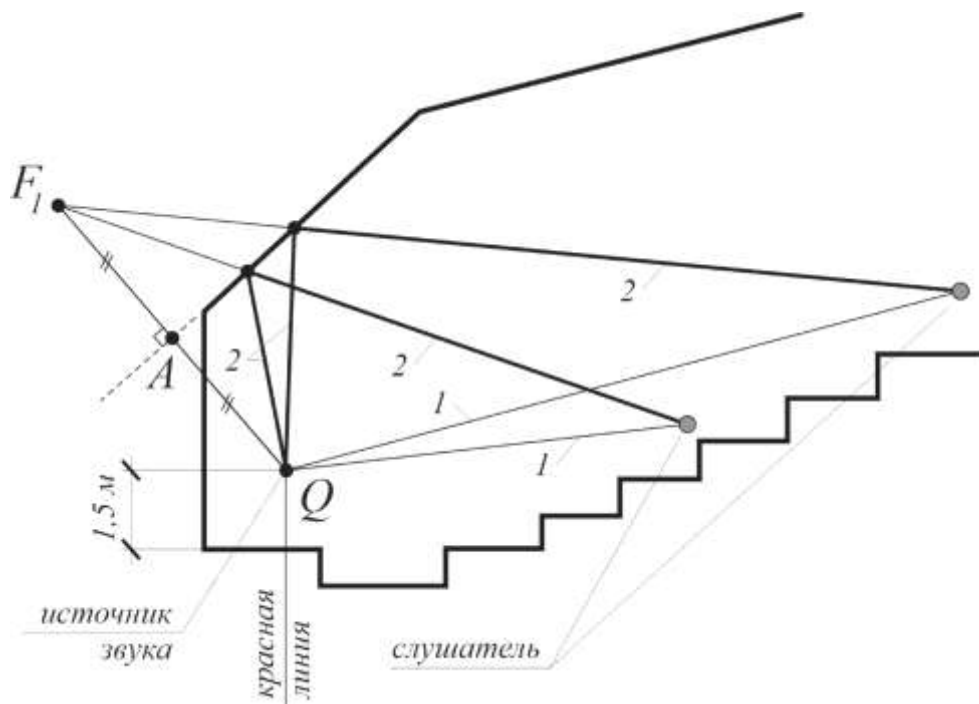


Рис. 7.11. Построение пути отраженного звука

Здесь используется мнимый источник F_1 , симметричный с действительным точечным источником Q по отношению к отражающей плоскости и находящийся по другую ее сторону. Для построения мнимого источника надо опустить из точки Q перпендикуляр QA на отражающую плоскость и на продолжении его отложить отрезок AF_1 , равный отрезку

QA . Прямые, проведенные из мнимого источника F_1 после пересечения ими отражающей плоскости, удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения, то есть являются искомыми отраженными лучами, создаваемыми действительным источником Q.

7.6.4. Проектирование отделки. Определение границ зон ранних отражений на потолке

При проектировании отделки зала необходимо учитывать три важных требования для создания хорошей акустики:

- Использовать полезные ранние направленные отражения для усиления звука
 - Создать диффузное (равномерное) звуковое поле в зале
 - Обеспечить оптимальную продолжительность процесса реверберации
- В соответствии с этими задачами в зале должны быть поверхности:

1. Выполненные в виде плоских хорошо отражающих звук участков, отделанных материалами с очень малым коэффициентом звукопоглощения.

2. Хорошо отражающие звук в разные стороны (рассеяно, диффузно), для этого они должны быть не плоскими, а профилированными, объемными или, как говорят, пластически обработанными.

3. Выполненные из материалов и конструкций, хорошо поглощающих звук в широком диапазоне частот.

Границы зон раннего отражения определяются графически для потолка и стен.

Зоны эффективного звукопоглощения располагают на задней стене в углах примыкания стен и потолков – для устранения двойных отражений

Зоны диффузного отражения занимают остальную часть поверхностей.

Границы зон поверхностей, дающих первые (ранние) отражения определяются графически по законам геометрической акустики. Построения начинают с отыскания проекций фокальных точек. Каждый участок потолка будет иметь свою фокальную точку и проекции этой точки на плане и разрезе, как показано на рис.7.12.

Порядок построения следующий:

- На разрезе из источника Q проводят перпендикуляр к линии участка потолка и на продолжении на расстоянии, равном длине отрезка от источника до потолка, находят фокальную точку F.
- На плане проекция этой точки лежит на пересечении вертикали из фокуса – т. F и горизонтали из источника – т. Q.
- Проводят лучи из фокальных точек к крайним зрителям в зале. Там, где эти лучи на разрезе пересекаются с потолком, находятся крайние точки зоны отражения (т.1 и 2).

