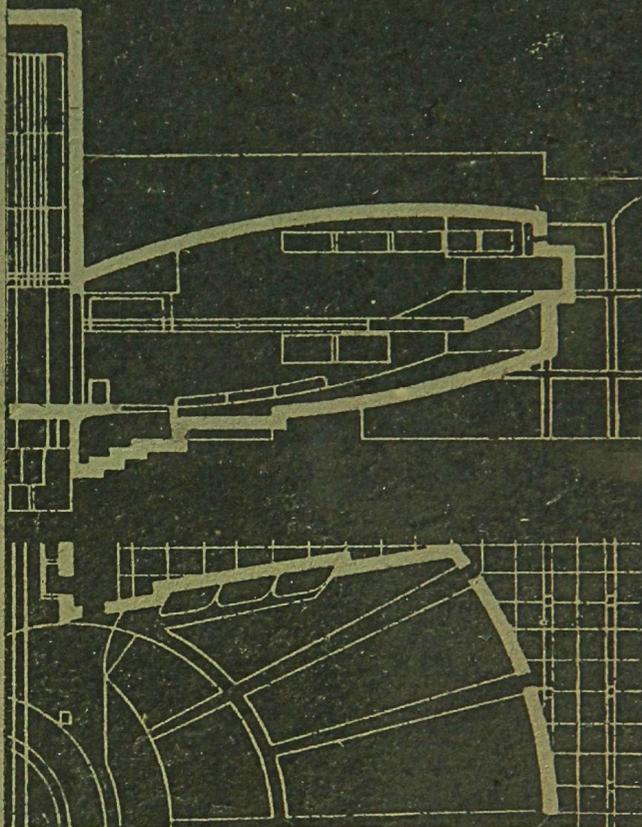
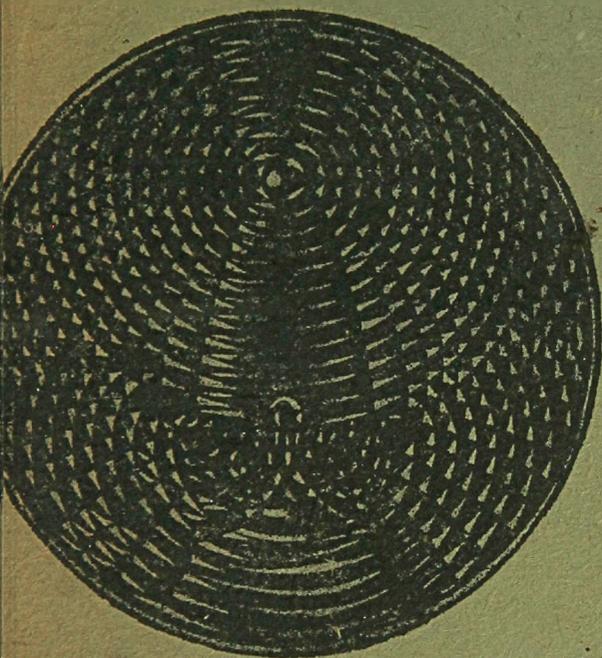


проф. С. В. БЕЛЯЕВ

69

Б 497

# АКУСТИКА

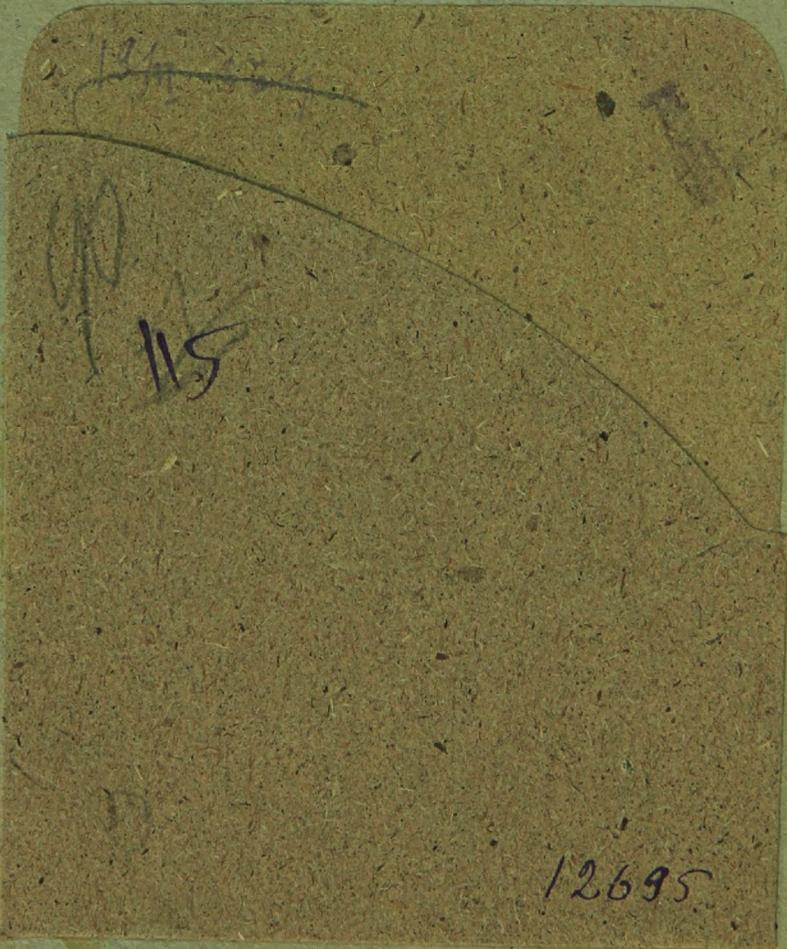


# ПОМЕЩЕНИЙ

12695  
опти

госстройиздат

115



12695

Проф. С. В. БЕЛЯЕВ

69  
Б447с.

# АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

АРХИВ

Читальный зал

Центральная Библиотека  
им. Белинского

12695.11  
1914 г.  
Жк



НКТП

СССР

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ  
И СУДОСТРОЕНИЯ

ГОССТРОЙИЗДАТ

ЛЕНИНГРАД ■ МОСКВА ■ 1933

69:537.84

C-40-5-2



V



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Возможность слышать лектора, оратора или артиста практически необходима в той же мере, как возможность видеть происходящее на сцене или эстраде. Однако в прежнее время строители, обращая внимание на условия видимости, пренебрегали нередко условиями слышимости или так называемой акустикой зала. Пренебрежение это было почти общим явлением, и в наше время существует много зал, посещая которые можно быть заранее уверенным, что там слышно плохо. Только в последние годы, благодаря успешным изысканиям в области акустики, удалось поднять интерес к этому вопросу, доказав, что обеспечение удовлетворительной слышимости не представляется чем-то случайным или делом удачи, но ссуществимо надлежащими техническими средствами как при постройке новых, так и приспособлении существующих помещений. В настоящее время ни один строящийся театр, зал собраний или крупная аудитория не минуют специального контроля акустических условий для обеспечения надлежащей слышимости, что создает необходимость знакомства с ними не только для проектировщиков и строителей, но и для лиц, ведающих эксплуатацией подобных сооружений.

В чем же состоит секрет акустического благоустройства и является ли оно делом исключительной трудности и сложности?

Неудачные попытки прежде времени действительно окружили разрешение этого вопроса ореолом таинственности. Сюда относятся также опыты по воспроизведению акустически удачных помещений, приводившие нередко к плачевным результатам. Прошлый век был веком бесплодного искания акустической формы зала, которая так и не была установлена. Подойти вплотную к разрешению вопроса удалось лишь путем полного охвата задачи со всех сторон, с учетом всех технических средств и сознательного выбора размеров, формы и материала, обеспечивающих в совокупности акустическое благоустройство помещения.

Настоящая работа имеет целью дать в элементарном изложении практические сведения по акустике помещений, достаточные для сознательного их проектирования, устройства и эксплуатации без нарушения принципов акустического благоустройства. Изложение подразделяется на три основные темы. Первая тема знакомит с техническими качествами звука и условиями его распространения в помещениях. Вторая тема касается средств достижения и обеспечения акустического благоустройства помещений в отношении силы, ясности и красоты звука. Эти средства служат для разрешения всякого рода утилитарных задач в области акустики отдельных помещений. Однако акустическое благоустройство не может быть рассматриваемо вне условий связи данного помещения с другими в объединяющем их комплексе. Вопросам этой категории посвящена третья тема, излагающая основные приемы акустической изоляции с теоретическим их обоснованием и практическими примерами.

# ТЕХНИЧЕСКИЕ КАЧЕСТВА ЗВУКА

§ 1. ЗАДАЧИ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ. Акустика помещений имеет целью обеспечение благоприятных технических качеств звука в помещениях, где это вызывается практической потребностью. Такими качествами служат сила, ясность и красота звука. Сила звука является основным общим условием, гарантирующим осуществимость слухового ощущения. Под ясностью звуков разумеется возможность их восприятия без какого-либо искажения, причем в ряду последовательных звуков ясность характеризуется отсутствием смещения звуков, препятствующего их разделённому восприятию. Наконец, красота звука является качеством, обеспечивающим возможность получения художественных звуковых впечатлений.

Указанные качества звука не равноценны по их практическому значению. Сила звука представляет универсальное условие, подлежащее осуществлению в каждом случае. Ясность получает особую цену, когда необходимость отдельного восприятия звуков обуславливается их практическим назначением, как например при слушании речи. Красота звука, в свою очередь, получает первостепенную роль для достижения художественных звуковых восприятий. Таким образом при обеспечении во всех случаях достаточной силы звука потребность ясности выдвигается на первый план в помещениях для слушания речи, и потребность красоты звука — в помещениях, предназначенных для музыки. Нередко предъявляется требование совместного удовлетворения условий ясности и красоты звука. Этот случай не создает особых затруднений, благодаря универсальному характеру условия красоты звука, так как в понятие красоты входит в достаточной степени наличие силы и ясности звука.

Эти общие соображения выявляют потребность предварительного знакомства с явлением звука и обстоятельствами, от которых зависят его технические качества.

## ЗАДАНИЕ I

### ПОНЯТИЕ О ЗВУКЕ

§ 2. ЯВЛЕНИЕ ЗВУКА. Физическая природа явления звука имеет сходство с явлением света, так как то и другое представляют колебательное движение. Однако для распространения звука требуется наличие упругой среды, свет же может распространяться и в пустоте

или так называемом мировом эфире. Таким образом в физическом значении звук есть волнообразное состояние материи, а свет — волнообразное состояние эфира.

Физическое явление звука имеет несравненно более широкие пределы, чем физиологическое. Под этим последним разумеются лишь те случаи волнообразного состояния материи, которые воспринимаются органом слуха как звуковые. В природе имеются многие виды колебаний упругой среды, обладающие большей или меньшей частотою по сравнению с звуковыми. Пределами частоты звуковых колебаний обычно принимается частота от 15 до 20000 колебаний в секунду, причем эти пределы могут изменяться в зависимости от индивидуальных особенностей слухового аппарата наблюдателя. Звуки, применяемые в музыке, дают от 20 до 4000 колебаний в секунду. Еще ограниченнее различие в частоте колебаний звуков человеческого голоса, составляющее от 80 до 1000 колебаний в секунду при пении и значительно менее при речи.

Явление звука происходит по определенной схеме. В эту схему входят: источник звука, звукопроводящая упругая среда и воспринимающий аппарат. Источником звука служит некоторое тело, подверженное колебательному движению. Упругая среда, в которой это движение происходит, служит для распространения этих колебаний по различным направлениям и передачи их воспринимающему аппарату непосредственно или с переходом их предварительно из одной упругой среды в другую и т. д. Воспринимающим аппаратом служит орган слуха, доводящий до сознания наблюдателя раздражения слуховых нервов. Для осуществления звука необходимо наличие всех указанных элементов схемы. Без источника звука нет звуковых колебаний, без упругой среды неосуществимо распространение колебаний и, наконец, без слухового аппарата нет звукового ощущения, и, несмотря на наличие физического явления звуковых колебаний, физиологическое явление звука отсутствует.

§ 3. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ И ЛУЧИ. Звуковые колебания упругой среды возбуждаются движениями звучащего тела. В акустике помещений основную упругую звукопроводящую среду представляет воздух, в виду того, что в этой среде находится и воспринимающий звуки орган слуха. При перемещении источника звука в некотором направлении возникает упругое перемещение примыкающих частиц воздуха со сжатием с одной стороны и разрежением с другой; при обратном перемещении все явления получают обратный характер, причем вместо сжатия возникает разрежение, и наоборот. При многократных перемещениях или так называемых колебаниях чередующиеся сжатые и разреженные слои под действием основного импульса продвигаются в упругой среде с некоторою скоростью звука. Слои эти называются звуковыми волнами, причем в состав волны входит совокупность сжатого и разреженного слоев.

Если размеры звучащего тела малы по сравнению с удалениями от него слушателей, то такой источник звука приближенно может быть рассматриваем как точечный. При этом звуковые волны, не вполне оформленные в непосредственной близости от источника, по-

лучают на некотором удалении сферическую форму с центром в источнике звука. Этот случай наиболее часто встречается на практике, так как к нему относятся обычные источники звука, как голос оратора или певца, музыкальные инструменты и т. п. Лишь в отдельных, сравнительно редких случаях звуковые волны получают иную форму. Так если источником звука служит стержень значительного протяжения, волны могут иметь цилиндрическую форму. Наконец, при колебании плоскости значительных линейных размеров волна получает плоский характер.

Следует иметь в виду, что в то время как звуковые волны могут распространяться на неопределенно большие расстояния, молекулы упругой среды перемещаются лишь в порядке колебательного движения и в пределах упругих изменений. Аналогию этого явления возможно наблюдать на ряде бильярдных шаров, расположенных смежно по прямой линии. Толчок, воспринятый крайним шаром ряда, передается последовательно через все шары последнему в ряду, который приходит в движение, остальные же шары

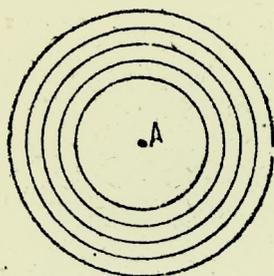


Рис. 1.  
Сферические волны.

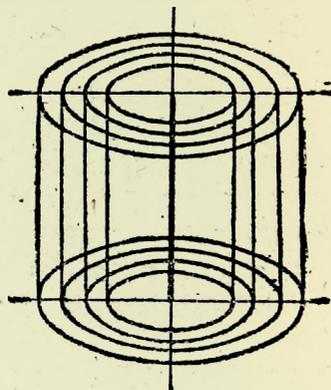


Рис. 2.  
Цилиндрические волны.

ряда, после испытанных ими упругих перемещений, незаметных для глаза, остаются в покое. В этом опыте толчок соответствует колебательному движению источника звука, неподвижные шары работают аналогично молекулам упругой среды и, наконец, последний движущийся шар представляет работу слухового аппарата. Таким образом, передача звуковых колебаний существенно различается от передвижения молекул упругой среды.

Звуковые волны представляют полную картину распространения звука. Однако, изучение тех изменений, которым они например подвергаются при встрече с препятствиями, представляет иногда весьма сложную задачу. Поэтому, вместо изучения действия целых волн, ограничиваются нередко рассмотрением их отдельных элементов при помощи так называемых звуковых лучей. Звуковым лучом называется прямая, соединяющая некоторый элемент звуковой волны с источником звука и определяющая положение этого элемента в пространстве посредством направления и длины луча. Пользуясь такими лучами для упрощенного разрешения акустических задач, нельзя, однако, забывать, что определяемые лучами отдельные элементы представляют части единой системы волн, характеризующей волнообразное состояние упругой среды.

§ 4. ВИДЫ ЗВУКА. Среди различных видов колебательного движения обращает на себя особое внимание движение, аналогичное качанию маятника, так как оно служит источником простых звуков, называемых т о н а м и. Такое движение происходит с переменной скоростью по закону перемещения проекции точки, равномерно движущейся по окружности. Такая равномерность определяется постоянной угловой скоростью движения, причем проекция движущейся точки на диаметр перемещается по закону изменения вели-

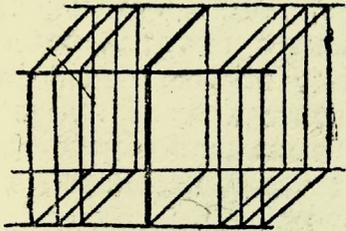
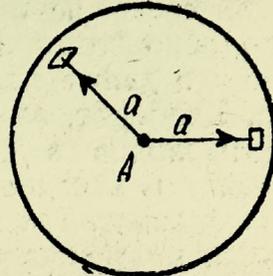


Рис. 3. Плоские волны.



2.  $a, a$  — звуковые лучи

Рис. 4.  $a, a$  — звуковые лучи.

чины косинуса угла  $\alpha$ , составляемого радиусом, проходящим через данную точку, с некоторым начальным диаметром  $xx$ . При возрастании угла  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$  скорость перемещения проекции точки по диаметру  $xx$  постепенно возрастает, достигая своего максимума при  $\alpha = 90^\circ$ , и затем убывает в обратном порядке. При дальнейшем возрастании угла в пределах от  $180$  до  $360^\circ$  такое же перемеще-

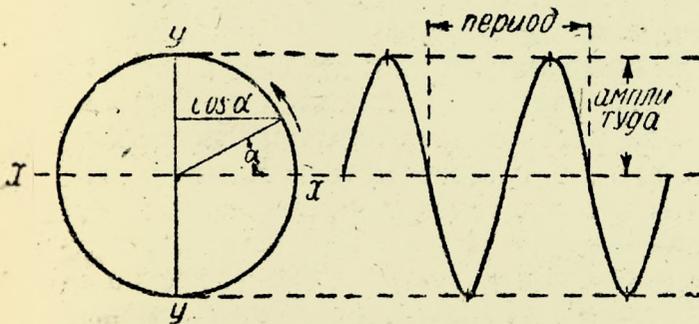


Рис. 5. Схема гармонического движения.

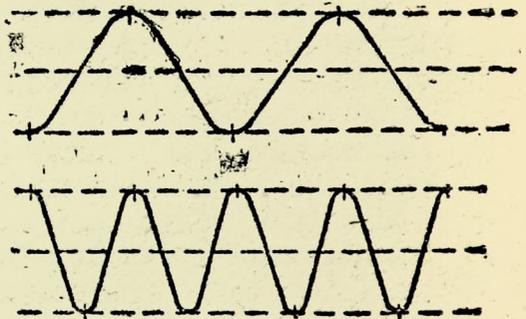


Рис. 6. Тон и его октава.

ние происходит в обратную сторону, т. е. справа налево и т. д. Такое колебательное движение точки по линии  $xx$  называется гармоническим колебанием и представляет собою основной тип колебаний всякого рода.

Возможно получить наглядное графическое изображение гармонического колебания, если откладывать по одной оси координат время, а по другой — перемещения колеблющейся точки. Такая кривая называется синусоидою. Наибольшее расстояние точек этой кривой от оси абсцисс называется амплитудой колебаний, а время, потребное для полного колебания, состоящего из двух полуволн, называется периодом колебаний.

Полученное графическое изображение простого звука помогает выяснению практического различия звуков между собою и выявлению их основных видов. Простые звуки или тона могут различаться лишь по силе и высоте. Сила звука обуславливается количеством энергии колебательного движения и выражается величиной амплитуды. Таким образом, изменение силы отражается на величине ординат кривой без изменения величины абсцисс, т. е. большее количество энергии увеличивает перемещения сжатия и разрежения в упругой среде, не изменяя продолжительности периода колебаний, подобно тому как величина размаха маятника увеличивает скорость его движения, но не изменяет продолжительности одного качания. Наоборот, высота тона связана с частотой колебаний или числом периодов в секунду. Поэтому всякое изменение высоты тона влечет изменение величины абсцисс кривой при сохранении прежних ординат. Так например, в музыкальной гамме октава данного тона, получаемая при удвоении числа колебаний в секунду, сокращает вдвое абсциссы начальной кривой.

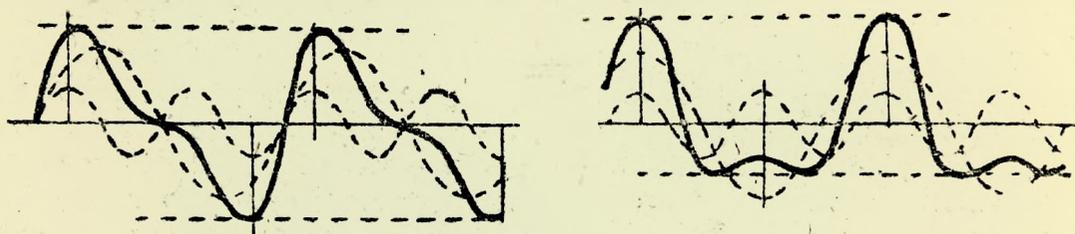


Рис. 7. Совместное действие тона и его октавы. Два варианта.

Однако простых тонов в чистом виде на практике почти не существует, и наиболее близко к ним подходят звуки камертона. Действительно, музыкальные звуки при данной высоте все же несколько различаются между собою для различных инструментов и дают возможность в большинстве случаев распознавать источник звука. Это различие вызывается присутствием в составе музыкальных звуков добавочных тонов иной высоты и силы, совокупность которых дает специальный отличительный характер или тембр основному звуку. Стало быть музыкальные звуки почти всегда являются сложными, почему при равной силе и высоте могут различаться между собою тембром. Это различие выражается соответствующим осложнением графика основной кривой.

Аналогичные условия получаются при одновременном действии нескольких простых звуков от одного или различных источников. Во всех таких случаях происходит явление, называемое интерференцией колебаний и состоящее в суммировании колебаний однородного значения. При этом сохраняется периодичность колебаний, и каждая кривая сложного звука, независимо от ее сложности и длительности периода, может быть разложена на составляющие колебания простейшего гармонического вида. Одному и тому же созвучию могут отвечать различные кривые в зависимости от фаз или условий совпадения составляющих кривых, причем разность фаз не влияет на тембр звука.

При достаточной силе составляющих тонов возможно дополни-

тельное явление, состоящее в возникновении новых тонов с числом периодов, равным разности и сумме чисел периодов составляющих тонов. Эти новые тона называются комбинационными, и число их в сложном звуке может быть весьма значительным, что вносит дополнительные изменения в характер сложного звука. Это обстоятельство чрезвычайно увеличивает разнообразие сложных музыкальных звуков.