- Найденные точки с разреза переносятся в проекционной зависимости на план потолка. Формируется зона ранних отражений на потолке.

С учетом возможных явлений дифракции (огибания звуковыми волнами краев участков) полученную зону расширяют во все стороны на величину 0,5 м.

Зоны ранних отражений на стенах определяют тем же способом.

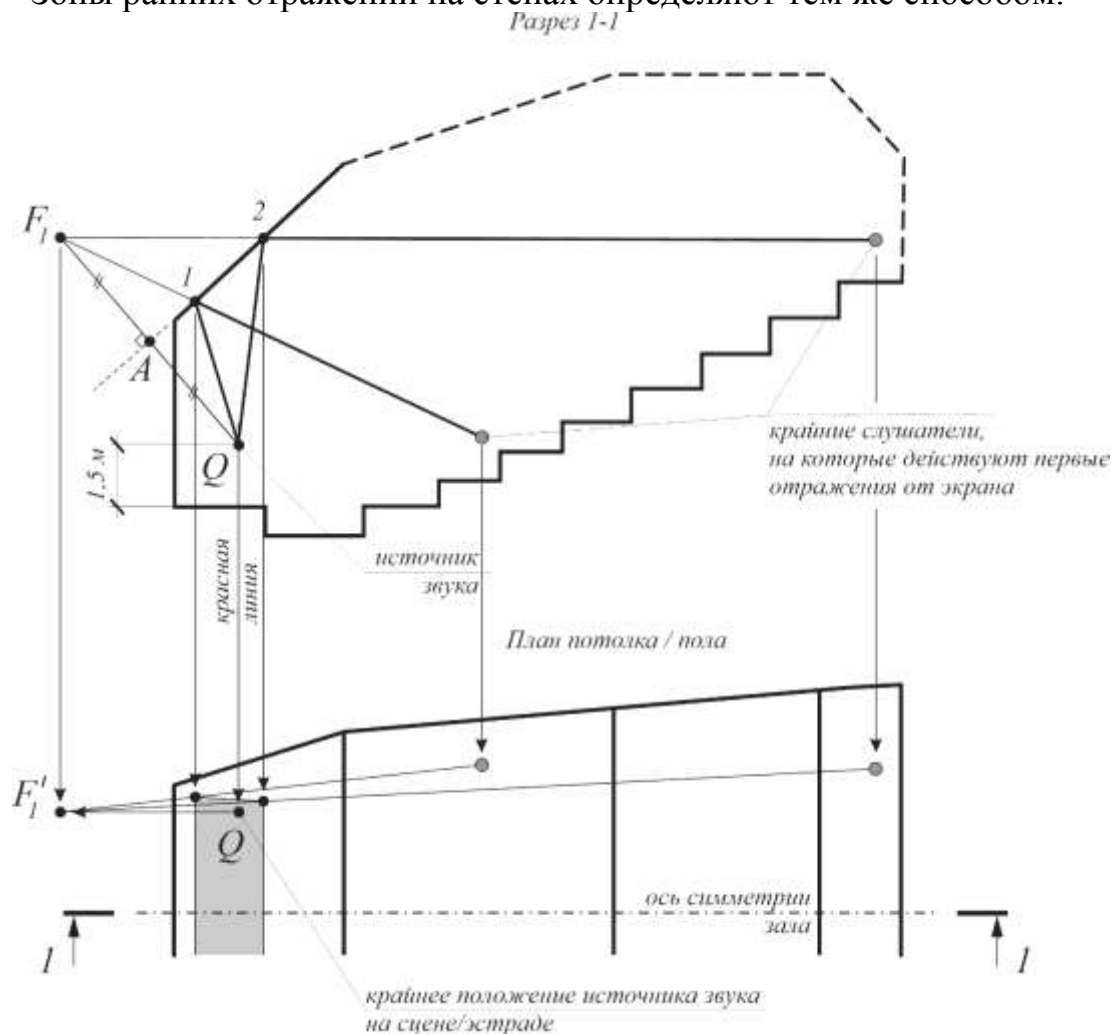


Рис. 7.12. Определение зон ранних отражений на потолке

7.6.5. Расчет времени реверберации

Оптимальные значения времени реверберации в области средних частот 500–1000 Гц для залов различного назначения в зависимости от их объема приведены на рис. 7.3. Допустимое отклонение от приведенных величин $\pm 10\%$. Кроме того, в октавных полосах частот 125–250 Гц допускается превышение оптимального времени реверберации, но не более чем на 20 %; а в диапазоне частот 2000–4000 Гц допускается спад, но не более чем на 10 %. В любом случае как точность определения T_{opt} по рисунку 7.3, так и погрешность расчетов времени реверберации, не должна превышать $\pm 0,05$ с.