Наряду с музыкальными звуками существует в природе громадное количество сложных звуков, не имеющих музыкальной ценности, несмотря на периодичность образующих их колебаний. Установление определенной границы между музыкальными и немusicalными звуками или так называемыми шумами — затруднительно. Главнейшим признаком шумов служит их возникновение из случайного и беспорядочного сочетания или нагромождения составляющих тонов. Поэтому шум в большинстве случаев характеризуется отсутствием ясно выраженной высоты, т. е. определяющей ее периодичности колебаний.

## ЗАДАНИЕ II

### СВОБОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА.

§ 5. СКОРОСТЬ ЗВУКА. Выше было указано (§ 3), что звуковые волны распространяются от источников звука с некоторой скоростью. Эта скорость зависит от свойств упругой среды, служащей для передачи звуков, и для звуков обычной силы является постоянной для данной среды, независимо от их силы, высоты и тембра, но в зависимости от местных физических условий. Этот закон не распространяется на звуки чрезмерной силы, возникающие при взрывах, выстрелах из тяжелых орудий и т. п., когда явление звука сопровождается весьма значительным повышением скорости, давления и температуры с распространением колебаний в характере вихревого, а не правильного волнообразного движения.

В акустике помещений основною звукопроводящею средою служит воздух. Скорость звука в воздухе составляет 332 м/сек. при температуре 0°. Эта скорость возрастает с повышением температуры, причем увеличение скорости составляет около 0,6 м на каждый градус. Повышение влажности воздуха также содействует некоторому возрастанию скорости. Учитывая эти обстоятельства, возможно принимать при расчетах в обычных условиях, что

скорость звука в воздухе равняется 340 м/сек.

Зная скорость звука, легко определить размеры звуковых волн для звуков различной высоты. Для этого надлежит лишь данную скорость разделить на число колебаний в секунду. Таким образом для звуков человеческого голоса (§ 2) длина звуковой волны, измеряя совокупность сжатого и разреженного слоя, составляет от 4,25 м до 0,34 м, причем для звуков средней высоты, наиболее часто встречающихся, длина колеблется около 1 м. Это обстоятельство

устанавливает существенное различие между условиями распространения звуковых и световых волн. Свет распространяется со скоростью 300000 километров в секунду, а размеры световых волн выражаются малыми долями миллиметра. Таким образом, принимая распространение света мгновенным, нельзя не считаться с относительно малой скоростью распространения звука. Это же различие играет существенную практическую роль при встрече волн с препятствиями, о чем речь будет ниже.

§ 6. СИЛА ЗВУКА. Физическое явление звука получает практическую ценность только тогда, когда оно сопровождается соответствующим физиологическим результатом. Для возможности слухового восприятия нужны три условия: надлежащая частота, длительность и амплитуда. О потребной частоте колебаний для получения звука было указано выше (§ 2). Длительность звука связана с количеством воспринимаемых колебаний, причем пределом малой длительности для низких тонов является период времени, потребный для 2—3 колебаний, для более же высоких тонов требуется около 10 колебаний и выше. Наконец, практическим пределом силы слухового ощущения служит по Рэлею сила звука с амплитудой звуковых волн у барабанной перепонки в  $8 \times 10^{-8}$  см. Опыт убеждает нас в существовании такого порога слухового ощущения, причем величина его зависит от конкретных условий и восприимчивости наблюдателя. Сон, утомление, болезнь, невнимательность и т. п. понижают восприимчивость и соответственно повышают величину слухового порога, почему эта величина носит в значительной степени индивидуальный характер.

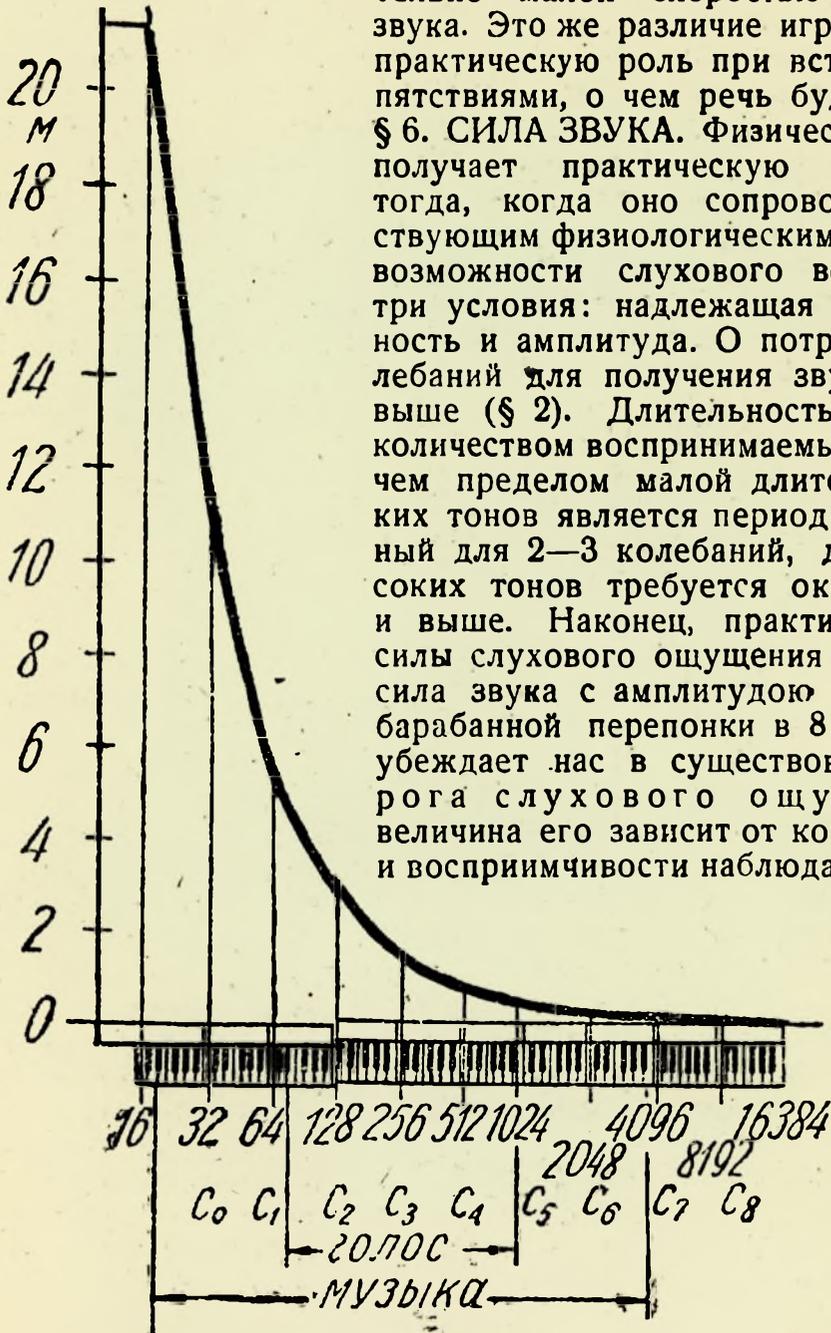


Рис. 8. Длина звуковых волн.

Связь между силой ощущения определяется психо-физическим законом Вебера-Фехнера, который гласит, что

ощущение пропорционально логарифму раздражения.

Этот закон обосновывает два практических вывода:

- 1) сила ощущения изменяется медленнее силы раздражения и
- 2) слабые раздражения легче различаются, чем сильные, так как разность логарифмов малых величин относительно более велика. Последний вывод объясняет нашу восприимчивость к слабым звукам, близким к слуховому порогу, и в то же время трудность определения относительной силы сильных звуков.

Сила звука в источнике зависит от массы звучащего тела и амплитуды его колебания, т. е. от количества энергии, приложенной для приведения тела в колебательное движение. С практической точки зрения важна не энергия источника, а количество энергии, воспринимаемое слуховым аппаратом. При свободном распространении звука закон изменения его силы с удалением от источника зависит от формы звуковых волн и может быть определен на основе сохранения постоянства звуковой энергии, так как в пределах обычных удалений (до 500 м) потеря силы на прохождение среды может быть не учитываема.

При сферических волнах поверхности двух волн на различных расстояниях от источника относятся между собою как квадраты радиусов, почему количество звуковой энергии или ее плотность на кв. единицу поверхности волны обратно пропорциональны квадрату удаления от источника звука. Таким образом на удвоенном удалении сила звука сокращается вчетверо, на утроенном в девять раз и т. д.

Называя  $I_1$  силу звука на расстоянии единицы длины от источника и  $I_r$  — на расстоянии  $r$  единиц, общий закон изменения силы на расстоянии

$$I_r = I_1 r^{-z}$$

где величина  $z$  зависит от формы волн и для сферических волн  $z=2$ , для цилиндрических  $z=1$ , а для плоских  $z=0$ .

Гораздо большее практическое значение имеет изменение интенсивности слухового ощущения, которую для краткости можно назвать интенсивностью звука. Для определения величины таковой необходимо учитывать закон Вебера-Фехнера, гласящий, что интенсивность пропорциональна логарифму силы.

За единицу интенсивности принимается б е л, отвечающий интенсивности звука, в 10 раз сильнее слухового порога. Практической единицей для измерения интенсивности служит обыкновенно децибел, т. е. величина, в 10 раз меньшая. Эта зависимость выражается формулой:

$$N = 10 \log_{10} \frac{I_r}{I_0}$$

где  $N$  — число децибелов,  $I_r$  — сила звука и  $I_0$  — сила слухового порога. Принимая  $I_0$  за единицу, получаем для звуков различной силы:

Сила звука $\frac{I_r}{I_0}$	Интенсивность
10	10 децибелов
100	20
1000	30
1000000	60 децибелов

Так например при сокращении силы звука в 1000 раз интенсивность его уменьшается на 30 децибелов.

Практическая величина интенсивности колеблется в пределах от 30 до 70 децибелов. Звуки слабее 30 децибелов имеют малое практическое значение и при наличии более сильных звуков могут быть мало заметными. В зависимости от интенсивности вообще можно оставлять без внимания звуки слабее основных на 30—40 децибелов. Так, при интенсивности звуков человеческой речи от 40 до 50 децибелов звуки слабее 10—20 децибелов являются вполне безвредными.

Наблюдаемая интенсивность шума в децибелах от различных источников приведена в следующей таблице:

Наименование источника	Число децибелов
Порог болевого ощущения . . . . .	130
Котельные работы, скелпка . . . . .	120
Мотор и пропеллер аэроплана на расстоянии 6 м . . . . .	110
Самый громкий автомобильный гудок на расстоянии 8 м . . . . .	100
Самый громкий уличный шум . . . . .	80
Обычный автомобильный гудок . . . . .	72
Городской трамвай . . . . .	70
Автотранспорт, шумное собрание . . . . .	65
Оживленный разговор . . . . .	60
Пассажирский автомобиль . . . . .	55
Слабый уличный шум, сильный шум в жилье . . . . .	45
Спокойная улица без транспорта . . . . .	30
Слабый шум в жилье . . . . .	22
Спокойный сад . . . . .	20
Шелест листьев при слабом ветре, тихий шопот . . . . .	10
Порог слухового ощущения . . . . .	0

§ 7. СИЛА ГОЛОСА. В зависимости от технических качеств источника звука могут происходить отклонения от общего порядка распространения звуковой энергии. К таким источникам между прочим относится человеческий голос, количество и распространение энергии которого имеют существенное практическое значение. Опыт убеждает, что в направлении против оратора можно слышать его на большем расстоянии, чем сбоку, а сбоку — на большем, чем сзади. Для свободного распространения звуков голоса в открытом месте в тихую погоду, по опытам Орта и других исследователей, могут быть приняты предельные удаления в 30, 20 и 10 м, причем границей для промежуточных направлений может служить окруж-

ность, описанная радиусом в 20 м, с расположением оратора в удалении от центра на половину радиуса и лицом к центру. Это практическое правило может служить для приближенного определения границ равной слышимости при любой величине площади для слушателей. Так, при сокращении площади вчетверо указанные удаления сократятся в два раза и будут соответственно равны 15, 10 и 5 м.

Другим условием, изменяющим характер распространения звука, служит наличие препятствий, ограничивающих свободу распространения. Так например боковые ограничения способствуют увеличению расстояния, на котором можно слышать звуки в свободном направлении. Опытном установлена возможность передачи звуков по трубам на весьма большие расстояния, примером чего могут служить переговорные трубы, устраиваемые длиной до 100 м. Подобные условия создают переходную ступень к распространению звука в замкнутом пространстве.

§ 8. РОЛЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ. Выше уже было отмечено (§ 4) влияние интерференции на состав звуков. То же условие играет существенную роль и при распространении звуков. Эта роль может быть учтена при рассмотрении конкретных случаев.

При одновременном действии двух простых тонов равной силы и высоты от различных источников существенное значение имеет длина пути звуковых лучей. Если разница расстояний источников звука от наблюдателя равна четному числу полуволн, то сжатые слои одной системы волн должны совпадать с такими же слоями

другой системы; энергия сжатия и разрежения воздуха суммируется и вызывает усиление звука. Если указанная разница составляет нечетное число полуволн, то сжатые слои одной системы совпадают с разреженными другой: ординаты равнодействующей кривой колебаний как разность составляющих становятся равны нулю, и звук погашается. Наконец, в промежуточных условиях результирующая сила звука колеблется между вышеуказанными пределами, приближаясь к тому или другому в зависимости от разницы в длине звуковых лучей. Возможность взаимного уничтожения двух звуков доказывается опытным путем на специальном приборе, описанном в курсах физической акустики.

Явление интерференции получает иную форму при совокупности звуков различной высоты, т. е. при различной длине составляющих волн. В виду различного числа периодов составляющих звуков возникает вопрос о числе периодов сложного звука.

Представим совокупное действие простого тона и его октавы, т. е. тона с удвоенным числом колебаний в секунду. При этом колебания составляющих тонов совпадают через одно колебание более высокого тона (рис. 7). Колебания осложняются, но число периодов сложного тона будет равно их числу для основного тона, а

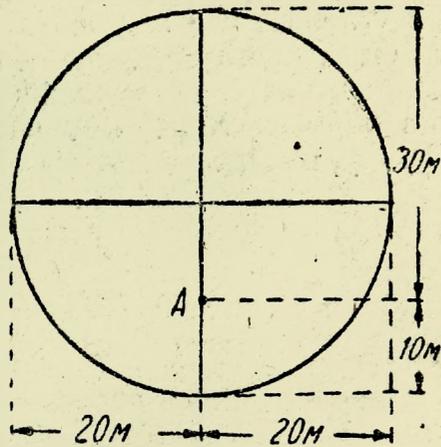


Рис. 9. Предельное удаление от оратора в открытом пространстве

влияние октавы выразится частичным усилением амплитуды колебаний основного тона.

Иная картина получается при совокупном действии двух тонов с небольшою разницей в числе колебаний, например 200 и 210 колебаний в секунду. В этом случае 20 полных колебаний первого тона совпадают по времени с 21 колебанием второго, причем длина периодов сложного звука составит 0,1 секунды.

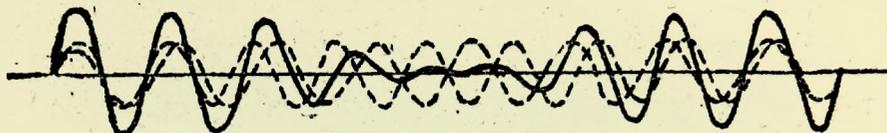


Рис. 10. Происхождение биений.

В общем случае при действии двух тонов с числом колебаний  $m$  и  $n$  в секунду, где  $m < n$ , число периодов сложного звука может быть определено следующим образом. В одном периоде число колебаний второго тона должно быть на единицу более числа колебаний первого тона. Обозначая через  $q$  искомое число периодов в секунду, имеем:

$$\frac{n}{q} = \frac{m}{q} + 1,$$

откуда

$$q = n - m,$$

т. е.

число периодов сложного звука равно разности чисел периодов составляющих тонов.

Таким образом число периодов сложного звука может быть очень ограниченным и потому ощутимым для слуха, благодаря наличию в каждом периоде своего максимума и минимума силы звука. Это явление называется *дрожанием*, а моменты усиления звука — *биениями*, число которых может изменяться в широких пределах. Если это число не превышает 6 в секунду, то биение воспринимаются как плавное чередование нарастаний и падений силы звука и производят не лишнее красоты впечатление *в и б р а ц и*. При возрастании этого числа ощущение становится неприятным, особенно в пределах 20 — 30 периодов в секунду, приобретая характер треска и шероховатостей при низких тонах и дребезжания при высоких. С дальнейшим увеличением числа биений неприятность ощущения ослабевает и прекращается совершенно, когда это число возрастает до 120 и выше.

Таким образом биения являются фактором, нарушающим гладкость и ровность созвучия. Отсюда возникает понятие о *консонансе* и *диссонансе*. Гельмгольц определил консонанс как длительное непрерывное слуховое ощущение, а диссонанс — как прерывистое. Чистый консонанс возникает при полном отсутствии биений, а диссонанс отвечает созвучию при отчетливых биениях.

Другое практическое значение интерференции состоит в ее влиянии на силу коллективных источников звука. Звуковое действие хо-

ра и оркестра неизбежно ослабляется благодаря интерференции при различных удалениях отдельных источников звука от наблюдателя. Поэтому совокупное действие звуков ниже их суммы и практическая разница возрастает с увеличением числа источников.

§ 9. ЯСНОСТЬ И КРАСОТА ЗВУКА. Что касается остальных технических качеств звука — ясности и красоты его, то в условии свободного распространения звука они являются обеспеченными в большинстве случаев.

Ясность звуков гарантируется их силою. Нарушение ясности может быть вызываемо лишь совокупным действием звуков самостоятельного значения, совпадающих по времени полностью или частично. При этом связь между силою и ясностью звуков выражается в том, что относительно слабые звуки не могут вредить ясности, разумея под слабыми звуками такие, интенсивность ощущения которых менее интенсивности основного звука на 30—40 децибелов (§ 6).

Ясность речи, по наблюдениям Кнудсена, может быть признана вполне удовлетворительной, если слушатель воспринимает правильно не менее 85% слогов, и практически приемлемой при 75%.

Красота звуков может быть нарушена явлением интерференции в форме неприятных для слуха биений (§ 8). Однако, это обстоятельство относится лишь к тем звукам, которые по своей природе не могут быть отнесены к категориям красивых. Созвучия же, отвечающие требованиям консонанса, могут диссонировать лишь при неблагоприятных сочетаниях с другими созвучиями.

Свободное распространение звуков в чистом виде в практических условиях почти недостижимо, так как даже в открытом пространстве приходится считаться с наличием некоторых препятствий в форме земной или водной поверхности и т. п. Поэтому в действительности распространение звука уклоняется от свободного в большей или меньшей степени.

### ЗАДАНИЕ III

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИИ

### § 10. ВЛИЯНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА.

Переходя к условиям распространения звука в замкнутом пространстве, надлежит рассмотреть общий вопрос, как может влиять препятствие на характер движения звуковых волн. На основании закона изменения силы звука с удалением от источника эта сила падает на некотором удалении ниже порога слухового ощущения. Если препятствие расположено на большем удалении, чем указанное, то наличие препятствия не влияет на распространение звука. Действительно, звуки малой силы, как например речь вполголоса, распространяются в помещении на условиях, близких к свободному распространению, потому что сила их падает ниже слухового порога, не достигая ограничивающих помещение поверхностей, и звук погашается, рассеиваясь в воздушном объеме.

При значительной силе звука или при малом удалении препятствия погашение звука путем рассеяния его энергии становится

невозможным и должно происходить иным путем. Этот путь зависит от процесса встречи звуковой волны с препятствием к ее продвижению. Процесс этот может протекать различно в зависимости от физических свойств материалов препятствия. При пористом материале часть звуковой энергии проникает через толщу препятствия в своей основной форме воздушных колебаний и теряется безвозвратно; другая часть может переходить в материальные колебания, а также в тепло и иные формы энергии; наконец, некоторая часть энергии колебаний возвращается в помещение путем отражения от поверхности препятствия. При отсутствии воздушных пор в материале препятствия, непосредственная потеря части энергии в форме воздушных колебаний может отсутствовать. Переход в материальные колебания происходит в двух основных формах: в форме колебаний сжатия и растяжения, когда поступательное волнообразное движение переходит из воздушной среды в материальную, подчиняясь при этом закону преломления, или же в форме колебаний изгиба. Последний случай возникает при малой толщине и массе препятствий и при значительной его упругости. Под действием упругих колебаний препятствие

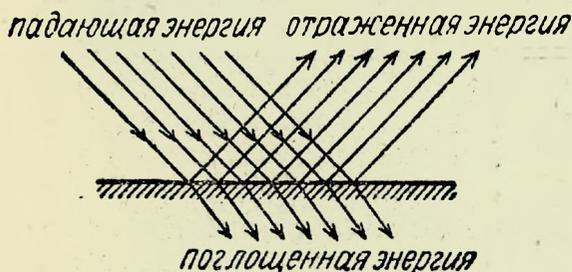


Рис. 11. Влияние препятствий на распространение звука.

начинает вибрировать, как упругая пластинка, передавая свои колебания примыкающим слоям воздуха по ту и другую сторону препятствия. В этих условиях препятствие называется резонирующим и является вторичным источником звука.

Таким образом при всякой встрече с препятствием часть звуковой энергии теряется путем непосредственного проникания или путем перехода в другие формы и виды энергии. Существенно важно, что после встречи в помещение возвращается лишь некоторая часть энергии, которая, распространяясь до встречи с новым препятствием, претерпевает новую потерю и т. д. до момента падения силы звука ниже предела слухового порога. Стало быть

в замкнутом пространстве погашение звука происходит не путем рассеяния энергии, а путем последовательных ее потерь при встрече с препятствиями.

Часть энергии, утраченная при встрече с препятствием, называется поглощенной, а возвращающаяся в помещение после встречи — отраженной.

Отражающее действие препятствий составляет другую не менее важную роль их в акустическом отношении. Непоглощенная часть энергии вновь распространяется в помещении, что при последовательных отражениях вызывает одновременное действие многих систем воздушных волн в различных направлениях. Совокупность этих систем может в значительной степени увеличивать количество энер-

гии на единицу объема и стало быть силу звука, поскольку этому не препятствует неблагоприятное действие интерференции (§ 8).

§ 11. ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА. Под поглощением звука разумеется совокупность явлений, вызывающих потерю звуковой энергии при встрече с препятствием. Сюда относятся:

1) проницаемость препятствия для воздушных волн благодаря пористости;

2) трансформация воздушных колебаний в материальные колебания сжатия и растяжения с рассеиванием таковых в материальной среде препятствия, а иногда с обратным переходом их в воздушные по другую сторону препятствия;

3) трансформация в тепло и иные формы энергии;

4) трансформация в материальные колебания изгиба, если препятствие обладает резонирующей способностью (§ 10).

Первые три явления зависят полностью от свойств материала препятствия и потому могут быть учитываемы совместно, влияние же резонанса гораздо труднее поддается учету, так как оно определяется не только свойствами материала, но и типом конструкции препятствия. В качестве общего соображения возможно лишь указать, что

наличие резонанса увеличивает поглощающую способность препятствия.

12693  
— Практическая роль поглощения звука состоит в его влиянии на условия погашения звука в помещении после прекращения действия источника звука. Действительно, чем значительнее поглощение при встрече с препятствием, тем меньшее число последовательных поглощений требуется для ослабления звука до предела слухового ощущения и тем короче период погашения звука. Однако продолжительность этого периода зависит не только от величины поглощения, но и от размеров помещения, так как с возрастанием их удлиняются пути между поглощающими препятствиями и увеличиваются промежутки времени между последовательными поглощениями. Поэтому сокращение указанного периода в крупном помещении требует применения материалов с более сильным поглощением, чем в помещениях ограниченных размеров.

Поглощение звука зависит от рода материала, силы звука и высоты тона. Основные строительные материалы — камни, металлы и даже дерево — обладают ограниченным поглощением, которое значительно возрастает для материалов отделочного характера, по преимуществу пористых, как войлок, ковры, ткани и пр. Для всех видов материалов поглощение возрастает пропорционально увеличению силы звука, и таким образом для данного материала и звука данной высоты величина поглощения может быть выражена в процентах силы звука. Зависимость поглощения от высоты звука может служить в отдельных случаях причиной искажения звуков, так как составляющие тона сложного звука при их различной высоте могут после поглощения изменять свою относительную силу. Это обстоятельство влияет иногда на точность передачи звуков и вредит красоте их, отражаясь не только на силе, но и на качестве звука.

§ 12. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА. Выдающаяся роль поглощения звука послужила причиной для установления специального метода сравнительной оценки поглощающих свойств материалов. Для возможности сравнения необходимо устранить влияние высоты звука, производя наблюдения над поглощением звуков равной высоты, а также установить единицу измерения. За такую единицу, называемую иногда сабином, принят квадратный метр поверхности полного поглощения, которая может быть легко осуществлена в помещении в виде открытого оконного проема, так как звуковая энергия, падающая на такую поверхность, является полностью и безвозвратно потерянной. При сопоставлении с такою единицею поглощающие свойства поверхности из любого материала могут быть выражены в процентах полного поглощения. Для полноты сравнения был принят в основу звук определенной высоты, именно, среднее до, имеющее 512 колебаний в секунду (рис. 8). Процентная величина поглощения для тона данной высоты называется коэффициентом поглощения звука.

Практическая ценность таких коэффициентов определяется тем, что являясь точными для звуков определенной высоты, они в то же время близки к истинным и для других наиболее употребительных звуков средней высоты. Величины коэффициентов определяются на 1 кв. м поверхности или же на один предмет для наиболее обычных объектов поглощения.

В таблице на стр. 19 даны коэффициенты поглощения для наиболее часто применяемых материалов и предметов.

Эта таблица служит для определения средней величины поглощения, необходимой при акустических расчетах. Однако нельзя забывать, что приведенные величины коэффициентов подвергаются изменениям для тонов различной высоты. Для основных строительных материалов, благодаря малым коэффициентам поглощения, эти изменения вообще невелики и не оказывают существенного влияния на общий акустический результат. Поэтому более близкого знакомства в этом отношении заслуживают лишь сильно поглощающие материалы и предметы.

Поглощение войлока зависит не только от высоты тона, но и от толщины войлочного слоя. На рис. 12 изображены кривые поглощения для тонов от 64 до 4096 колебаний в секунду при средней величине в 512 колебаний и при толщине слоев от 12 до 75 мм (от полудюйма до 3 дюймов). По графику можно видеть, что низкие тона поглощаются войлоком менее, чем средние и высокие, но что поглощение низких тонов возрастает быстро с увеличением толщины слоя и приблизительно пропорционально этой толщине; что изменение толщины слоя почти не влияет на поглощение высоких тонов; наконец, что максимум поглощения при малой толщине слоя наблюдается для высоких тонов, но с возрастанием толщины слоя возрастает и передвигается в сторону средних тонов. Поглощение в данном случае изменяется по сложному закону, который нельзя игнорировать.

Поглощение подушек для сидения, равным образом, не лишено практического интереса, так как определяет их роль в незаполненном людьми помещении, причем возрастание поглощения

### Коэффициенты поглощения на 1 кв. м поверхности

Наименование материалов	Коэффициент поглощения
Мрамор . . . . .	0,010
Бетон . . . . .	0,015
Штукатурка по кирпичу . . . . .	0,025
Кирпичная кладка на цементе . . . . .	0,025
Стекло . . . . .	0,027
Линолеум . . . . .	0,030
Лакированное дерево . . . . .	0,030
Штукатурка по проволочной сетке . . . . .	0,033
Штукатурка по дереву . . . . .	0,034
Деревянная обшивка . . . . .	0,061—0,100
Пробковые плиты . . . . .	0,15
Занавесы . . . . .	0,23
Масляные картины в рама . . . . .	0,28
Ковры . . . . .	0,20—0,29
Отверстие сцены . . . . .	0,25—0,40
Войлок, в зависимости от толщины . . . . .	0,16—0,78
Драпировки со складками . . . . .	0,50—1,00
Сидящая публика в зале собраний . . . . .	0,96
<b>Специальные поглотители</b>	
Целотекс различных марок . . . . .	0,25—0,70
Экспанзит . . . . .	0,30
Инсулит . . . . .	0,31
Акустолит . . . . .	0,36
Флакслинум . . . . .	0,61
<b>Поглощение звука отдельными предметами</b>	
Один слушатель среди других . . . . .	0,44
Мужчина отдельно . . . . .	0,48
Женщина отдельно . . . . .	0,54
Деревянная скамья на одно место . . . . .	0,008
Деревянный стул . . . . .	0,017
Мягкий стул . . . . .	0,09—0,23
Кожаная подушка . . . . .	0,21
Кресло, обитое кожей на волосе . . . . .	0,28
Рояль . . . . .	0,60
Куб. м, комнатных растений . . . . .	0,11

приближает акустические условия пустого помещения к условиям заполненного. На рис. 13 кривая 1 отвечает поглощению деревянного стула, которое изменяется в ограниченных размерах, постепенно возрастая с повышением тона от 0,014 до 0,017 при средней высоте и до 0,021 при высоких тонах. Кривые 2—5 отвечают поглощению различных типов подушек. Подушки из растительного волокна, крытые парусиной, дают кривую 2; остальные кривые отвечают волосяным подушкам, крытым парусиной и кожей, и,

наконец, войлочным подушкам. Для всех типов усматривается падение поглощения при низких и высоких тонах с максимумом между средними и высокими.

Существенно важно изменение коэффициента поглощения слушателей: коэффициент постепенно возрастает от 0,16 для нижнего до, достигает 0,44 для среднего и, наконец, 0,46 для высокого. Связь между поглощением отдельного слушателя и сидящей публики определяется плотностью размещения публики. Так как площадь, отводимая для одного слушателя, составляет около 0,45 кв. м, то на 1 кв. м приходится около 2,2 слушателей, совокупное по-

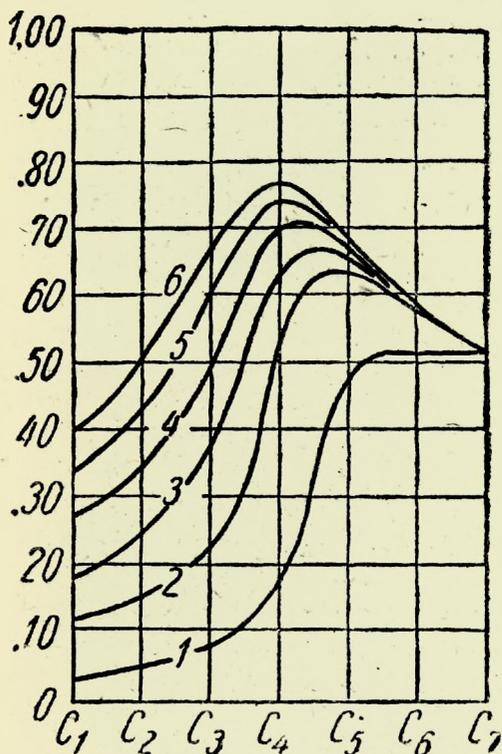


Рис. 12. Поглощение войлока толщиной от 12 до 75 мм.

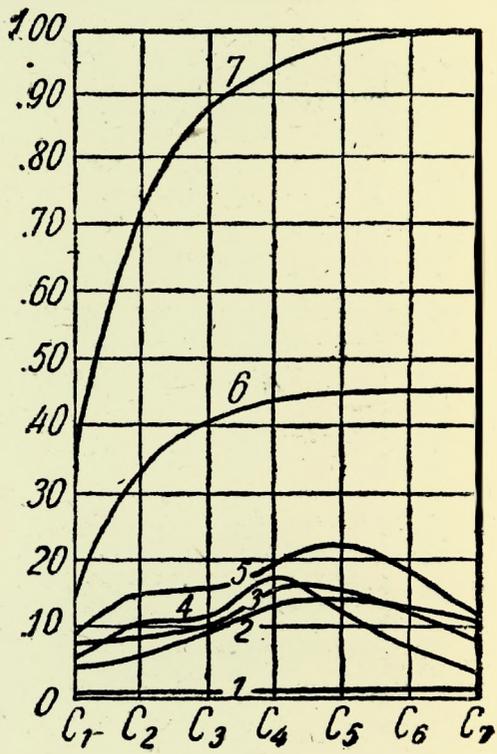


Рис. 13. 1 — поглощение венских стульев; 2—5 то же подушек для сидящих; 6 то же — одного слушателя; 7 — то же 1 кв. м площади, занятой слушателями.

глощение которых составляет 0,96 для тонов средней высоты, что и принимается за коэффициент поглощения одного кв. метра пола, занятого сидящей публикой. Однако, в виду различной плотности размещения публики, практичнее определять совокупное поглощение слушателей по их числу, а не по занимаемой ими площади. В связи с указанным обе кривые имеют аналогичный характер, отмечающий значительное возрастание поглощения для верхней половины тонов. Этим объясняется, между прочим, почему при равной приблизительно силе звука скрипки и виолончели в пустом помещении требуется нередко две скрипки против одной виолончели при обилии публики.

ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА

§ 13. ПРАКТИЧЕСКАЯ РОЛЬ ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА. По сравнению с поглощением звука отражение представляет не менее важный фактор в условиях распространения звука в помещении. Этот последний процесс при возникновении звука в его источнике выражается в удалении звуковых волн от источника навстречу препятствиям с потерей силы при сферических волнах обратно пропорционально квадрату удаления. После встречи с препятствием отраженная часть энергии резко меняет свое направление, удаляясь от первого препятствия до встречи со следующим и т. д. При этом движении возникают многие системы отраженных волн, составляющие характерное отличие распространения звука в замкнутом пространстве. Благодаря отражениям и в зависимости от их силы, количество звуковой энергии возрастает, в связи с чем

сила звука в помещении может значительно превысить таковую при распространении звука в открытом пространстве.

Практическая возможность увеличения силы звука помощью отражений позволяет осуществлять в помещениях такие удаления от источника звука, которые были бы чрезмерны в условиях открытого пространства. Это условие особенно ценно для ограниченной силы человеческого голоса. Что касается равномерности распределения звука, то таковая зависит от количества последовательных отражений. В помещениях обычных размеров число отражений определяется десятками и даже сотнями, что в благоприятных условиях делает распределение звуковой энергии практически равномерным, за исключением части объема в непосредственной близости к источнику звука. Под практической равномерностью разумеется такая, благодаря которой в различных частях помещения одинаково хорошо слышно, что является существенным требованием акустического благоустройства.

Отражения влияют существенно не только на силу звука, но и на процесс звукового действия, в чем можно наглядно убедиться при помощи графика изменения силы звука. Этот график отличается характерными особенностями.

Откладывая по оси абсцисс некоторые промежутки времени, а по соответствующим ординатам относительную силу звука в указанные промежутки, легко получить наглядное изображение изменения этой силы. При распространении звука постоянной силы в открытом пространстве график получает вид прямоугольника. В замкнутом пространстве при наличии отражений график образуется суммированием нескольких прямоугольников в зависимости от числа отражений, достигающих слушателя и обладающих силою выше слухового порога. Эти прямоугольники имеют равные абсциссы, так как продолжительность действия отражений равна продолжительности звука, и постепенно убывающие ординаты в соответствии с падением силы

звука за счет рассеяния и поглощения. Расположение этих прямоугольников по оси абсцисс определяется временем их опоздания.

Сводный график показывает, что в замкнутом пространстве звук не только возрастает в силе, но что изменение его силы происходит по своеобразному закону. Полной силы звук достигает не сразу, а постепенно, причем возрастание идет вначале быстро, а затем замедляется. Возрастание звука происходит тем продолжительнее, чем значительнее промежутки времени между отдельными отражениями, т. е. чем крупнее размеры помещения. Возрастание прекращается в момент прекращения основного звука или когда отражения становятся слабее слухового порога. Период падения силы начинается с момента прекращения основного звука и протекает аналогично возрастанию, т. е. сперва быстро, с последующим замедлением. При большом числе отражений график приближается по

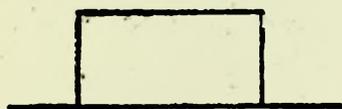


Рис. 14. Схема звучания в открытом пространстве.

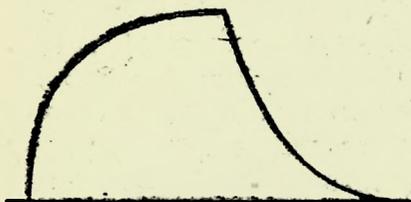


Рис. 16. Схемы звучаний при большом числе отражений.

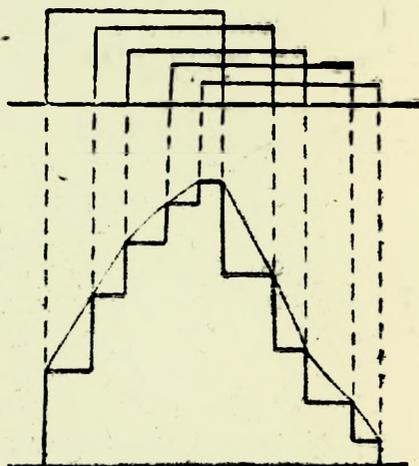


Рис. 15. Схема звучания в помещении.

форме к сочетанию двух кривых, пересекающихся в момент прекращения основного звука.

Из рассмотрения графика видно, что

короткие звуки часто не достигают полной силы, особенно в крупных помещениях.

Это обстоятельство учитывается опытными ораторами, соответственно замедляющими темп своей речи.

Таким образом благодаря отражениям в помещении возникают многие системы звуковых волн, совокупное движение которых подчиняется закону интерференции, причем отдельные звуки могут изменять свою силу в ту или иную сторону. Особенно ярко выражается явление интерференции при звуках большой продолжительности, когда волнообразное движение приобретает так сказать стационарный характер. Любопытный пример распределения энергии в этих условиях представляет прямоугольное помещение, крытое цилиндрическим сводом с центром кривизны на уровне пола и с расположением источника звука в центре помещения. Кривые определяют в

плане районы равной силы звука, начиная от так называемых мертвых нулевых точек до районов наибольшей силы. В этом случае неравномерность распределения силы звука является результатом

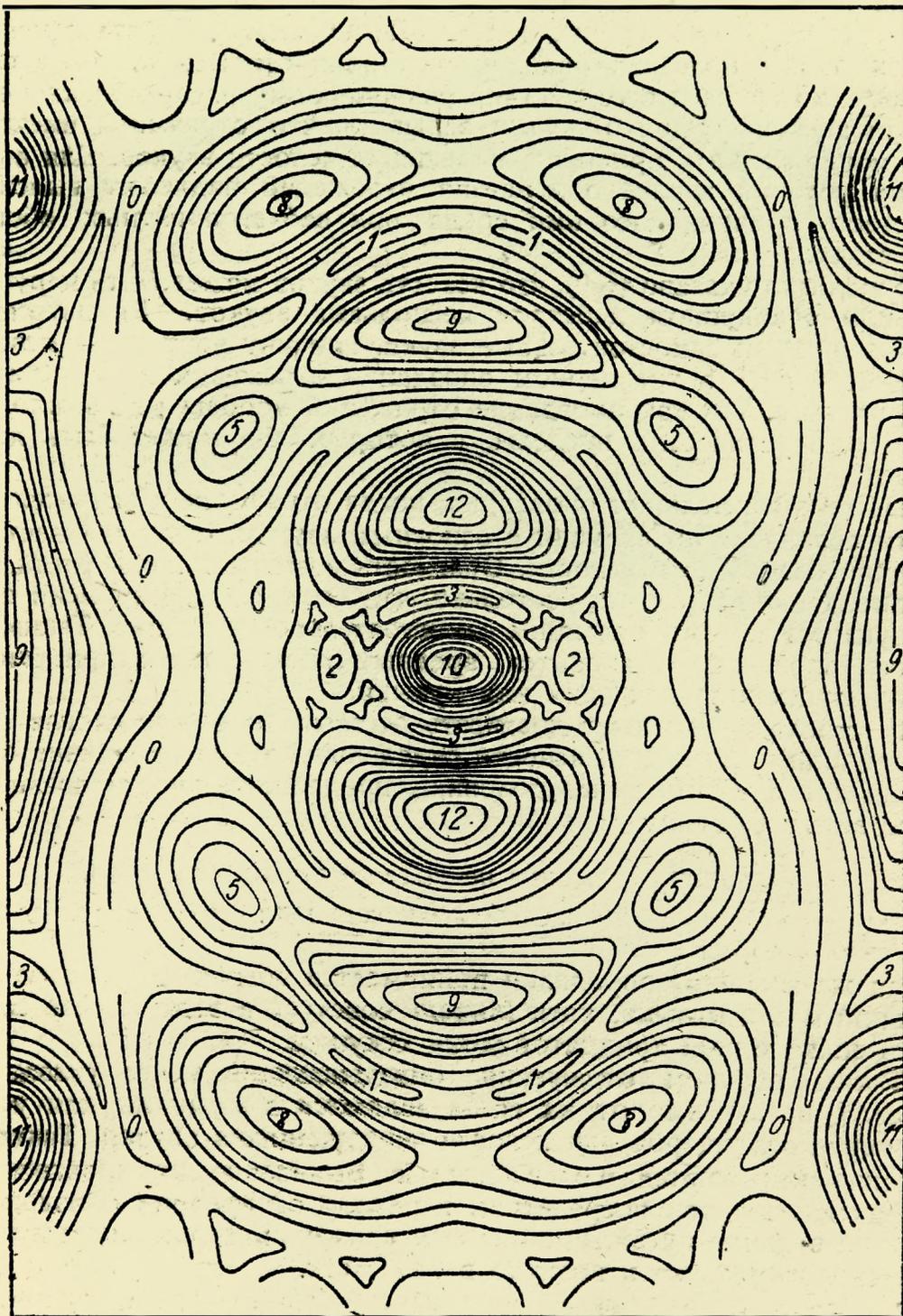


Рис. 17. Пример распределения звуковой энергии.

не только действия интерференции, но и неблагоприятной формы помещения.

В обычных условиях влияние интерференции отражений менее заметно, а при быстрой смене звуков различной высоты становится

трудно уловимым, благодаря неизбежному при этом перемещению районов действия интерференции. Поэтому практическое значение интерференции отражений вообще невелико и она не играет в акустике помещений существенной роли.

§ 14. ПОЛЕЗНЫЕ И ВРЕДНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ. Согласно вышеизложенному полезная практическая роль отражений выражается в усилении звука и в содействии равномерному распределению звуковой энергии. Однако нельзя забывать, что отражения вместе с тем могут служить причиной нарушения ясности звуков. Для выяснения условий вредного действия отражений надлежит выяснить сущность причиняемого ими вреда при неблагоприятных обстоятельствах.

Уже было указано (§ 9), что ясность звуков может быть нарушаема при совокупном действии нескольких звуков. Рассматривая отражения как самостоятельные звуки, причину нарушения ясности следует искать в чрезмерном опоздании отражений при достаточной их силе. Так как опоздание отражений вообще неизбежно, необходимо установить пределы, в которых оно может быть допущено.

При незначительном опоздании, когда отражение в значительной части совпадает по времени с основным звуком, оно усиливает последний без вреда и ясности. Опасность возникает лишь тогда, когда опоздание возрастает настолько, что совпадает по времени с последующим звуком, имеющим самостоятельное значение. Таким образом опоздание становится вредным прежде всего при быстро чередующихся звуках речи или музыки.

Быстрота речи может достигать от пяти до десяти слогов в секунду. Для обеспечения ясности отдельных звуков опоздание отражения должно быть менее половины продолжительности последующего звука. Поэтому

опоздание отражения не должно превышать одной двадцатой доли секунды.

Такая же величина опоздания принимается обычно в качестве предельной и для музыки, хотя Михель советует в этом случае сокращать ее до одной тридцатой доли секунды.

Таким образом отражения, опаздывающие менее указанного предела, независимо от их силы являются полезными для усиления звука без ущерба для ясности чередующихся звуков. Такие отражения называются полезными. Выявление их производится графическим путем посредством перехода от времени опоздания к разнице в длине путей, пройденных прямым и отраженным лучами. При скорости звука в воздухе в 340 м/сек.