Если время реверберации зала, по крайней мере, в одной из частотных полос T_{fi} отличается от T_{opt} , то следует внести некоторые изменения в конструктивные решения, с тем чтобы приблизить T_{fi} к T_{opt} .

Время реверберации обычно вычисляют на низких (125 гц,) средних (500 гц.) и высоких (2000гц.) частотах. Расчет производится по формуле Эйринга (7.3), более точно определяющей T при значениях среднего коэффициента звукопоглощения, больших 0,2. Расчет делают при полном заполнении зала зрителями и для случая заполнения 75% мест.

Поглощение звука воздухом учитывают только на высоких частотах. Вычисленные значения стандартного времени реверберации сравнивают с оптимальными для данного зала.

7.6.6. Подбор параметров пластической обработки поверхностей в зале

Для формирования диффузного звукового поля необходимо, чтобы значительная часть внутренних поверхностей ограждений в зале создавала рассеянное, ненаправленное отражение звуковых волн. Это достигается расчленением поверхностей балконами, галереями, пилястрами, нишами и прочими элементами. Характер расчленений должен соответствовать основному диапазону звуковых частот в зале, характерному для данного типа зала (табл. 7.1). Это связано с тем, что хорошо рассеиваются звуковые волны, длина которых соответствует размерам членений.

Таблица 7.1

Источник звука	Диапазон частот, Гц	Уровни звука, дБ	
		1 м	10 м
Оратор	200-4000	70	40
Драматический артист	200-4000	75	45
Солист	100-8000	80	50
Камерный оркестр	20-20000	80	50
Хор	100-8000	75	60
Симфонический оркестр	20-20000	90	65

Так, например, эффективное рассеивание в области частот 200–600 гц дают пилястры шириной 1–2 м, глубиной 0,5–1 м при шаге 2–4 м. Если поверхность этих пилястр подвергнуть дальнейшему расчленению, то может быть достигнуто рассеивание в широком диапазоне частот.

Рекомендуемые параметры пластической обработки поверхностей в залах приведены на рис. 7.13.

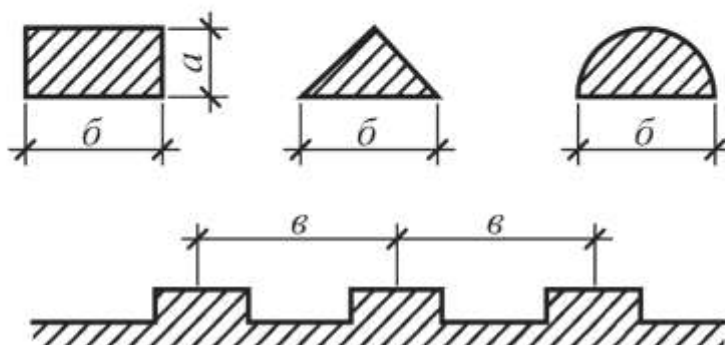
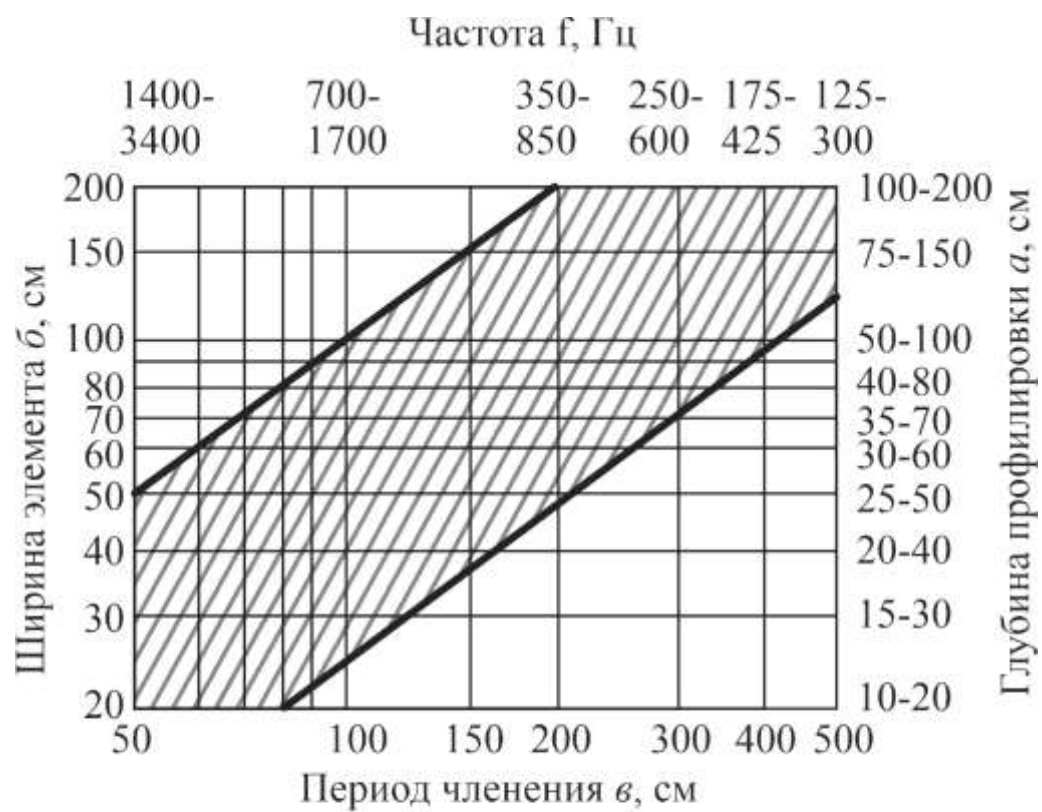