отраженный луч не должен превосходить длину прямого более чем на 17 м.

или согласно предложению Михеля для музыки — не более, чем на 12 м.

При дальнейшем возрастании опоздания отражения становятся

вредными, если обладают достаточной для этого силой. Явление опоздания выражается при этом в двух характерных формах. Если опоздание отражения менее продолжительности основного звука, то отражение частично совпадает по времени с этим звуком и вызывает его продление. При большей величине опоздания между основным звуком и отражением получается некоторый промежуток времени, и отражение воспринимается как отдельный звук, являющийся повторением основного. В этой форме явление называется эхом, которое может быть по местным условиям одно- и многократным.

Явление эха представляет собою наиболее грубый акустический недостаток помещения. Возможность образования эха возрастает с увеличением размеров помещения и с сокращением продолжительности звуков. Как показывают опыты, промежуток времени между основным звуком и его повторением должен быть не менее 0,055 —

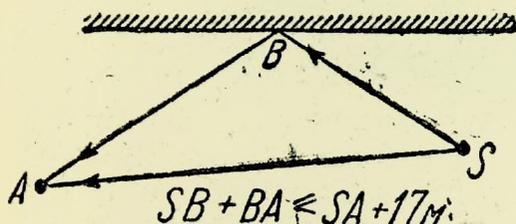


Рис. 18. Предельное опоздание отражений.

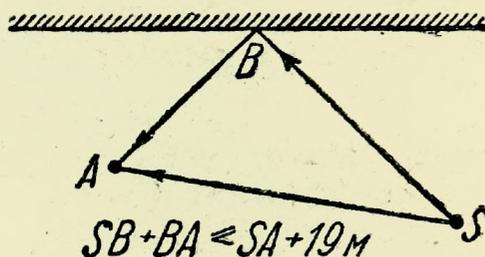


Рис. 19. Условие отсутствия эха.

0,066 секунды, что отвечает разнице в длине отраженного и прямого лучей от 19 до 23 м. Вторым условием образования эха служит достаточная сила отражения. Таким образом

к вредным отражениям относятся только те опаздывающие отражения, которые обладают достаточную силу по отношению к силе основного звука.

Для приближенного разрешения вопроса об относительной силе вредных отражений возможно руководствоваться данными Орта, который установил предельное удаление слушателя от оратора в открытом пространстве в 30 м, а удаление, на котором звуки речи теряют практическое значение и могут быть игнорируемы, — в 60 м. Относительная сила звуков во втором случае составляет одну четверть силы первоначальных. Это положение, как практически обоснованное, дает руководящие указания в тех случаях, когда не имеется в распоряжении более совершенных приемов. Согласно этому положению при графическом построении отражений должны быть признаны заведомо вредными те из них, длина пути которых при отражении от плоской поверхности превосходит длину прямого луча свыше 17 м, но в то же время не достигает удвоенной длины прямого луча. Ввиду таких ограничений вредные отражения возникают сравнительно редко в помещениях, ограниченных плоскими

поверхностями, и гораздо чаще при наличии вогнутых поверхностей, о чем речь будет ниже.

Указанное не относится однако к вредным отражениям в форме эха, которые совпадают по времени не с основным звуком, а лишь его продлением вследствие действия отражений, причем продление звука всегда слабее самого звука. Поэтому эхо должно быть сопоставляемо с силой продления звука в момент совпадения. Этим объясняется возможность наблюдения эха при ограниченной его силе, а также возникновения многократного постепенно слабеего эха.

§ 15. ПОСТРОЕНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ЛУЧЕЙ. Для выяснения графическим путем условий распространения звука в помещении необходимо знакомство с построением отражений. На основании общего закона отражения.

лучи падающий и отраженный лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности в точке отражения и составляют с этим перпендикуляром равные углы.

Таким образом для построения отраженного луча по данному прямому лучу надлежит в точке отражения восставить перпендикуляр к отражающей плоскости, провести через прямой луч и указанный перпендикуляр плоскость, в которой отложить по другую сторону перпендикуляра угол, равный углу между перпендикуляром и прямым лучом.

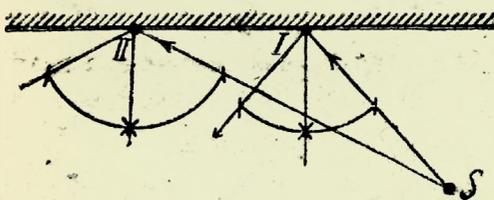


Рис. 20. Построение отраженных лучей.

Для общего обследования помещения возможно провести от источника звука любое количество прямых лучей до встречи с отражающими

поверхностями и в точках встречи построить соответствующие отражения; при надобности возможно повторить такое построение для получения вторичных отражений и т. д. Очевидно, что при построении нескольких последовательных отражений картина получается весьма сложная и неясная. Для упрощения и наглядности построения обычно ограничиваются построением лишь наиболее характерных лучей, выбирая например точки расположения крайних ближайших и удаленных слушателей. Однако при этом возникает новая задача, состоящая в отыскании на отражающих поверхностях точек отражения по данному расположению источника звука и слушателя (в точках S и A).

При плоских отражающих поверхностях разрешение этой задачи не представляет затруднений. Через одну из данных точек, например источник звука, опускают перпендикуляр на отражающую плоскость, а на продолжении его за этой плоскостью откладывают отрезок, равный расстоянию данной точки до плоскости, т. е. строят отражение точки как в зеркале. Соединив прямой полученную точку с другой из данных, получают в пересечении этой прямой с отражающей плоскостью искомую точку отражения. Правильность построе-

ния вытекает из равенства углов, образуемых с плоскостью падающим и отраженным лучами.

На рис. 22 показано построение отраженных лучей от нескольких плоскостей при расположении источника звука в точке  $S$  и слушателя в точке  $A$ . То же построение показывает, что плоскость  $MN$  в данном случае отражения не дает, так как возможная точка отра-

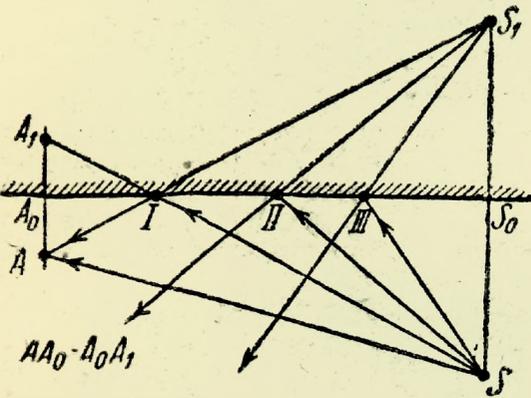


Рис. 21. Определение точки отражения.

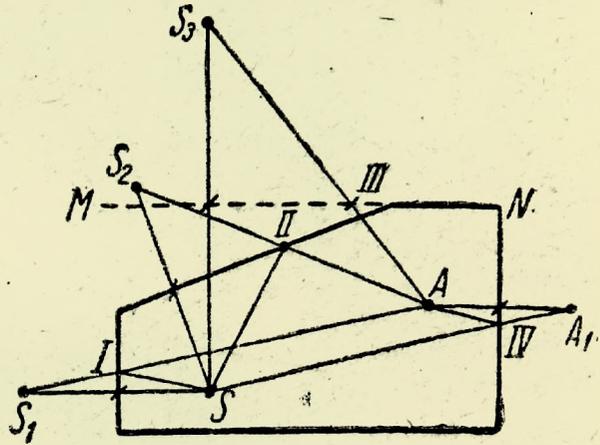


Рис. 22. Определение отражающих поверхностей.

жения ( $III$ ) — лежит на продолжении данной плоскости вне пределов помещения.

Этот же прием позволяет определить, какая часть отражающей поверхности дает отражения для слушателей, расположенных в различных удалениях от источника звука.

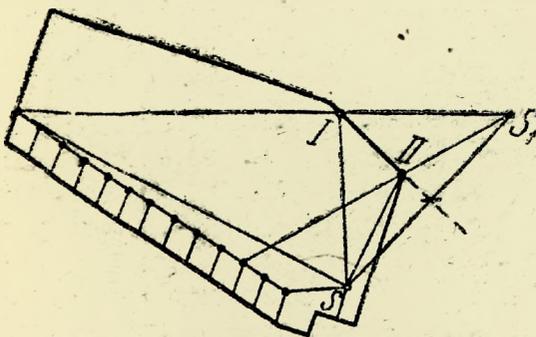


Рис. 23. Определение группы слушателей, пользующихся отражениями.

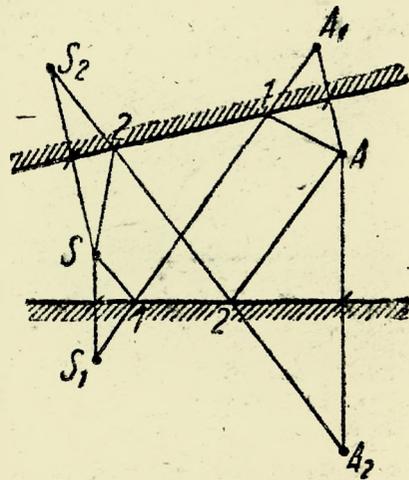


Рис. 24. Два решения двукратного отражения.

Построение двукратно отраженных лучей производится аналогичным образом. Для построения отражений от двух смежных плоскостей при данном расположении источника звука и слушателя надлежит построить зеркальные отражения от источника звука в одной плоскости, а от слушателя — в другой. Действительным решением будет такое, при котором прямая, соединяющая зеркальные отраже-

ния, пересечет двугранный угол, образуемый отражающими плоскостями. При тупом двугранном угле получается одно действительное и одно мнимое решение; при остром — оба решения действительны. Равным образом параллельные отражающие плоскости дают два действительных решения.

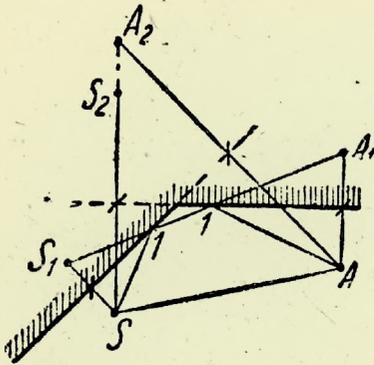


Рис. 25. Единственное двукратное отражение при тупом угле.

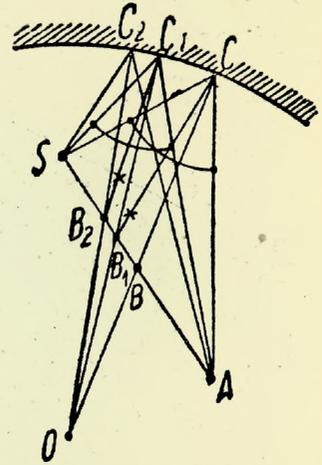


Рис. 26. Определение точки отражения от цилиндрической поверхности.

Построение лучей, отражающихся более чем от двух поверхностей, имеет мало практического значения из-за ограниченной силы таких лучей вследствие неоднократного поглощения.

При неплоских отражающих поверхностях определение точек отражения производится сложнее и притом не точно, а приближенно. Простейший случай представляет цилиндрическая поверхность.

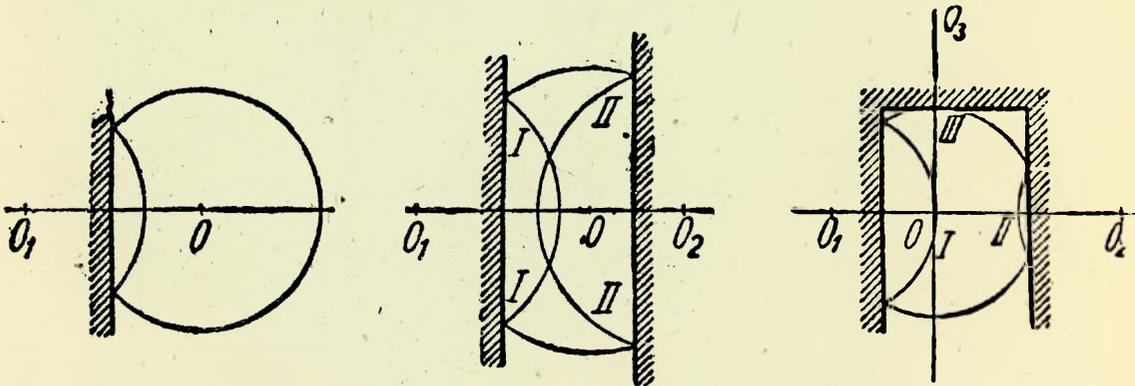


Рис. 27. Отражение волны от одной, двух, трех стен.

Из середины прямого луча, соединяющего источник звука со слушателем, опускают перпендикуляр на поверхность, и точку встречи соединяют с данными точками. В общем случае эта точка встречи не будет искомою, в чем можно убедиться, разделив пополам угол, образуемый падающим и отраженным лучами, причем биссектриса направится по ту или иную сторону перпендикуляра. Тогда через точку встречи биссектрисы с прямым лучом опускают второй перпендикуляр, определяя новую точку встречи, более близкую к ис-

комой точке отражения. Продолжив построение несколько раз, возможно подойти к решению задачи с точностью, допустимой при графическом построении.

§ 16. ПОСТРОЕНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН. Каждый звуковой луч является одним из радиусов некоторой звуковой сферической волны. Поэтому замена волн лучами дает упрощенную и неполную картину распространения звука, так как форма волны остается при этом невыясненной. Для ближайшего ознакомления с изменением этой формы полезно усвоить приемы построения отраженных волн.

По принципу Гюйгенса сферическая волна после отражения от плоскости сохраняет свою сферическую форму, причем центром кривизны служит зеркальное отражение источника звука по другую сторону отражающей плоскости. Таким образом форма

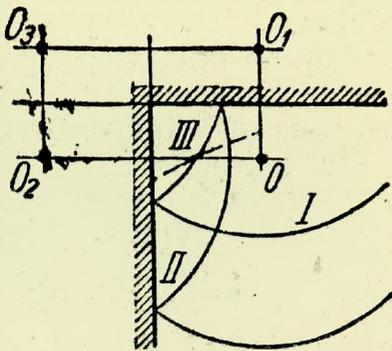


Рис. 28. Отражение волны в углу.

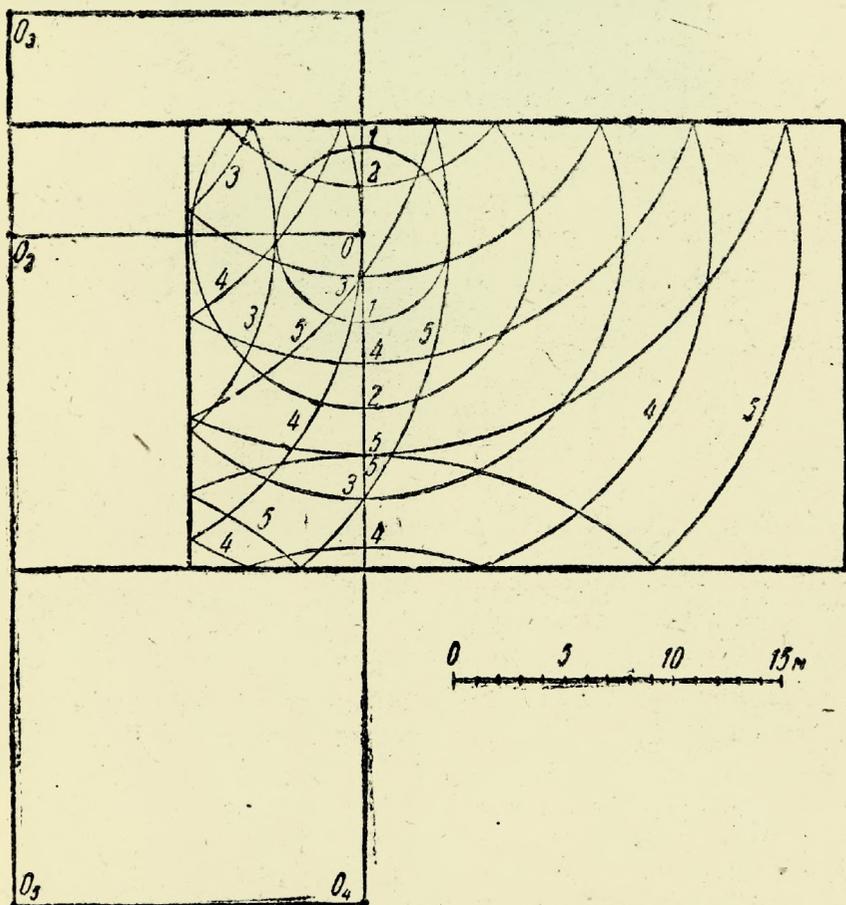


Рис. 29. Отражение группы волн.

волны подвергается изменениям в зависимости от расположения источника звука по отношению к отражающим плоскостям.

На рис. 27 даны примеры однократных отражений от одной, двух и трех стен помещения. Начертание волны тесно связано с ее ради-

усом, изображающим в масштабе чертежа длину пути, пройденного волной в рассматриваемый промежуток времени. Так например радиус в 34 м отвечает промежутку времени в 0,1 сек. В примере отражения от двух стен сомкнутое начертание волны состоит из двух элементов прямой волны и двух отражений, причем все эти элементы имеют один и тот же радиус. Отсюда следует и другой практический вывод, что сумма этих элементов равна длине окружности того же радиуса.

Если отраженная волна встречает при своем поступательном движении поперечную стену, то она подвергается отражению по общему закону, причем центром кривизны волны, отраженной от поперечной стены, будет зеркальное отражение в плоскости этой стены центра кривизны отраженной волны. Этот новый элемент будет вторичным отражением волны.

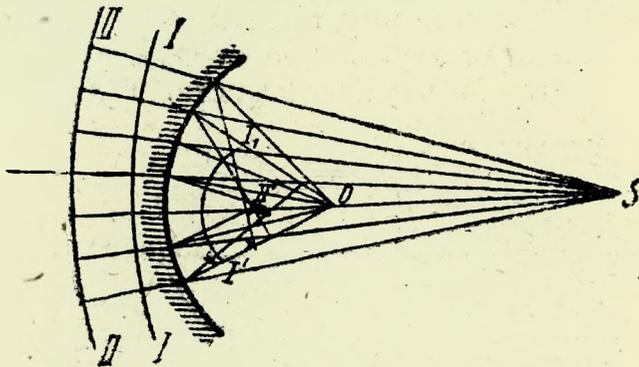


Рис. 30. Отраженная волна от цилиндрической поверхности.

При дальнейшем движении отраженной волны она достигает противостоящей стены и подвергается вторичному отражению, имея центром кривизны новую точку зеркального отражения своего прежнего центра кривизны в плоскости противостоящей стены.

На основании этих общих соображений показано распространение звуковых волн в плане прямоугольного помещения размерами  $20 \times 30$  м при размещении источника звука за 5 м от длинной и за 8 м от короткой стороны, причем волны показаны через каждые 4 м удаления до радиуса в 20 м. Каждая волна представляет самостоятельную сомкнутую фигуру из элементов с одним радиусом кривизны, причем число элементов и центров кривизны постепенно возрастает от одного до шести при наибольшем радиусе.

Сравнительная простота построения схемы движения волн при плоских отражающих поверхностях отпадает при наличии хотя бы части поверхности неплоской формы. При постоянстве общих условий отражения, отраженные волны в этом случае уже не являются подобными прямым по своей форме, которая может быть определяема путем построения отдельных точек, равно удаленных от источника звука по направлению ломаных линий, образуемых прямыми и отраженными лучами. Сложность построения лишает этот прием практического значения и побуждает заменять построение отраженных волн построением отдельных лучей.

Возможность одновременного действия многих систем волн в упругой среде наглядно подтверждается распространением волн на водной поверхности в условиях, аналогичных распространению звуковых волн в замкнутом пространстве. Многочисленные опыты, произведенные Михелем на специальном приборе, дают возможность проследить это явление в различных стадиях и различных местных условиях. Для этой цели он пользовался плоским ящиком, заполняемым слоем воды толщиной 0,7 — 0,8 см и снабженным приспособлением для возбуждения волн на поверхности воды. Фотографические снимки волн при помощи кинематографического аппарата подтверждают правильность геометрических построений.

С особенной наглядностью можно наблюдать пересечение отраженных волн на блестящей поверхности ртути.

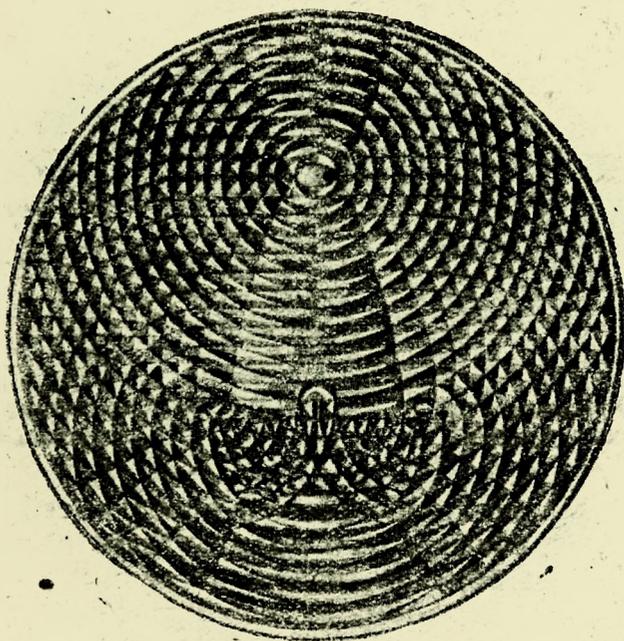


Рис. 31. Отражение волн на поверхности ртути.

§ 17. ОТРАЖЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЕ И ДИФфуЗНОЕ. При ознакомлении с приемами построения отражений отражающие поверхности рассматривались как зеркальные. По аналогии с отражением световых лучей необходимо иметь в виду, что способность зеркального отражения свойственна лишь гладким поверхностям, шероховатости которых малы по отношению к размерам волн. При отражении света этим свойством обладают так называемые блестящие поверхности, удовлетворяющие указанному условию по отношению к световым волнам. Поверхности матовые и шероховатые этим свойством уже не обладают, так как их неровности достаточно велики для отражения световых волн по различным направлениям. Способность диффузного отражения или рассеивания света большей частью отражающих поверхностей в значительной мере содействует равномерному распределению световой энергии.