Рис. 7.13. Подбор параметров членения ограждений

Содержание

Введение	132
РАЗДЕЛ V. ИНСОЛЯЦИЯ ТЕРРИТОРИЙ ЗАСТРОЙКИ И ПОМЕЩЕНИЙ ЗДАНИЙ	134
5.1. Общие требования и нормирование инсоляции	134
5.1.1. Требования к инсоляции жилых зданий	135
5.1.2. Требования к инсоляции общественных зданий	135
5.1.3. Требования к инсоляции территорий	135
5.1.4. Обеспечение нормативной продолжительности инсоляции	136
5.2. Координаты солнца при его движении по небосводу	136
5.3. Инструменты по оценке продолжительности инсоляции	139
5.3.1. Построение солнечной карты	139
5.3.2. Построение инсографика	140
5.3.3. Построение картограмм затеняющих объектов	143
5.3.4. Построение картограмм светопроемов	146
5.4. Типовые задачи по определению продолжительности инсоляции территорий и помещений зданий	147
5.4.1. Построение и анализ конверта от здания	147
5.4.2. Определение гарантийно-инсоляционных зон	148
5.4.3. Инсоляция расчетной точки, расположенной на территории застройки вблизи одиночного здания	150
5.4.4. Инсоляция помещений зданий	153
РАЗДЕЛ VI. ЗАЩИТА ОТ ШУМА	159
6.1. Звук и шум. Основные понятия	159
6.2. Расчетные параметры звука	161
6.3. Источники шума и их шумовые характеристики	164
6.4. Воздействие шумов на человека	168
6.5. Нормирование шума	172
6.6. Расчет ожидаемых уровней шума в расчетных точках	176
6.7. Снижение шума в помещениях средствами звукопоглощения	180
6.8. Звукоизоляция ограждающих конструкций	184
6.8.1. Основные параметры звукоизоляции ограждающих конструкций	185

6.8.2. Определение частотных характеристик изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями	189
6.8.3. Определение параметров звукоизоляции ограждающих конструкций.....	195
6.9. Защита от шума на территориях городской застройки.....	198
6.9.1. Распространение звуковых волн в открытом пространстве.....	198
6.9.2. Источники городских шумов и их характеристики	202
6.9.3. Выбор расчетных точек и определение в них уровня шума	203
6.9.4. Определение соответствия рассчитанных значений уровней шума в РТ нормативным	209
6.9.5. Подбор звукоизоляции окон по характеристикам транспортного шума	209
РАЗДЕЛ VII. АКУСТИКА ЗАЛОВ	217
7.1. Диффузность звукового поля.....	217
7.2. О процессе реверберации в залах	219
7.3. Структура звуковых отражений	220
7.4. Качественные характеристики акустики залов.....	222
7.5. О применении звукоусиления.....	225
7.6. Общие принципы акустического проектирования залов. Основы геометрической акустики	226
7.6.1. Требования к размерам и форме зала	227
7.6.2. Построение профиля пола.....	229
7.6.3. Построение профиля потолка	230
7.6.4. Проектирование отделки. Определение границ зон ранних отражений на потолке.....	233
7.6.5. Расчет времени реверберации	234
7.6.6. Подбор параметров пластической обработки поверхностей в зале	235

Куприянов В.Н., Петров А.С., Иванцов А.И.

АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

В 2 частях

Часть 2

Инсоляция, защита от шума, акустика залов