Выше было указано (§ 5), что размеры звуковых волн несоизмеримо крупнее световых. В силу этого многие поверхности, шеро-

ховатые для световых волн, являются в то же время гладкими для звуковых. Поэтому в отношении звука помещения в большинстве случаев оказываются в таких условиях, в каких, по отношению к свету, были бы помещения, ограниченные блестящими поверхностями. Это обстоятельство осложняет в известной мере акустическое благоустройство помещений по сравнению со световым.

Аналогично с движением волн на водной поверхности звуковые волны игнорируют мелкие препятствия, подчиняясь при отражении лишь общей форме отражающей поверхности. Мелкие архитектурные детали, профили карнизов, наличников и т. п. остаются без влияния на отражение, и поверхность может быть рассматриваема как гладкая, отвечающая по форме упрощенному очертанию деталей.



Рис. 32. Отражение от архитектурных деталей.

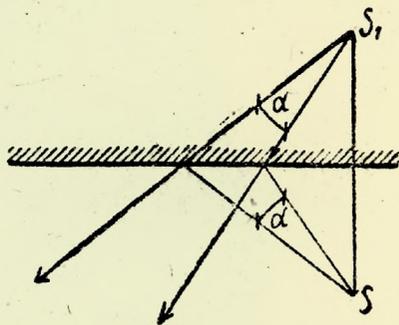


Рис. 33. Отражение от плоской поверхности.

Для того чтобы какой-либо элемент поверхности мог давать зеркальные отражения, размеры его должны быть не менее половины длины волны. Таким образом, между деталями, не влияющими на отражение, и крупными формами, каждый элемент которых действует как самостоятельная, зеркально отражающая поверхность, имеются промежуточные условия, при которых крупные волны отражаются зеркально, а мелкие диффузно. Такие условия могут влиять на состав отражаемых сложных звуков, отражая их составные части различным порядком и вызывать в некоторых случаях искажение звуков.

## ЗАДАНИЕ V

### ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

§ 18. ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ. Всякое отражение увеличивает силу звука. Чем сильнее отражение, тем значительнее его роль в этом отношении. Вместе с тем отражения, опаздывающие свыше известного предела, могут быть вредными для ясности звука, и вред этот возрастает с увеличением времени опоздания и силы отражения. Таким образом, практически желательно иметь сильные полезные и слабые вредные отражения. То и другое устанавливает суще-

ственную практическую роль силы отражений, связанной с условиями их распространения. Изучение этих условий возможно путем построения группы отраженных лучей и сопоставления закона их распространения с распространением звуковой энергии до отражения.

Для построения группы отраженных лучей от плоскости достаточно найти зеркальное отражение в этой плоскости источника звука и найденную точку соединить прямыми с точками отражения. Если падающие на плоскую поверхность прямые лучи образуют между собою углы  $\alpha$ , то из равенства соответствующих треугольников можно видеть, что направления отраженных лучей сохраняют между собою те же углы, иначе говоря,

условия рассеивания звука при отражении от плоской поверхности не изменяются.

Зная, что при свободном распространении звука сила его на расстоянии  $z$  составляет

$$I_r = I_1 r^{-2} \quad (\S 6),$$

можно заключить, что сила звука, однократно отраженного от плоской поверхности с коэффициентом поглощения  $a$ , будет равна

$$I_r = I_1 r^{-2} (1 - a),$$

а после  $n$  повторных отражений составит  $I_r = I_1 r^{-2} (1 - a)^n$ . Таким образом, вычисление силы звука, отраженного от плоской поверхности не представляет затруднений, причем, принимая  $I_1 = 1$ , возможно определить относительную силу звука на различных удалениях или после различного числа отражений.

**§ 19. ВЫПУКЛЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.** Отражающее действие неплоских поверхностей возможно рассматривать в их плоских сечениях, характеризующих форму поверхности. В этих сечениях могут встретиться не только кривые, но и прямые линии, отражающее действие которых было рассмотрено выше в § 18. Действительно, если поверхность, независимо от своей формы, дает в некотором сечении прямую линию, то отражающее ее действие в плоскости этого сечения аналогично с действием плоской поверхности.

Отражающее действие выпуклой поверхности может быть рассмотрено в плоском сечении, имеющем вид выпуклой кривой с центром кривизны и некоторой точке  $O$ . Проведем из точки расположения источника звука  $S$  луч  $SO$ , нормальный к данной кривой, и другой луч, составляющий угол  $\alpha$  с направлением первого луча. Назовем  $\beta$  угол, составляемый радиусами кривизны в точках встречи лучей с отражающей поверхностью. Направление второго прямого луча составляет с соответствующим ему радиусом угол  $\alpha + \beta$ , почему угол, образуемый этим лучом с направлением отраженного луча, равняется  $2(\alpha + \beta)$ . Так как внешний угол треугольника  $BCS$  равен сумме двух внутренних, с ним несмежных, то  $\angle ACB = \alpha + 2\beta$ , т. е. угол  $\alpha$ , составляемый прямыми лучами, возрастает при отражении до величины  $\alpha + 2\beta$ .

Таким образом, при отражении от выпуклой поверхности угол, образуемый отраженными лучами, всегда более угла между падаю-

Центральная библиотека  
 им. Белинского

щими лучами, причём возрастание угла зависит от радиуса кривизны поверхности и усиливается с его уменьшением. Увеличение этого угла влечёт усиленное звукорассеяние, почему

отражения от выпуклых поверхностей увеличивают звукорассеяние и тем в большей степени, чем менее радиус кривизны поверхности.

Если  $\beta = \alpha$ , то  $\alpha + 2\beta = 3\alpha$ . Стало быть при расстоянии источника звука, приблизительно равном радиусу выпуклой отражающей поверхности, звукорассеяние возрастает в три раза при цилиндрической и в девять раз при шаровой поверхности с соответствующим возрастанием быстроты падения силы звука. Таким образом, применение выпуклых отражающих поверхностей может служить средством для ослабления вредных отражений.

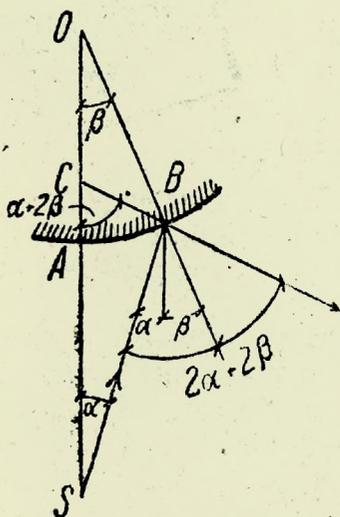


Рис. 34. Отражение от выпуклой поверхности.

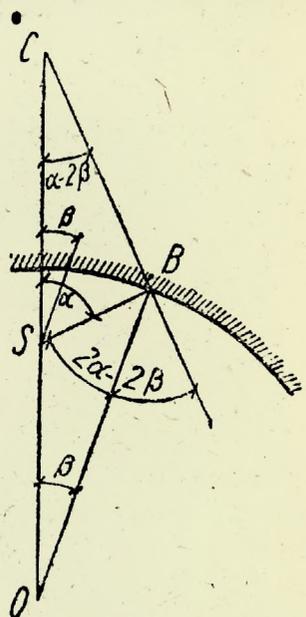


Рис. 35. Отражение от вогнутой поверхности.

§ 20. ВОГНУТЫЕ ПОВЕРХНОСТИ. Отражающее действие вогнутых поверхностей отличается существенными особенностями. Проводя два падающих луча к вогнутой поверхности, один нормально к ней и другой под углом  $\alpha$  к первому, определяем угол  $\beta$ , составляемый радиусами кривизны в точках отражения. Как видно на рис. 35, угол между направлениями падающего и отраженного лучей составляет  $2(\alpha - \beta)$ , а угол между направлениями смежных отраженных лучей равняется при этом  $\alpha - 2\beta$ .

• Таким образом, вогнутые поверхности сокращают углы, образуемые направлениями отраженных лучей, причем это сокращение усиливается с уменьшением радиуса кривизны вогнутой поверхности. Сокращение углов между отраженными лучами, концентрируя отражаемую энергию в более ограниченном пространстве, способствует меньшей потере ее на расстоянии по сравнению с условиями

непосредственного распространения от источника звука. Однако при ближайшем рассмотрении в этот вывод должны быть внесены дополнительные уточнения.

Величина угла  $\alpha - 2\beta$  всегда меньше  $\alpha$ , но может быть в то же время более и менее нуля, а в частном случае равна ему. Если углы, составляемые отражениями, более нуля, отражения имеют расходящиеся направления, причем потеря силы на расстоянии происходит медленнее, чем до отражения. Когда эти углы равны нулю, направления отраженных лучей становятся параллельными между собою, что отвечает случаю передачи энергии без потери на бесконечное расстояние, если не учитывать потерю на прохождение упругой среды. Наконец, когда углы между отражениями становятся отрицательными, направления отраженных лучей сближаются, вызывая местное усиление звука, достигающее наибольшей величины в точке пересечения отраженных лучей, называемой фокусом. После пересечения в фокусной точке отраженные лучи приобретают расхо-

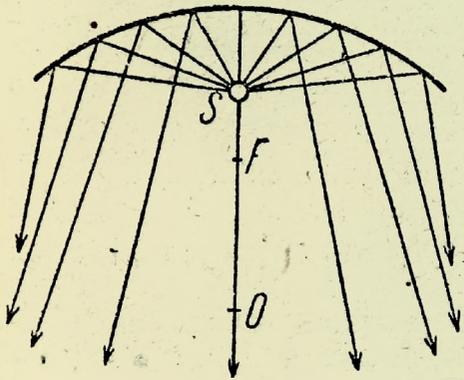


Рис. 36.

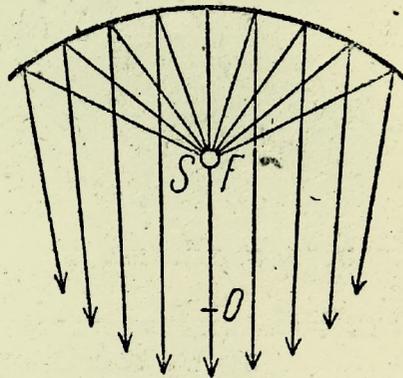


Рис. 37.

Различные случаи отражения от вогнутой поверхности.

дящиеся направления, причем углы между этими направлениями могут быть менее, равны и более углов составляемых падающими лучами до отражения. Таким образом, в части рассеивания энергии после ее концентрации в фокусных точках, вогнутые поверхности могут действовать не только как вогнутые, но как плоские и выпуклые поверхности.

В связи с изложенным практически важно выяснить, от каких причин зависит тот или иной результат действия отражений. Для этой цели следует рассмотреть характерные случаи расположения источника звука по отношению к отражающей поверхности.

Если источник звука отстоит от поверхности менее половины ее радиуса, отраженные лучи получают расходящиеся направления, причем углы между ними менее углов, образуемых падающими лучами. Фокусы отсутствуют; рассеивание энергии сокращается по сравнению с плоской поверхностью.

При удалении источника на половину радиуса отраженные лучи приобретают приближенно параллельные направления. Точная параллельность достигается при отражении от параболической поверхности. Этот случай отвечает передаче отраженной энергии почти без

потери, с расположением фокуса отраженных лучей в бесконечном удалении от поверхности.

При перемещении источника от половины радиуса до центра кривизны отраженные лучи пересекаются, причем фокусы отраженных лучей быстро приближаются из неопределенно большого удаления к этому же центру кривизны. Район концентрации энергии прости-

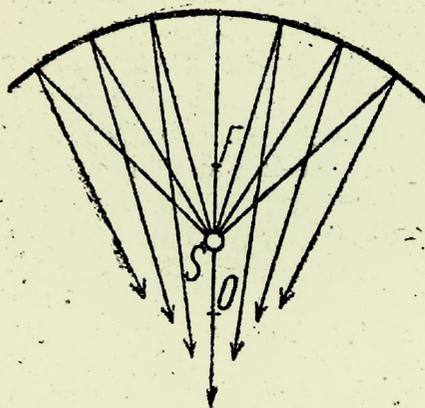


Рис. 38.

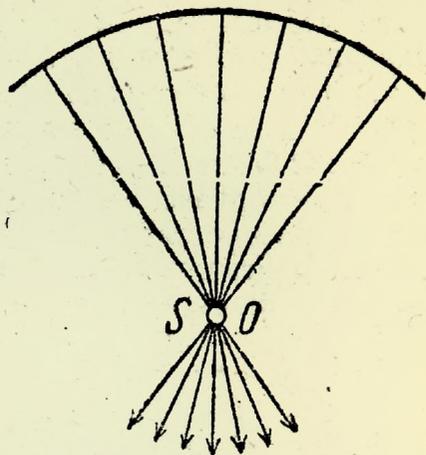


Рис. 39.

Различные случаи отражения от вогнутой поверхности.

рается от поверхности на удвоенное удаление фокуса отраженных лучей.

Если источник совпадает с центром кривизны, то направления отраженных лучей совпадают с падающими, и фокус их располагается в том же центре. Район концентрации ограничивается удвоен-

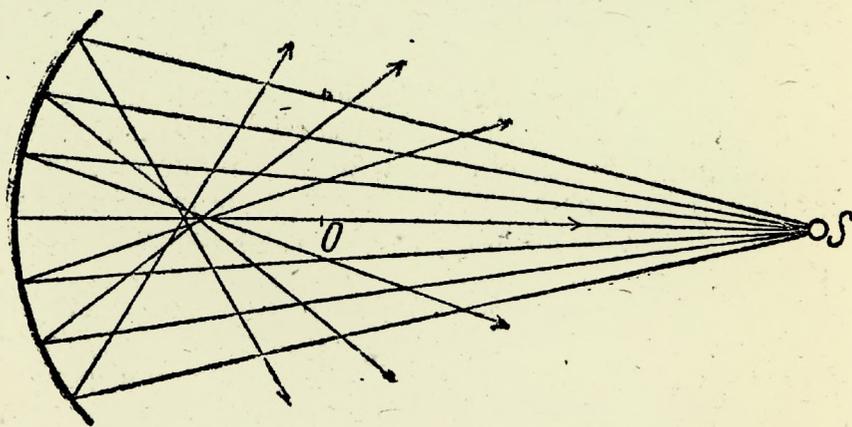


Рис. 40. Различные случаи отражения от вогнутой поверхности.

ным радиусом; падение силы звука происходит по закону свободного распространения, но сила возрастает за счет отраженной энергии.

Наконец, при перемещении источника звука далее центра кривизны отраженные лучи пересекаются в пределах от центра кривизны до половины радиуса или главного фокуса кривой, с ко-

торым совпадают при удалении источника на бесконечное расстояние. Район концентрации колеблется при этом в пределах от удвоенного до одиночного радиуса кривизны. Отражения вызывают усиленное рассеивание энергии, как при выпуклых поверхностях.

На основании изложенного возможно заключить, что

вогнутые поверхности при отражении могут сокращать, сохранять и увеличивать звукорассеяние по сравнению с плоской поверхностью, в зависимости от относительного расположения источника звука и центра кривизны.

Для определения мест наибольшей концентрации отражаемой энергии практически важно установить зависимость между расположением источника звука и фокуса отраженных лучей, эта зависимость может быть выражена общей формулой:

$$x = \frac{dr}{2d - r},$$

где при радиусе кривизны  $r$  и расстоянии источника звука  $d$  величина  $x$  отвечает удалению фокусной точки от отражающей поверхности.

Так, если  $d = 2r$ , то  $x = \frac{2}{3}r$ , а район концентрации энергии простирается от поверхности на  $\frac{4}{3}r$ . Если  $d = r$ , то  $x = r$  и т. д.

§ 21. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ОТРАЖЕНИЙ. При рассмотрении вопроса об условиях полезного действия отражений (§ 14) была установлена непосредственная связь роли отражений с их относительной силой по сравнению с основным звуком. Кроме того была выяснена зависимость силы отражений от формы отражающих поверхностей (§ 18—20). В связи с этим возникает потребность ознакомления с приемами определения относительной силы отражений.

Основная практическая задача состоит в сопоставлении для некоторой точки внутри помещения относительной силы прямого и отраженного лучей.

При плоских отражающих поверхностях эта задача удобно разрешается аналитическим путем, исходя из условий изменений силы звука при свободном его распространении (§ 6) и при отражении от плоской поверхности (§ 18).

При сферических звуковых волнах сила прямого луча при длине  $r$  составляет

$$I_r = I_1 r^{-2},$$

где  $I_1$  — сила звука на расстоянии 1 м от источника; сила луча, отраженного от плоской поверхности при длине отраженного луча  $r_1$  и коэффициент отражения  $a$

$$I_{r_1} = I_1 r_1^{-2} (1 - a).$$

Предельная сила безвредного отражения определяется из условия

$$I_1 r^{-2} \gg k I_1 r_1^{-2} (1 - a) \text{ или } r^{-2} \gg k r_1^{-2} (1 - a), \text{ где } k \gg 4.$$

Из последнего выражения можно видеть, что удлинение пути отраженного луча играет более крупную роль для уменьшения силы отражения, чем величина коэффициента поглощения.

При отражениях от неплоских поверхностей указанная зависимость осложняется вследствие изменения звукорассеяния при отражении. В качестве общего приема разрешения задачи возможно приложить метод графического построения отражений, предложенный Ортом.

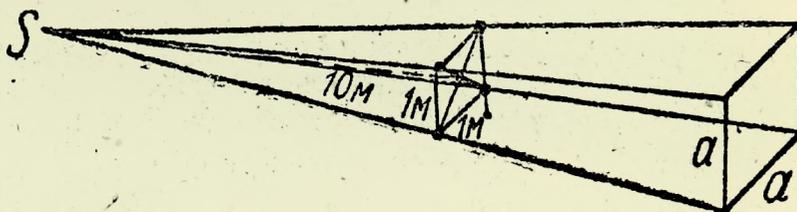


Рис. 41. Масштаб для измерения относительной силы звука.

Принимаем за единицу измерения силы звука квадратную площадку, нормальную к прямому лучу, проходящему через ее центр на расстоянии единицы длины от источника. В масштабе чертежа за единицу длины целесообразно принимать 10 м при стороне площадки в 1 м или менее.

Для определения относительной силы прямого луча в различных удалениях следует провести лучи через углы указанной площадки и построить пирамиду, поперечные сечения которой будут обратно

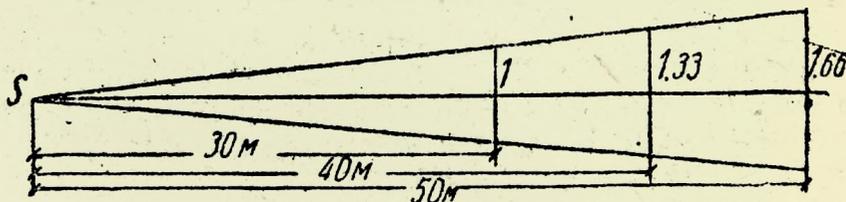


Рис. 42. Измерение относительной силы звука.

пропорциональны силе звука. Эта пропорциональность выражается численно путем сравнения величины сечений с основной площадкой. При сравнении силы прямых и отраженных лучей необходимо при подсчете вводить поправку на потерю силы при отражении.

При отражении от неплоских поверхностей степень рассеивания определяется изменением углов между гранями пирамиды. Цилиндрические поверхности, изменяющие рассеивание лишь в одном направлении, обращают квадратные сечения пирамиды в прямоугольные; шаровая поверхность влияет лишь на величину сечений с сохранением их подобия; наконец, поверхности двойкой кривизны изменяют как форму, так и величину сечения, обращая квадрат в прямоугольник, стороны которого приблизительно обратно пропорциональны соответствующим радиусам кривизны.

Определение относительной силы звука по найденным поперечным сечениям может быть произведено аналитическим или графическим путем.

Так например, принимая за единицу силу звука на удалении 30 м от источника, определим его силу на удалениях в 40 и 50 м.

Стороны квадратных площадок относятся как 1:1,33:1,66. Сила звука выражается отношением  $1 : \frac{1}{1,33^2} : \frac{1}{1,66^2}$  или  $1 : 0,565 : 0,364$ .

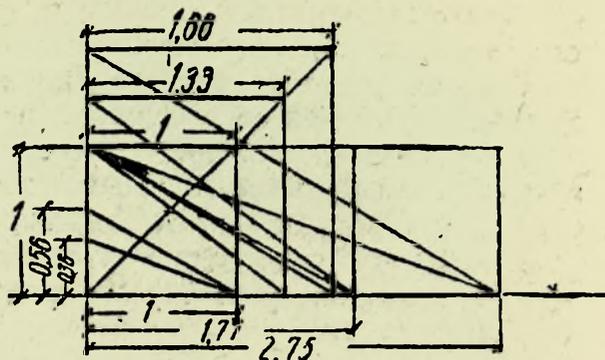


Рис. 43. Графическое решение той же задачи.

Для графического решения той же задачи заменяем вторую и третью квадратные площадки равновеликими прямоугольниками, одна из сторон которых равна единице: отношения других сторон определяются как 1:1,77:2,75. Остается разделить единицу в отношении, обратно пропорциональном этим величинам, что выполнено на рисунке и дает вышеуказанное соотношение  $1 : 0,565 : 0,364$ .

## ЗАДАНИЕ VI

### МЕСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

§ 22. ПРЕПЯТСТВИЯ В ПРЕДЕЛАХ ПОМЕЩЕНИЯ. При распространении звука в помещении возможны случаи, когда прямые звуковые лучи не получают доступа к некоторым частям ограничивающих помещение поверхностей. Такие условия возникают при наличии в помещении отдельных столбов, выступов и иных препятствий. Между тем нетрудно на опыте убедиться в возможности слышать, не видя источника звука. Мало того, эта возможность существует не только в помещениях, где помимо прямых лучей действуют отраженные, но и в открытом пространстве при отсутствии отражений. Причиной этого кроется в явлении дифракции звука.

При распространении волн в упругой среде дифракцией называется их способность уклоняться от прямолинейного движения при встрече и обходе препятствий. Явление это наблюдается легче при крупных волнах, и потому при звуковых волнах в значительно большей степени, чем при световых. В то время как границы световой тени во многих случаях отличаются своей определенностью, установить границы звуковой тени вообще затруднительно. В качестве практического обоснования явления дифракции следует указать на невозможность в упругой среде существования резкого разрыва между состоянием волнообразного колебательного движения и полного покоя.

Теоретически дифракция обосновывается на принципе Гюйгенса, по которому каждый элемент волны рассматривается как самостоя-

тельный источник энергии, образующий свою отдельную систему волн, распространяющуюся с общей для всех систем скоростью. Совокупность таких элементарных систем обуславливает общее поступательное движение волн от источника звука. Таким образом, проходя мимо препятствия, касательные к нему элементы распространяют элементарные волны позади препятствия, как бы обходя его, с отклонением от прямолинейного движения.

Схема обхода препятствий неуловима при построении звуковых лучей, почему для ее выяснения необходимо прибегнуть к построению звуковых волн. При этом существенно важно проследить, каким образом отраженные волны сохраняют в новых условиях свою сомкнутую фигуру (§ 16).

Рассмотрим построение отраженной волны от поверхностей квадратного столба (рис. 44). Жирная кривая определяет начертание

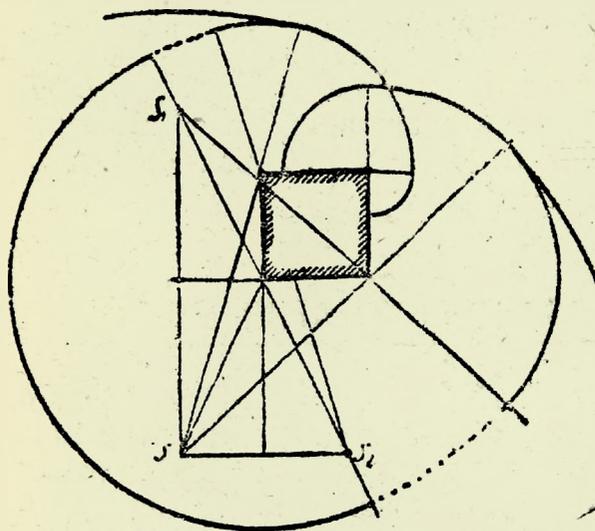


Рис. 44. Отражение волны от квадратного столба.

прямой волны при расположении источника звука в точке  $S$ . Эта волна разорвана встречным препятствием, две грани которого дают отражения, показанные жирным пунктиром, того же радиуса, что и прямая волна, и по совокупной длине дополняющие прямую волну до окружности. Отсутствие разрыва в волнообразном состоянии упругой среды объясняется возникновением в этих условиях дополнительных волн Гюйгенса. Первая из этих волн имеет центром своего возникновения переднее ребро столба и развивается в пределах полуокружности, объединяя отражения от боковых граней. Вторая и третья волны имеют центрами возникновения

боковые ребра столба и в своем начертании касаются крайних точек прямой волны, продолжаясь в то же время до плоскости задних граней столба. Наконец, заднее ребро столба служит центром возбуждения двух дополнительных ветвей волны, примыкающих к задним граням. Таким образом, сомкнутость фигуры отраженной волны сохраняется в этих условиях в полной мере, благодаря возникновению волн Гюйгенса. Действительность существования этих последних наглядно подтверждается опытами Михеля на водной поверхности (§ 16).

На основании изложенного возможно общее суждение о практической роли препятствия в пределах помещения. Препятствия, преграждающие доступ прямых звуковых лучей к некоторым частям помещения, не лишают эти части доступа звуковой энергии в форме волн Гюйгенса независимо от возможных отражений. Однако плотность насыщения звуковой энергией и сила звука в этих условиях неизбежно падают, и тем сильнее, чем значительнее относительные

размеры препятствия. Поэтому одним из практических условий обеспечения силы звука признается возможность доступа прямых звуковых лучей или объединение акустических условий с оптическими.

§ 23. РЕЗОНАНС. Резонансом называется способность тела воспринимать такие колебания, которые оно само способно совершать. Некоторые тела обладают ясно выраженным резонансом для колебаний определенной частоты и могут вылавливать их среди различных колебаний. Характерным образцом этого типа служит камертон, реагирующий на тон соответствующей высоты. Наоборот, существуют тела, отвечающие на все доходящие до них колебания, независимо от их частоты. Таким свойством обладают пластинки с низким собственным тоном, особенно деревянные.

Это последнее свойство имеет существенное значение в акустике помещений, так как резонирующие элементы, приходя под действием звука в колебательное движение, могут усиливать звук и делать его мягче и полнее. Таким образом, воздушные звуковые колебания вызывают материальные колебания резонирующих поверхностей, которые в свою очередь могут переходить обратно в воздушные. Однако этот процесс нельзя смешивать с отражением звука.

Резонирующая поверхность перестает быть инертным препятствием, обладающим способностью лишь поглощать и отражать колебания, но получает активную роль при переходе в колебательное движение, так как становится возбудителем новых колебаний. В связи с этим возникают новые вопросы об условиях распространения звуковых колебаний в среде препятствия, а также о колебаниях, возбуждаемых в воздушной среде действием резонирующей поверхности.

Скорость звука в твердых телах существенно отличается от скорости в воздухе. При нормальной температуре она составляет для железа 5016 м, для дерева от 3380 до 5250 м, для обожженной глины 3650 м и т. д., причем превосходит от 10 до 15 раз скорость в воздухе, равную 340 м в секунду. При таком возрастании скорости распространение звука в твердых телах в пределах помещения может быть рассматриваемо как мгновенное. Таким образом, при устройстве резонирующего деревянного пола звук через конструкцию пола может достигнуть слушателя ранее, чем прямые лучи от источника звука. В этих условиях вместо обычной опасности опоздания возникает иная опасность — слишком раннего доступа к слушателю звуков, направляющихся обходным путем, что должно быть учитываемо в подлежащих случаях.

Другое новое обстоятельство выражается в том, что резонирующая поверхность под действием воздушных колебаний или при непосредственном распространении колебаний источника через материал поверхности становится новым вторичным источником звука. Такой источник отличается от обычных своей протяженностью, почему вообще не может быть рассматриваем как точечный. В связи с новой формой изменяются и условия распространения колебаний в воздушной среде, вызываемых таким источником. Вместо сферических волн при плоской резонирующей поверхности возникают плоские волны (§ 6), способствующие передаче звуковой энергии

почти без потери на весьма большие расстояния, но с затратой части энергии на образование нового источника звука. Точных исследований в этой области не имеется, но из вышеизложенного ясно, что волны, возбуждаемые резонирующей поверхностью, более слабые, чем обычные отражения вблизи поверхности, могут превосходить последние по силе на расстоянии благодаря более выгодным условиям распространения.

Другое важное следствие резонанса поверхностей состоит в сохранении воздушными волнами формы резонирующей поверхности, что при вогнутых поверхностях устраняет ту резкую неравномерность распределения энергии, которая получается при отражении, благодаря концентрации энергии в фокусах отраженных лучей.

Результаты действия резонирующих поверхностей в форме плоских волн и устранения фокусов наглядно демонстрируются на водной поверхности помощью вышеупомянутого прибора Михеля (§ 16).

Описанные преимущества резонирующих поверхностей перед отражающими позволяют считать первые одним из существенных элементов акустического благоустройства помещений.

Что касается устройства резонирующих поверхностей, то общим условием является отсутствие в них ясно выраженного резонанса для тона определенной высоты. Этому условию отвечают прежде всего деревянные обшивки, настилы и перегородки, однако не исключена возможность устройства резонирующих конструкций из камня, кирпича, бетона, гипса, пробки и т. п. при ограниченной толщине конструкции. Возрастание напряжений увеличивает резонирующую способность при отсутствии препятствий к возникновению колебаний. Поэтому сосредоточенная узловая нагрузка выгоднее сплошной, а равным образом плотная укладка резонирующего слоя на другой без промежутка между ними нежелательна.

Увеличение жесткости конструкции, особенно при железобетоне, может обращать резонирующие конструкции в отражающие, иногда с неблагоприятными от этого последствиями. В отдельных случаях может влиять неблагоприятно слишком частое или неудачное распределение узловых точек конструкций, причем для усиления резонанса или для ослабления ясно выраженного собственного тона бывает иногда достаточно изменить число или расположение узловых точек. Наиболее надежные результаты достигаются при применении для этой цели многократно испытанных деревянных конструкций, которые возможно рекомендовать в первую очередь.

§ 24. ВОЗДУШНЫЕ ТЕЧЕНИЯ. Последним вопросом в отношении местных влияний на распространение звука в помещении служит влияние воздушных течений. Это влияние, касающееся состояния воздушной среды, выражается в двух основных формах — в виде воздушных течений без существенного различия температуры или в виде тепловых потоков, нарушающих постоянство температуры в объеме помещения.

Воздушные течения без изменения температуры возможны в виде вентиляционных потоков при естественном или искусственном обмене воздуха в помещении. Передвижение частей упругой среды может вызвать изменение скорости распространения звука. Однако, в виду малой скорости движения воздуха по сравнению со ско-

ростью звука, влияние это ничтожно и может быть оставляемо без учета.

Несколько значительнее роль тепловых потоков, связанных с системой и расположением нагревательных приборов. Кроме того и при стационарном состоянии воздуха возможно существенное различие температуры нижних и верхних слоев воздуха в помещении, достигающее до  $1^{\circ}\text{C}$  на каждые 1—1,5 м высоты помещения. В этих условиях надлежит считаться с изменением скорости звука в зависимости от температуры воздуха (§ 5), а также с возможностью преломления звуковых волн при встрече с воздушным потоком иной плотности, уменьшение которой влечет возрастание скорости звука. Закон преломления гласит, что отношение синусов углов падения и преломления есть величина постоянная и равная отношению скоростей в смежных средах.

Таким образом, при наличии воздушных слоев с различной постепенно убывающей или возрастающей плотностью звуковые лучи могут уклоняться от прямолинейного направления, в связи с чем изменяется и их дальнейший путь после отражения. Кроме того, процесс преломления сопровождается некоторой потерей звуковой энергии. В общем указанные уклонения и потери представляют явления второстепенного значения при распространении звука, но их роль может обостриться при неблагоприятных условиях. Сюда нужно отнести возможность чередования потоков с различной температурой и плотностью, что уменьшает звукопроводность воздушной среды, подобно тому как толченное стекло или водяная пена теряют прозрачность для световых лучей. В качестве практического примера Биле указывает, что теплота и дым от горящих церковных свечей заглушают иногда голос проповедника.

Считаясь с формой теплового потока, надлежит отметить, что поток, ограниченный плоскими параллельными гранями, наименее опасен, но что опасность его возрастает, если границы имеют не плоскую форму на подобие линзы, вызывающей неравномерное распределение энергии.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.** 1. Какие технические качества звука необходимы в помещениях?

2. Чем отличается физическое явление звука от физиологического?

3. Как распространяется звуковая энергия?

4. Что такое тон и как тона различаются между собою?

5. Какова скорость распространения звука в воздухе?

6. Что называется порогом слухового ощущения?

7. Какова зависимость между силой звука и интенсивностью слухового ощущения?

8. Как измеряется интенсивность ощущения?

9. Каковы предельные удаления для голоса в открытом пространстве?

10. В каких условиях интерференция вредно влияет на качество звука?

11. Чем могут быть нарушаемы ясность и красота звуков при распространении в открытом пространстве?

12. Какими условиями сопровождается распространение звуков в помещении?

13. Чем объясняется поглощение звука препятствиями на пути его распространения?

14. Какова практическая роль поглощения звука?

15. Что называется коэффициентом поглощения?

16. Чем обуславливается величина коэффициента поглощения?

17. Какую роль играет отражение звука?

18. Как влияет отражение на процесс звукового действия?

19. Какие отражения признаются вредными?

20. Какова зависимость между опозданием отражений и ясностью звуков?

21. Как строятся отраженные лучи и определяются точки отражения на плоских и неплоских поверхностях?

22. Как влияет форма отражающих поверхностей на звукорассеяние?

23. В каких условиях вогнутые поверхности не дают концентрации отражаемой энергии?

24. Какова практическая роль дифракции звука?

25. В чем выражается влияние резонанса поверхностей на звукорассеяние?

26. Какое значение могут иметь воздушные течения?

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ПЕРВОЙ ТЕМЕ.** Для практической проверки усвоения условий распространения звука в помещении и влияния этих условий на технические качества звука предлагается составить проект помещения аудитории на 500—800 и более слушателей, и произвести акустическое обследование геометрических элементов этого помещения. Вместо составления проекта возможно выбрать в качестве примера одну из крупных аудиторий в существующих зданиях.

Обследование следует начать с определения размеров аудитории, определив ее объем и предельные удаления слушателей от оратора. Сопоставление объема с мощностью источника звука определяет практическую осуществимость задачи. Предельные удаления выясняют степень потребности усиления звука за счет полезных отражений и желательные направления последних. Осуществимость таких отражений связана с обследованием и корректированием формы. Обязательным условием является достаточная близость к источнику звука главных полезных отражающих поверхностей, их надлежащая форма и хорошо отражающий материал. При такой проверке следует учесть возможную подвижность источника звука с учетом предельных уклонов от нормального расположения. Дополнительная аналогичная проверка может быть произведена в условиях допущения речей с мест слушателей для выявления практической возможности или недопустимости таких условий.

Обследование должно быть распространено на весь объем помещения для выявления всех возможных недостатков в отношении размеров формы и материала. Такими недостатками могут быть эхо, сильно опаздывающие отражения и местная концентрация отражаемой энергии. При наличии таких недостатков необходимо наметить мероприятия по их устранению, пользуясь всеми техническими сред-

ствами — изменением размеров, формы и материала — и выделяя путем анализа те из них, которые по местным условиям могут быть рекомендованы в первую очередь для практического применения.

В качестве дополнительного упражнения предлагается определить в продольном разрезе крупного прямоугольного зала форму потолка, способствующую постепенному усилению отражений по мере удаления слушателей от оратора. При этом ближайшие слушатели могут быть лишены отражений от потолка, более удаленные — пользоваться отражениями от плоской поверхности и, наконец, по мере удаления — получать отражения постепенно возрастающей силы благодаря концентрации отражаемой энергии, без образования однако фокусов отраженных лучей.

# АКУСТИЧЕСКОЕ БЛАГОУСТРОЙСТВО ПОМЕЩЕНИЙ

§ 25. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАЗРЕШЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ. Знакомство с явлениями, сопровождающими распространение звука в помещении, выясняет общие условия, от которых зависят технические качества звука. В основе практических приемов обеспечения требуемых качеств в помещении лежит выбор соответствующих размеров и формы помещения, а также материала ограничивающих его поверхностей и предметов обстановки. Существенно важным условием служит при этом возможность не ограничиваться каким-либо определенным средством, а применять такое, которое в данном случае заслуживает предпочтения. Так, сила звука в помещении может быть увеличиваема в случае необходимости путем сокращения размеров помещения, путем изменения формы поверхностей для усиления отражений и наконец путем выбора материала, обладающего малым поглощением звука. Обеспечение ясности звука, достигаемое устранением вредного влияния сильно опаздывающих отражений, осуществимо или сближением отражающих поверхностей при уменьшении размеров помещения или путем ослабления отражений, для чего отражающие поверхности получают рассеивающую форму или сооружаются из сильно поглощающего материала.

Указанное разнообразие технических средств во многих случаях значительно сокращается из-за необходимости увязки акустических условий с требованиями иного порядка. Наиболее часто возникают затруднения при выборе размеров помещения. Сокращение размеров служит основным средством обеспечения силы звука при ограниченной энергии источника. Этому могут противоречить требования достаточной вместимости помещения, наличия в нем достаточного объема воздуха и т. п. В таких случаях сокращение размеров, целесообразное в акустическом отношении, может оказаться неосуществимым, и для акустического благоустройства должны быть приняты иные меры, хотя и менее желательные.

Вопрос выбора технических средств особенно затрудняется в существующих помещениях, если перемена назначения их связана с улучшением акустических качеств. При недопустимости в этих условиях переустройства помещения остается возможность его переоборудования, разумея под акустическим оборудованием специальные средства временного характера, не связанные со строительными работами.

Изложенные соображения показывают, что вопросы акустического благоустройства не могут разрешаться указаниями рецептурного порядка, но требуют в каждом случае изучения конкретных условий для сознательного выбора и использования средств акустического благоустройства при удовлетворении иных практических требований.

## ЗАДАНИЕ VII

# ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

§ 26. СВЯЗЬ АКУСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ С ОПТИЧЕСКИМИ. Основными условиями для проектирования помещения служат его назначение и вместимость. Задача проектирования осложняется с возрастанием вместимости, так как малые помещения в акустическом отношении в большинстве случаев благоприятны, крупные же требуют возможно компактного расположения мест для слушателей во избежание избыточного увеличения размеров. В этом последнем вопросе требования акустические совпадают с экономическими. Поэтому расположение крупных масс слушателей вызывает необходимость сокращения занимаемой площади до возможных пределов. Величина площади, занятой слушателями, при стоящей толпе составляет 0,2—0,3 кв. м на человека, а при размещении на расположенных рядами стульях 0,5—0,7 кв. м. С возрастанием числа слушателей во избежание чрезмерных удалений их размещают на различных уровнях, располагая верхние места над нижними на балконах с соответствующим увеличением высоты помещения.

При любом размещении слушателей существенно важным является непосредственный доступ к ним прямых звуковых лучей от источника звука (§ 22). Это условие устанавливает связь акустических условий с оптическими, так как доступ прямых лучей возможен лишь при таком расположении источника звука, при котором последний виден слушателю. Таким образом для правильного размещения слушателей необходимы те же условия, которыми должны пользоваться зрители в зрительном зале.

Возможность видеть источник звука, при расположении слушателей более чем в одном ряду, определяется проведением зрительного луча из глаза наблюдателя касательно к вершине головы сидящего впереди. Этот луч при расположении зрителей на горизонтальной плоскости получает наклонное положение с подъемом, зависящим от расстояния между зрителями или от глубины ряда. Для возможности быть видимым источник звука должен быть расположен не ниже продолжения этого луча. При равной глубине рядов наклон зрительного луча сохраняет постоянную величину, почему увеличение числа рядов или расстояния слушателей от источника звука требует повышения уровня последнего. При значительном числе рядов это повышение становится практически неприемлемым и крайне неудобным для зрителей ближайших рядов из-за чрезмерного возрастания наклона зрительных лучей. В связи с этим расположение слушателей на одном уровне практически допустимо лишь

при ограниченном числе рядов мест в помещениях небольших размеров.

Кроме указанного необходимо учитывать и дополнительное условие видимости при расположении источника звука на горизонтальной плоскости. Глаз наблюдателя должен находиться выше продолжения плоскости, на которой расположен источник звука, для возможности видеть его полностью. Это условие, не ограничивая подъема наблюдателя над источником звука, ограничивает в то же время

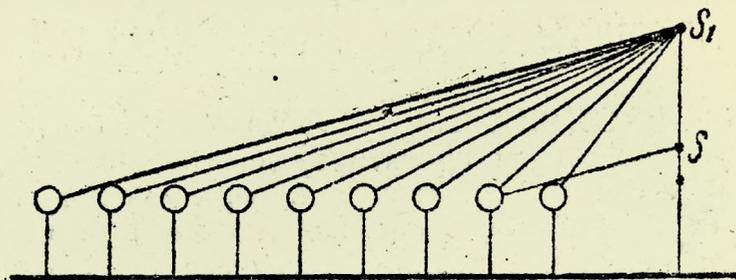


Рис. 45. Условия видимости при расположении мест на горизонтальной плоскости.

подъем последнего над глазом наблюдателя вертикальным расстоянием источника от плоскости, на которой он расположен.

Эти два условия должны быть учитываемы при проектировании помещений, так как удовлетворение их обязательно для доступа к слушателям прямых звуковых лучей.

§ 27. РАСПОЛОЖЕНИЕ СЛУШАТЕЛЕЙ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ. Простейший, издавна применяемый способ улучшения види-

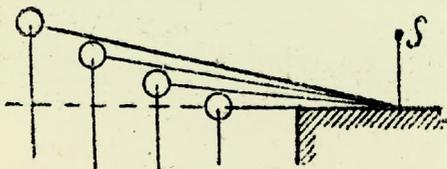


Рис. 46. Условия видимости при расположении объекта на горизонтальной плоскости.

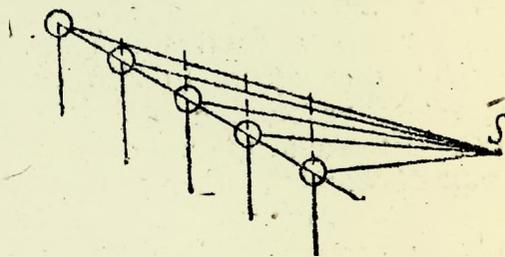


Рис. 47. Условия видимости при расположении мест на наклонной плоскости.

мости состоит в расположении мест восходящими рядами на наклонной плоскости, которая при значительной крутизне подъема снабжается уступами для установки стульев. Выбор наклона не может быть произвольным, так как недостаточный подъем не обеспечивает удовлетворительной видимости, а чрезмерный — неэкономичен и недопустим в практическом отношении и с точки зрения общественной безопасности.

Основанием для выбора наклона служит достижение разницы в уровнях смежных рядов, обеспечивающей свободный доступ прямых лучей ко всем слушателям. Выше (§ 26) был указан способ определения уровня источника звука по расположению слушателей

двух смежных рядов мест. Для определения разницы в уровнях последних требуется разрешить обратную задачу путем проведения через источник звука луча, касательного к вершине головы слушателя ближайшего ряда, и расположения ушей и глаз слушателя последующего ряда не ниже продолжения этого луча. При разрешении той и другой задачи исходным пунктом служит практическая величина вертикального расстояния вершины головы от уровня уха. Это расстояние следует считать не менее 12 см. Таким образом лучи, соединяющие уши слушателей с источником звука, должны превышать уровень ушей передних слушателей не менее 12 см. В крайнем случае, когда по местным условиям трудно обеспечить указанную величину превышения, таковая может быть сокращаема до 6 см, учитывая возможность прохода прямых лучей в промежутке между головами передних слушателей ближайшего ряда.

При расположении мест на наклонной плоскости в наименее выгодных условиях находятся слушатели последнего ряда. Поэтому, обеспечивая потребную величину превышения для последнего ряда, мы получаем избыточную величину его для всех других рядов, которая не требует поэтому дополнительной проверки.

Выбор потребного наклона может быть произведен графическим путем или помощью вычисления. Графический способ, осуществимый построением пробных наклонов и определением наименьших превышений, отличается малой точностью, вследствие малой величины превышения в масштабе чертежа и по сравнению с другими размерами. Наоборот, путем вычисления эта задача может быть разрешена точно и просто.

В виду наличия многих переменных величин, для упрощения задачи надлежит по возможности сократить их число. Для этой цели рекомендуется:

1) расстояние первого ряда мест от источника звука измерять, принимая за единицу глубину ряда мест с округлением результата до целого числа; такое округление не влияет на практическую точность решения задачи, в виду того что источник звука в большинстве случаев обладает некоторой подвижностью;

2) удаление слухового аппарата слушателей от источника звука считать совпадающим с удалением задней границы каждого ряда мест.

Наконец, для определения уровня пола в зависимости от требуемого уровня слухового аппарата принимается в среднем вертикальное расстояние, равное 1,20 м для сидящих слушателей и 1,60 м для стоящих.

Задача по определению подъема наклонной плоскости сводится в общем виде к нахождению вертикального расстояния  $H$  для уха наиболее удаленного слушателя от продолжения прямого луча, соединяющего источник звука с ухом ближайшего слушателя, при заданной величине превышения  $h$ .

При удалении передней границы ближайшего ряда мест от источника звука, равном  $m$  рядов, и удалении слушателя последнего ряда от того же источника в  $n$  рядов из подобия треугольников получаем:

$$\frac{H}{h(n-m-1)} = \frac{n}{m+1}, \text{ откуда } H = nh \frac{n-m-1}{m+1}.$$

Для характеристики системы расположения мест на наклонной плоскости полезно остановиться на следующих примерах.

Пример 1. Дано:  $m = 6$ ,  $n = 16$ ,  $h = 12$  см.

$$H = nh \frac{n - m - 1}{m + 1} = 16 \times 12 \times \frac{9}{7} = 247 \text{ см} = 2,47 \text{ м.}$$

Пример 2: Дано:  $m = 3$ ,  $n = 33$ ,  $h = 12$  см.

$$H = 33 \times 12 \times \frac{29}{4} = 2871 \text{ см} = 28,71 \text{ м.}$$

Из сопоставления этих примеров видно, что при ограниченном числе рядов мест ( $n - m$ ) и особенно при значительной величине  $m$  подъем наклонной плоскости является практически приемлемым, что

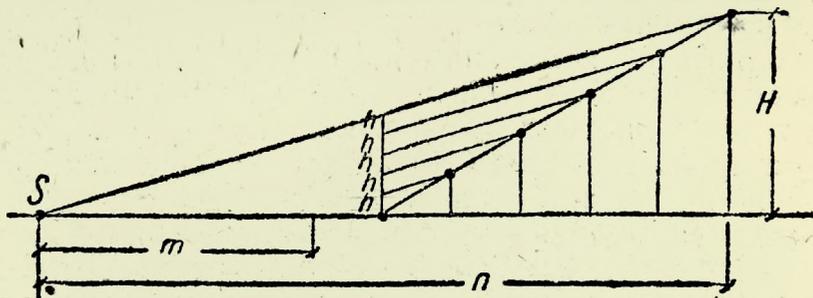


Рис. 48. Определение подъема мест при расположении их на наклонной плоскости.

подтверждает пример 1. При сокращении  $m$  необходимый подъем плоскости быстро возрастает, благодаря одновременному увеличению числителя и уменьшению знаменателя дроби. Пример 2 показывает практическую неосуществимость требуемого наклона, так как при числе рядов  $n - m = 30$  и обычной глубине ряда 0,9 м общая глубина их составляет 27 м, т. е. не достигает величины подъема, причем крутизна наклона превышает  $45^\circ$ , что противоречит условиям общественной безопасности.

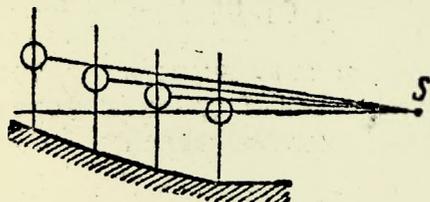


Рис. 49. Расположение мест с наименьшим подъемом.

На основании изложенного, расположение рядов мест на наклонной плоскости практически осуществимо в малом удалении от источника звука лишь для ограниченного числа рядов, с возможным увеличением этого числа при удаленном расположении всей группы мест. Таким образом применение этой

системы целесообразно по ее конструктивной простоте на ярусах и балконах в удалении от источника звука. В иных условиях значительный подъем мест влечет неэкономное использование высоты помещения и ухудшает условия эвакуации.

§ 28. РАСПОЛОЖЕНИЕ СЛУШАТЕЛЕЙ С НАИМЕНЬШИМ ПОДЪЕМОМ МЕСТ. Недостатки системы расположения рядов мест на наклонной плоскости побуждают искать иного более совершенного и экономичного приема. В возможности такового убеждают те избыт-

ки в превышениях прямых лучей над головами слушателей, которые в описанной системе наблюдаются для всех рядов, кроме последнего. Поэтому для возможного сокращения общего подъема мест надлежит отказаться от всякого избытка в указанных превышениях с образованием для всех рядов мест одинаковых условий видимости.

Построение такой системы достигается путем определения уровня каждого последующего ряда мест, исходя из уровня предыдущего, при помощи проведения прямых лучей, касательных к вершинам голов слушателей. При таком построении ряды мест располагаются уже не по наклонной плоскости, а по некоторой вогнутой поверхности с параболической производящей и с постепенно возрастающей крутизной наклона. Построение кривой подъема графическим путем осуществимо лишь в крупном масштабе, в обычном же масштабе чертежей точность его трудно достижима. Поэтому в данном случае, как и при наклонной плоскости, для определения подъема следует предпочесть способ вычисления, а не графический. При этом для эскизного проектирования достаточно знать лишь общую величину подъема для каждой отдельной группы рядов, точное же

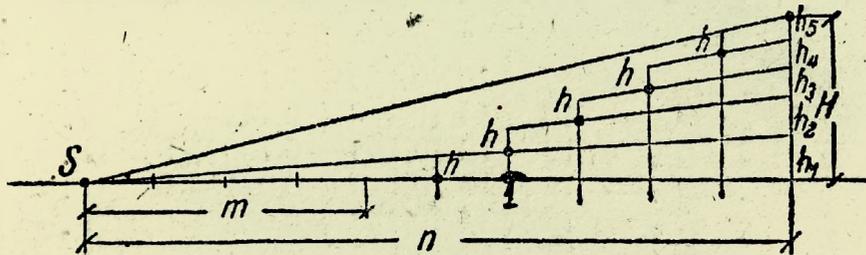


Рис. 50. Определение наименьшего подъема мест.

начертание кривой подъема требует определения уровней промежуточных точек. Для начертания поверхности пола необходимо в каждой из найденных точек отложить вниз по вертикали величину 1,20 м.

Задача в общем виде может быть разрешена на тех же основаниях и с теми же обозначениями, которые были приняты для вычисления подъема наклонной плоскости.

Общая высота подъема  $H$  составляется из ряда отрезков  $h_1, h_2, h_3, \dots$ , постепенно убывающих по величине и выражающих собою влияние превышений отдельных рядов. Величина  $H$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & H = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_{n-m-1} \\
 & \left. \begin{aligned}
 h_1 : h &= n : (m + 1), \text{ откуда } h_1 = \frac{hn}{m + 1} \\
 h_2 : h &= n : (m + 2) \quad \text{''} \quad h_2 = \frac{hn}{m + 2} \\
 & \dots \dots \dots \\
 h_{n-m-1} : h &= n : (n - 1) \quad \text{''} \quad h_{n-m-1} = \frac{hn}{n - 1}
 \end{aligned} \right\} + \\
 & H = hn \left( \frac{1}{m + 1} + \frac{1}{m + 2} + \dots + \frac{1}{n - 1} \right)
 \end{aligned}$$

В данном случае величина  $H$  отличается от той же величины при наклонной плоскости тем, что вместо дроби здесь имеется сумма постепенно убывающих по величине членов ряда. Поэтому как в том, так и в другом случае влияние дополнительного ряда на величину подъема при расположении перед данной группой рядов несравненно значительнее, чем позади этой группы.

На первый взгляд вычисление суммы членов данного ряда может показаться кропотливым, однако, выражая величины их в форме десятичных дробей, можно свести это вычисление к суммированию  $n - m - 1$  слагаемых, так как величины отдельных членов ряда вида  $\frac{1}{n}$  даны во всех справочниках, содержащих математические таблицы.

Общий ход подсчета может быть уяснен на примере, для которого в целях сравнения возможно взять задание примера 1 расположения мест на наклонной плоскости.

Пример 3.  $m = 6n = 16$ ,  $h = 12$  см. Число рядов  $n - m = 10$

Уровень	1-го ряда	$H_1$	.....	=	0
"	2	"	$H_2 = h(m + 2) \frac{1}{m + 1} = 12 \times 8 \times 0,143$	=	13,7 см
"	3	"	$H_3 = 12 \times 9 (0,143 + 0,125)$	=	28,9 "
"	4	"	$H_4 = 12 \times 10 (0,143 + 0,125 + 0,111)$	=	45,5 "
"	5	"	$H_5 = 12 \times 11 (0,143 + 0,111 + 0,100)$	=	63,2 "
"	6	"	$H_6 = 12 \times 12 (0,143 + 0,100 + 0,091)$	=	82,2 "
"	7	"	$H_7 = 12 \times 13 (0,143 + 0,091 + 0,083)$	=	101,9 "
"	8	"	$H_8 = 12 \times 14 (0,143 + 0,083 + 0,077)$	=	122,6 "
"	9	"	$H_9 = 12 \times 15 (0,143 + 0,077 + 0,071)$	=	144,2 "
"	10	"	$H_{10} = 12 \times 16 (0,143 + 0,071 + 0,067)$	=	166,6 "

Общая высота подъема составляет 1,67 м или 67% величины подъема, необходимого при расположении рядов на наклонной плоскости.

Пример 4. Задание примера 2 расположения мест на наклонной плоскости, а именно:  $m = 3$ ,  $n = 33$ ,  $h = 12$  см.

Общая высота подъема по кривой выражается:

$$H = 12 \times 33 (0,250 + 0,200 + 0,167 + 0,143 + 0,125 + 0,110 + 0,100 + 0,091 + 0,083 + 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059 + 0,056 + 0,053 + 0,050 + 0,048 + 0,045 + 0,043 + 0,042 + 0,040 + 0,038 + 0,037 + 0,036 + 0,034 + 0,033 + 0,032 + 0,031) = 880 \text{ см} = 8,80 \text{ м}.$$

Общая высота подъема в данном случае составляет лишь около 30% величины, потребной при расположении рядов на наклонной плоскости. Этот пример не только показывает наглядно экономические преимущества второй системы, но и выясняет вместе с тем, что эта система является единственно осуществимой в неблагоприятных условиях.

Пример 5. Аналогичным путем может быть разрешена обратная задача или по данной высоте общего подъема определена величина превышения для одного ряда.

Дано:  $H = 4,00$  м,  $m = 5$ ,  $n = 35$ ; определить  $h$ .

Из формулы  $H = nh \left( \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{n-1} \right)$  имеем

$$h = \frac{H}{n \left( \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{n-1} \right)}$$

$$h = \frac{400}{35 (0,167 + \dots + 0,029)} = \frac{400}{35 \times 1,83} = 6,2 \text{ см.}$$

Вычисленная величина  $h=6,2$  см, является практически допустимой, так как незначительно превосходит тот минимум превышения, который требуется при учете возможности доступа прямых лучей между головами передних слушателей.

## ЗАДАНИЕ VIII

### ВЫБОР РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ПОМЕЩЕНИЯ

§ 29. АКУСТИЧЕСКАЯ РОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОМЕЩЕНИЯ. Размеры и форма помещения тесно связаны между собой. Задание определяет величину полезной площади, полезного объема, предельных удалений от источника звука и т. п. Сопоставление этих данных позволяет найти геометрическое решение задачи. Однако из возможных геометрических решений не все могут быть равно благоприятны в акустическом отношении и требуют соответствующей оценки для выбора наиболее удачного решения. Вместе с тем не следует переоценивать значения формы, как то делалось в прежнее время, когда нередко акустическое благоустройство ограничивалось исканием акустической формы помещения. Несовершенство такого решения явствует уже из того, что геометрически подобные помещения не являются акустически подобными, потому что изменение линейных размеров может существенно изменять акустические условия, прежде всего в отношении времени опоздания отражений.

Для выяснения акустической роли геометрических элементов помещения возможно рассмотреть несколько типовых случаев, исходя из соотношения силы источника звука и размеров помещения.

1. Если источник звука обладает достаточным количеством энергии для равномерного насыщения объема при помощи отражений, то размеры и форма безразличны, если только они не препятствуют возможности равномерного насыщения.

2. При недостаточном количестве энергии для равномерного насыщения выбор размеров и формы становится далеко не безразличным. От располосения и формы отражающих поверхностей зависит направление и сила отражений для распределения энергии, хотя бы и неравномерного, но в количестве, достаточном для слухового ощущения в местах расположения слушателей. Такие условия возникают в помещениях, близких к предельной вместимости.

3. Наконец, при значительном несоответствии количества энергии и размеров помещения этого количества может хватить лишь для насыщения части объема. Если эта часть не достигает поверхностей, ограничивающих помещение, форма последних безразлична, в

инных же случаях играют роль расположение и форма лишь тех поверхностей, которые участвуют в распределении звуковой энергии. Такие случаи встречаются при разрешении практических задач в условиях открытого пространства, например при устройстве эстрад для музыкантов и т. п.

Первый из описанных типовых случаев имеет наибольшее практическое значение, так как только при равномерном насыщении энергией осуществимо главнейшее требование акустического благоустройства, чтобы все слушатели могли слышать одинаково хорошо. Для осуществления этого требования необходимы два условия: соответствие силы источника звука размерам помещения и отсутствие препятствий к равномерному распределению звуковой энергии.

В отношении силы человеческого голоса возможно основываться на опытах его свободного распространения (§ 7). Объем пространства, заполняемого энергиею голоса с плотностью, достаточной для слуха, составляет около 20000 куб. м при условии неравномерного распределения энергии. Поэтому при насыщении, близком к равномерному, объем этот может быть значительно более. Однако в виду трудности полного устранения различных неблагоприятных влияний Михель предлагает считать указанный объем предельным в помещениях, предназначенных для речи. К таким влияниям относятся трудность достижения полной равномерности насыщения в крупных помещениях, наличие посторонних шумов, значение которых возрастает с размерами помещений и т. д.

По отношению к коллективным источникам звука, как хор и оркестр, имеются практические данные о числе потребных единиц в зависимости от объема помещения. По американским данным один музыкальный инструмент может обслуживать от 150 до 250 куб. м объема помещения по мере возрастания его размеров. Так как объем возрастает быстрее поверхности, то в малых помещениях поглощение поверхностей играет относительно более крупную роль, что и вызывает соответственно большее количество потребной звуковой энергии.

Михель на основании исследования существующих помещений предлагает определять число источников звука с учетом их относительной силы. Для этой цели число потребных единиц определяется по формуле

$$f = \frac{V^{\frac{3}{8}} \log_{10} V}{7,5},$$

где  $V$  — объем помещения в куб. м, число же источников звука должно обеспечивать вычисленное количество единиц, учитывая относительную силу инструментов по нижеследующей таблице

Наименование инструментов	Число единиц
Флейта, щипковые и народные инструменты . . . . .	1
Скрипка, альт . . . . .	2
Кларнет, гобой, фагот . . . . .	3

Наименование инструментов	Число единиц
Виолончель, валторна, средний хоровой голос . . . . .	4
Труба, корнет, пикколо . . . . .	5
Альт, тенор, контрабас . . . . .	6
Баритон, тромбон, литавры, арфа . .	7
Труба, ударные инструменты, барабаны . . . . .	8
Рояль, малый орган . . . . .	10

Среднее число единиц на одного участника ансамбля:

Наименование ансамбля	Число единиц
Народный оркестр . . . . .	1
Хоровой коллектив . . . . .	4
Симфонический оркестр . . . . .	4
Духовой " . . . . .	5

Пример. Для помещения в 6000 куб. м число единиц по формуле Михеля равно 167. Таким образом в помещении указанного объема численность хора определяется в 167 человек, а оркестра в среднем, в зависимости от состава инструментов, около  $167 : 4,5 = 38$  музыкантов. По американским данным состав оркестра допустим в 30 музыкантов. Для музыкального зала Михель предлагает не увеличивать объема свыше 30000 куб. м.

Указанные ограничения вовсе не исключают возможности проектирования помещений более крупных размеров, но устанавливают лишь приближенные практические пределы, при которых можно рассчитывать, что распределение энергии будет близко к равномерному при прочих благоприятных условиях. Вне этих пределов трудно достигнуть одинаково благоприятных акустических условий во всех частях помещения, причем условия распространения энергии приближаются ко второму или даже третьему из описанных типовых случаев.

**§ 30. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ.** Условия распределения звуковой энергии в помещении играют не менее важную роль, чем ее количество. Уже было отмечено выше (§ 13) влияние отражений на распределение энергии и на возможность благодаря им практически равномерного насыщения ею всего объема помещения. Для этой цели требуется наличие отражающих поверхностей и благоприятных условий распределения отражаемой энергии.

Если представить помещение, ограниченное поверхностями, обладающими полным поглощением, то в нем не может быть и речи о равномерном распределении энергии, так как условия ее распространения аналогичны с распространением в открытом пространстве. Наоборот, чем менее поглощение поверхностей, тем сильнее действие отражений. Однако полное отсутствие поглощения практически немыслимо, так как при этом отпала бы основная причина поглощения звука, а кроме того непоглощающих материалов вообще не существует. Поэтому в действительности встречаются промежуточные условия, при которых сила отраженных лучей вообще менее

силы падающих. О потребном количестве поглощения речь будет ниже в связи с выбором материала отражающих поверхностей.

Благоприятное распределение отражаемой энергии прежде всего обуславливается общей формой помещения без резкого преобладания одних размеров над другими, без местных осложнений формы, вызывающих прекращение доступа прямых лучей к некоторым частям помещения, и без применения таких форм отражающих поверхностей, которые нарушают равномерность распределения отражений.

В отношении общих размеров помещения еще в прошлом веке Зелинг установил акустические преимущества зал хороших архитектурных пропорций с благоприятной соразмерностью длины, ширины и высоты. Чем компактнее форма и чем менее разница в линейных размерах, тем легче достигнуть однообразного колебательного состояния упругой среды.

Этому основному условию противоречит всякое осложнение формы в виде выступов, впадин, отдельных столбов и пр. Об акустической роли препятствий в пределах помещения было указано выше (§ 22). Влияние дифракции служит обычно причиной местного понижения плотности энергии и, следовательно, нарушения равномерности насыщения. Так как явление дифракции носит вообще местный характер, то для борьбы с ее вредным влиянием достаточно лишь заботиться о непосредственном доступе к каждому слушателю прямых звуковых лучей.

Наконец, влияние формы отражающих поверхностей на распределение энергии уже было подробно рассмотрено выше (§ 18—20). Плоские поверхности, не изменяющие степени звукорассеяния, могут быть признаны в общем благоприятными по своему равномерному действию. В связи с этим помещения прямоугольной формы с благоприятным соотношением линейных размеров и с плоскими и ограничивающими поверхностями обеспечивают возможность осуществления акустического благоустройства. Поверхности выпуклые, усиливающие звукорассеяние, способствуют в высокой степени рассеянию отражений, но роль их ограничивается малой применимостью в практике проектирования выпуклых форм. Их практическая роль почти исчерпывается круглыми столбами и иными элементами ограниченных размеров, а потому и ограниченного значения. Наконец, поверхности вогнутые вызывают местную концентрацию отражаемой энергии, почему вообще противоречат принципу равномерного ее распределения. Однако их практическая роль в формообразовании помещений и конструктивная роль в применении к сводчатым перекрытиям устраняет возможность отказа от пользования ими по акустическим соображениям, но побуждает к выяснению условий, при которых наличие вогнутых поверхностей может быть не сопряжено с ущербом для акустического благоустройства.

Каждая вогнутая поверхность в той или иной мере способствует уплотнению отражаемой энергии с соответствующим изменением закона падения силы звука на расстоянии. Если источник звука расположен на расстоянии от вогнутой поверхности не более половины радиуса кривизны, направления отраженных лучей сближаются меж-

ду собою, доходя до параллельности и уплотняя отражаемую энергию без концентрации ее. Если удаление источника превосходит половину радиуса кривизны, отражаемая энергия концентрируется в пределах района, равного удвоенному расстоянию от поверхности фокуса отраженных лучей.

Район концентрации противодействует равномерности насыщения не только местным уплотнением энергии, но и образованием смежных районов пониженной плотности или так называемых мертвых точек. Наибольшая степень неравномерности достигается в точках расположения фокусов отраженных лучей. Районы концентрации, а особенно фокусные точки создают участки, неудовлетворительные в акустическом отношении, так как местное возрастание силы звука всегда сопряжено с понижением его качества. Это последнее вызывается резким повышением как основного звука, так и всех случайных посторонних шумов, что делает иногда слуховое ощущение трудно переносимым.

На основании изложенного общим требованиям акустического благоустройства служит

расположение слушателей вне района фокусов и концентрации отражаемой энергии.

Практическое осуществление этого требования достижимо двумя путями:

1) расположением источника звука на расстоянии от поверхности менее половины радиуса кривизны;

2) расположением слушателей на расстоянии от поверхности более удвоенного радиуса кривизны при удаленном расположении источника звука.

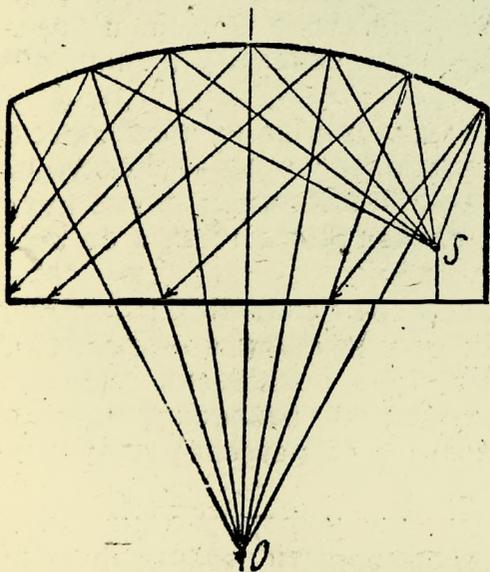


Рис. 51. Отсутствие фокусов при вогнутых поверхностях большого радиуса.

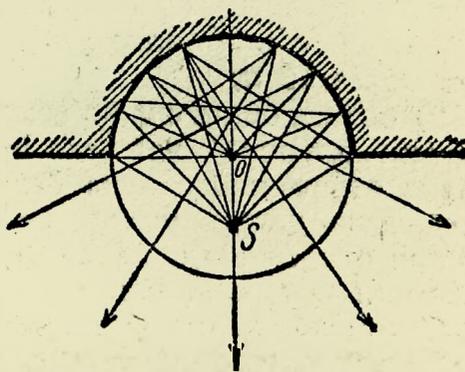


Рис. 52. Рассеивающее действие вогнутых поверхностей.

Первое условие формулируется иногда в более категорической форме требованием, чтобы радиус кривизны вогнутой поверхности превышал не менее двух раз возможные от нее удаления, т. е. ограничение удаления распространяется не только на источник звука, но и на слушателей. В том и другом случае концентрация отражений

отсутствует, но имеется уплотнение отражений, выражающееся замедленным падением их силы. Это условие предусматривает вогнутые поверхности больших радиусов, в частности испарушенные перекрытия с радиусом не менее удвоенной высоты помещения.

Второе условие практически осуществляется при поверхностях с ограниченными радиусами кривизны. Это условие не исключает подвижности источника звука, но не допускает его удаления от поверхности в пределах от половины ее радиуса до центра кривизны. Эти удаления сопряжены с крайне неустойчивой величиной района концентрации, быстро изменяющейся при незначительном передвижении источника. Если же удаление источника превышает радиус кривизны, то вне района концентрации осуществляется усиленное рассеяние отраженной энергии, аналогично с выпуклыми поверхностями.

Таким образом наличие вогнутых поверхностей не исключает возможности акустического благоустройства, однако при обязательном учете вышеизложенных условий.

**§ 31. УСТРАНЕНИЕ ВРЕДНЫХ ОТРАЖЕНИЙ.** Последним вопросом, связанным с выбором размеров и формы помещения, служит устранение вредных отражений. Выше было указано (§ 14), что вредными отражениями являются такие, которые при достаточной силе опаздывают свыше допустимого предела и тем нарушают ясность чередующихся звуков. Явление это выражается в форме продления звука, а при значительном опоздании даже в форме повторения звука или эха.

Так как наличие отражений вообще представляет ценное акустическое свойство помещений, способствующее усилению звука и равномерности распределения звуковой энергии, то в борьбе с вредными отражениями необходимы меры к сохранению и усилению полезных.

Вредными отражениями согласно вышеизложенному признаются:

1) опаздывающие против прямых лучей более чем на 0,05 секунды и на 0,035 секунды для музыки, что отвечает разнице в длине пути отраженного и прямого лучей в первом случае более 17 м, а во втором более 12 м;

2) обладающие силою свыше одной четверти силы прямых лучей (ориентировочно), для чего при плоских отражающих поверхностях длина отраженного луча без учета потери на поглощение должна превышать длину прямого не менее двух раз; при неплоских поверхностях относительная сила отражений зависит от рассеивающей способности поверхностей.

Таким образом при установлении размеров и формы помещения возникает потребность обследования возможности возникновения вредных отражений. Такое обследование начинается с фиксирования расположения источника звука, а при подвижном источнике — с установления крайних и наиболее характерных точек его расположения. Высота стоящего оратора принимается обычно в 1,60 м, а сидящих слушателей в 1,20 м. Обследование состоит в построении соответствующих отраженных лучей и в сопоставлении их длины с прямыми лучами. Разница в длине отраженного и прямого лучей определяет время опоздания, причем лучи, опаздывающие менее

установленного практического предела, не могут быть вредными. При величине разницы выше предельной для признания отражений вредными требуется дополнительно сравнение силы прямого и отраженного лучей.

Устранение вредных отражений возможно путем соответствующего подбора размеров, формы и материала. Изменяя размеры, возможно изменить относительную длину отраженного и прямого лучей и тем сократить время опоздания или ослабить силу отражения до допустимых пределов. Путем изменения формы отражающей поверхности возможно ослабить силу отражения, придавая поверхности рассеивающие свойства, или же сократить время опоздания, меняя направление отражений. Наконец, применяя сильно поглощающий материал для отражающей поверхности, можно ослабить силу любого вредного отражения. Однако этот последний прием менее желателен, чем другие, потому что вызывает непроизводительную потерю энергии на поглощение вместо использования ее в более благоприятных условиях.

Соображения об экономическом расходовании энергии получают практическую важность во всех случаях, когда энергия прямых лучей оказывается недостаточной или когда благодаря энергии отражений возникает возможность поставить всех слушателей в одинаково благоприятные акустические условия.

Наименее допустимую форму вредного отражения представляет эхо или повторение звука. Для образования эха необходимы достаточное опоздание отражения и достаточная сила его. Опоздание может быть тем ограниченнее, чем меньше продолжительность звука. Для звуков мгновенной продолжительности величина потребного опоздания составляет 0,055—0,066 секунды. Для этого длина отраженного луча должна превосходить длину прямого не менее 19—23 м, т. е. немногим более предела, характеризующего вредные отражения. В отношении силы эха сохраняется условие, общее для всех вредных отражений, согласно которому сила отражения должна находиться в соответствии с силою основного звука и составлять не менее одной четверти силы продления звука в момент его совпадения с эхом.

Обследование помещений с целью устранения вредных отражений предусматривает вместе с тем и устранение эха. Однако возможность легкого перехода отражений в эхо при наличии вогнутых поверхностей требует в соответствующих случаях особой внимательности при производстве обследования.

## ЗАДАНИЕ IX

### ВЫБОР МАТЕРИАЛА

§ 32. АКУСТИЧЕСКАЯ РОЛЬ МАТЕРИАЛА. При расследовании вопросов, касающихся выбора размеров и формы помещения, была установлена во многих случаях тесная связь их с выбором материала. В акустическом отношении основную роль играют не строительные, а отделочные материалы, применяемые для поверхностей, ограни-

чивающих помещение, и для предметов обстановки и оборудования. Акустические качества их в первую очередь характеризуются присвоенным им коэффициентом поглощения звука (§ 12). Основные конструкции получают при этом второстепенное значение, поскольку они влияют на величину коэффициента поглощения или на резонирующую способность образуемого им элемента (§ 23). Так, штукатурка по дереву обладает несколько большим коэффициентом поглощения, чем штукатурка по камню и т. п. Равным образом от жесткости конструкции, ее массы и напряженности зависят резонирующие свойства поверхности, влияющие как на величину поглощения, так и на распределение звуковой энергии.

Поглощение материала служит основной причиной погашения звука в помещении, а величина коэффициента поглощения характеризует ослабление звука при каждом отражении. Таким образом выбор материала является одним из средств к устранению акустических недостатков в форме вредных отражений путем их ослабления. Но очевидно, что этот же прием может служить и для усиления полезных отражений, что устанавливает тесную связь между выбором материала и силой звука в помещении. Возможно доказать, что при равномерном распределении звуковой энергии сила звука обратно пропорциональна количеству единиц поглощения. В помещении, ограниченном поверхностями из однородного материала, это количество выражается произведением величины поглощающей поверхности на ее коэффициент поглощения, а в более общем случае, при наличии различных материалов, — суммой произведений составляющих площадей на соответствующие им коэффициенты поглощения. Называя площади поверхностей из различных материалов через  $S_1, S_2, S_3$  и т. д. и их коэффициенты поглощения  $a_1, a_2, a_3$  и т. д., получаем  $aS = a_1S_1 + a_2S_2 + a_3S_3 + \dots$ , где  $S$  представляет сумму всех поверхностей, а  $a$  — средний коэффициент поглощения. Таким образом сила звука в помещении тем значительнее, чем менее средний коэффициент поглощения, причем колебания силы звука в зависимости от выбора материала возможны в пределах колебаний среднего коэффициента поглощения.

Считаясь с влиянием отражений на равномерность распределения звуковой энергии, нельзя не остановиться на вопросе рационального выбора материала в связи с расположением отражающих поверхностей по отношению к источнику звука. Если вблизи источника сосредоточить поверхности, наиболее поглощающие, то отражения будут мало способствовать усилению звука, так как значительная часть энергии будет поглощена в месте ее возникновения. В обратных условиях отражения могут мало уступать по силе прямым лучам и способствовать насыщению всего объема помещения, прежде чем достигнуть поглощающих поверхностей вдали от источника. Эти соображения учитывались еще в прошлом веке в форме практического правила, рекомендующего

располагать вблизи источника звука хорошо отражающие и резонирующие поверхности с заглушением всех остальных.

Это правило сохраняет свое значение и в настоящее время, особенно для крупных помещений, когда имеются основания ожидать, что энергия источника звука недостаточна для равномерного насыщения всего объема. При обычном расположении источника не в центре, а вблизи одной из стен помещения, такая мера обуславливается потребностью направления энергии в отдаленные от источника районы, для того чтобы приблизить ее распределение к равномерному.

§ 33. РЕВЕРБЕРАЦИЯ. Из вышеизложенного ясно, что акустические качества помещения тесно связаны с общим количеством поглощения. Наличие поглощения практически необходимо в каждом помещении, как основная причина погашения звука. Однако избыток поглощения является нередко крупным недостатком, понижающим силу звука и препятствующим равномерному распределению звуковой энергии. Таким образом возникает важный практический вопрос о потребном количестве поглощения в каждом частном случае.

Учет количества поглощения в существующих помещениях может быть произведен путем наблюдения за продолжительностью отголосков после прекращения звука, или так называемой реверберацией. При малом поглощении в помещениях с хорошо отражающими поверхностями и при отсутствии людей и предметов обстановки можно наблюдать отголоски продолжительностью до десяти и более секунд. Благодаря тому, что отголоски образуют более или менее продолжительный гул, такие помещения признаются гулками. Наоборот, в противоположность пустым помещениям, в помещениях с избытком элементов поглощения отголосков почти не наблюдается, но звуки носят сухой, заглушенный и безжизненный характер. В этом и другом случае качество звука является неудовлетворительным, вследствие гулкости или заглушенности.

При производстве подобных наблюдений нетрудно убедиться, что гулкость возрастает с увеличением размеров помещения и что заглушенность легче достигается в помещениях ограниченных размеров. Из этого можно сделать вывод о существовании зависимости между размерами помещения и количеством поглощения, так как одно и то же количество может быть избыточным для малого и недостаточным для крупного объема.

Действительно при данном среднем коэффициенте поглощения погашение звука осуществляется тем быстрее, чем большее число отражений происходит в единицу времени, т. е. в малом помещении быстрее, чем в большом. Равным образом время погашения возрастает с уменьшением коэффициента поглощения, так как при этом возрастает число потребных отражений. Поэтому данная продолжительность отголосков достигается в малом помещении при относительно меньшем коэффициенте поглощения, чем в более крупном. Эти соображения показывают, что геометрически подобные помещения не являются подобными акустически, так как качество звука, связанное с продолжительностью отголосков и реверберацией, изменяется с изменением размеров.

Таким образом реверберация является важнейшим признаком, характеризующим акустические качества помещения в связи с выбором материала. Роль реверберации подтверждается тем обстоятельством, что при надлежащем выборе размеров и формы поме-

щения реверберация сохраняет практически постоянную величину, почти независимо от расположения источника звука, слушателя и главных элементов поглощения. Впервые это было установлено Сабином, а позднее подтверждено другими исследователями.

Указанное постоянство реверберации связано с осуществимостью равномерного распределения звуковой энергии и служит наглядным подтверждением такой равномерности. Основываясь на этом, Сабин установил зависимость между реверберацией, объемом помещения и количеством единиц поглощения. Эта зависимость выражается простой формулой, носящей название формулы Сабина и имеющей следующий вид:

$$t = \frac{0,164 V}{aS},$$

в которой  $t$  представляет время реверберации в секунду,  $V$  — объем помещения в куб. м и  $aS$  — общее количество единиц поглощения, или так называемых сабинов, исчисляемых, как было указано выше (§ 32), и представляющих сумму произведений количества элементов поглощения на соответствующие коэффициенты поглощения. Эта формула показывает, что реверберация зависит от объема помещения и изменяется пропорционально ему; что она обратно пропорциональна количеству поглощения и, наконец, зависит от силы звука, причем численный коэффициент в формуле Сабина определен для стандартной реверберации, за которую условно принята реверберация, отвечающая силе звука в миллион раз более силы порога слухового ощущения, т. е. в 60 децибелов.

Содержание этой формулы может быть обосновано практическими соображениями. При данной силе звука в большем объеме содержится относительно большее количество звуковой энергии, почему и погашение звука требует большего промежутка времени. В свою очередь этот промежуток может быть сокращаем при данном объеме путем применения сильно поглощающих материалов или путем увеличения поглощающих поверхностей. Для помещений данного объема реверберация тем продолжительнее, чем менее отношение объема помещения к его поверхности. Наименьшая величина этого отношения получается при шарообразной форме и составляет одну треть радиуса; при кубической форме то же отношение выражается одной шестой частью стороны куба. Ясно, что чем компактнее форма помещения и чем ближе она к кубу или шару, тем выше должны быть коэффициенты поглощения поверхностей для сохранения заданной величины реверберации.

Пользуясь формулой Сабина, возможно путем весьма простого подсчета определить по проекту реверберацию любого помещения по его размерам, форме и материалу. Равным образом, из сопоставления нескольких вариантов разрешения задачи возможно учесть влияние отдельных элементов на акустический результат для выбора наиболее удачного решения. Подобного же рода подсчеты возможны и для анализа акустических качеств существующих помещений на основании обмеров геометрических элементов и учета поглощающих свойств материалов.

Для этой последней цели однако существуют иные приемы не-

посредственного измерения реверберации экспериментальным путем, помощью специальных приборов, называемых реверберометрами. Эти приборы позволяют измерять реверберацию с весьма большой точностью, неосуществимой при обычном наблюдении, вследствие трудности определения момента начала реверберации. Принцип реверберометра состоит в том, что наблюдатель, расположенный в изолированном помещении, слышит только реверберацию, не слыша основного звука, и может точно отмечать ее продолжительность по хронографу. Для этой цели наблюдатель сообщается с исследуемым помещением помощью телефона, цепь которого посредством особого приспособления замыкается как раз в момент прекращения действия источника звука. Многократные опыты при помощи таких приборов подтверждают возможность достижения постоянства реверберации в пределах помещения и совпадения по времени наблюдаемой реверберации с вычисленной по формуле Сабина.

§ 34. ОПТИМУМ РЕВЕРБЕРАЦИИ. Зная, что реверберация по местным условиям может изменяться в широких пределах и что как избыточная, так и недостаточная реверберация неблагоприятно отражаются на качестве звука, необходимо поставить вопрос о наиболее благоприятной ее величине или так называемом оптимуме реверберации.

Первый исследователь в этой области Сабин подошел к этому вопросу путем изменения в исследуемом помещении количества поглощения. Для этой цели он пользовался подушками для сидения и определял при участии экспертов ту величину реверберации, которая для данного объема обеспечивала наилучший акустический результат. Для небольших помещений при объеме 100—200 куб. м величина оптимума реверберации была им определена в среднем равной 1,08 секунды. Лифшиц на основании последующих опытов рекомендует принимать эту величину в 1,06 секунды.

Для выяснения зависимости между величиною оптимума реверберации и объемом помещения был обследован ряд помещений, заведомо благоприятных в акустическом отношении. Результаты такого обследования показывают некоторую закономерность в возрастании оптимума при увеличении объема. Эти результаты сведены Михелем в следующей таблице.

Объем помещения	Реверберация в секундах
300	0,6—0,8
700	0,8—1,1
1500	0,9—1,3
3000	1,2—1,5
6000	1,4—1,7
12000	1,7—2,0
18000	1,8—2,2
25000	1,9—2,3
30000	2,1—2,5

Практические обследования послужили основаниями к выработке эмпирических формул для определения оптимума реверберации по данному объему помещения.

Петцольд предлагает пользоваться формулой следующего вида:

$$t = 0,0325 \sqrt[3]{V} + 1$$

где  $t$  — реверберация в секундах и  $V$  — объем в куб. м. Эта формула рекомендуется для объемов не менее 5000 куб. м. Аналогичная формула

$$t = 0,036 \sqrt[3]{V} + 0,907$$

предложена Михелем без ограничения объема. Исследования Ватсона, произведенные им в ряде музыкальных зал, достаточно приближенно выражаются формулой

$$t = \sqrt{0,164 \sqrt[3]{V}}$$

причем значения  $t$  в соответствии со специальным назначением получаются несколько большие, чем по первым двум формулам.

Иным путем подошел к разрешению этого вопроса Лифшиц. Обратив внимание, что величина звукового восприятия зависит от силы и времени звучания, он предположил, что сила впечатления пропорциональна времени звучания. В связи с этим предположением и зная, что наиболее благоприятное впечатление в малых помещениях достигается при реверберации в 1,06 секунды, он пришел к заключению, что реверберация крупного помещения должна возрастать обратно пропорционально ослаблению интенсивности звука. На основании этого вывода он получил следующее уравнение для определения оптимума реверберации.

$$(10,23 - \lg_{10} V) t_{\text{opt}} + 0,97 (0,4 - \lg_{10} V) t_{\text{opt}}^{\frac{1}{2}} = 6.$$

Результаты подсчетов по уравнению Лифшица весьма близко сходятся с теми, которые получаются на основании эмпирических формул, что показывает близость к действительности указанных теоретических предпосылок.

Для сопоставления результатов, получаемых при подсчетах по различным формулам, определим оптимум реверберации для зала с объемом в 12000 куб. м, для которого благоприятная величина реверберации по таблице Михеля колеблется от 1,7 до 2,0 секунд.

По формуле Петцольда  $t = 0,0325 \sqrt[3]{12000} + 1 = 1,74$  сек.

По формуле Михеля  $t = 0,036 \sqrt[3]{12000} + 0,907 = 1,73$  сек.

По уравнению Лифшица  $t = 1,74$  „

Наконец, по формуле Ватсона для музыкальных зал

$$t = \sqrt{0,164 \sqrt[3]{12000}} = 1,94 \text{ сек.}$$

Результаты всех подсчетов укладываются в пределах таблицы Михеля, причем для помещений универсального назначения величина реверберации совпадает почти полностью и лишь для музыкальных зал получает несколько большее значение.

Таким образом таблица Михеля может быть принята для практического пользования со следующими оговорками. Высшие значения реверберации относятся к концертным залам и оперным театрам, и низшие удовлетворяют залам универсального назначения. В залах

типа аудиторий и драматических театрах время реверберации с успехом может быть сокращаемо против низших значений таблицы, так как в целях благоприятной артикуляции, по данным Кнудсена, величина реверберации допустима примерно на 40% менее вышеуказанной. Наконец, для звукового кино, считаясь с разнообразием репродуцируемого звукового материала, целесообразно придерживаться условий, пригодных для зал универсального назначения.

Во всех случаях при потребности сокращения реверберации рекомендуется в качестве экономического приема сокращение объема помещения, вызывающее соответственное повышение силы звука. Только при недопустимости такого сокращения следует прибегать с той же целью к увеличению количества поглощения, которое неизбежно сопряжено с потерей силы звука в помещении. Однако этот прием широко применяется при устройстве студий для звукового кино, чтобы устранить влияние реверберации на звуковую запись и при репродукции иметь звуки по возможности в том виде, как они возникают в источнике.

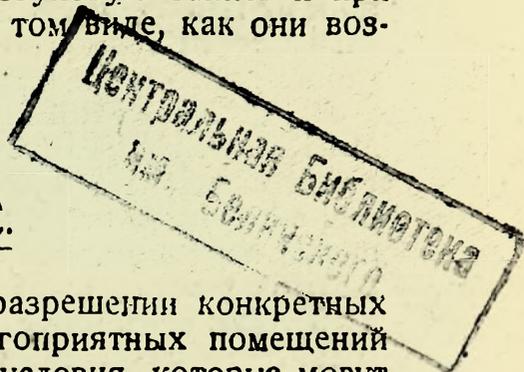
## ЗАДАНИЕ X

### АКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.

§ 35. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ. При разрешении конкретных задач по проектированию акустически благоприятных помещений надлежит обращать особое внимание на те условия, которые могут влиять на акустические качества помещения.

В техническом задании должно быть точно сформулировано назначение помещения с указаниями на особенности, ограничивающие выбор размеров, формы и материала. Назначение помещения связано с относительной ролью технических качеств звука (§ 1), влияющих в свою очередь на выбор величины оптимума реверберации. Вместимость помещения играет решающую роль при определении его площади и объема. Удовлетворение оптических требований наравне с акустическими, связанное с сокращением предельных удалений, отражается на выборе формы помещения в плане и разрезе. Дополнительными условиями того же порядка являются сменность публики в зале, влияющая на систему эвакуации, освещаемость дневным светом, приспособление для различных трансформаций с изменением назначения или вместимости и т. п.

По ходу проектирования надлежит принять в основу такой порядок, который приводил бы к цели по возможности без переделок и исправлений проделанных частей работы. Для этой цели работу следует начинать с определения полезной площади помещения, исходя из его назначения и вместимости. В тесной связи с величиною площади стоит выбор ее формы, отвечающей желательным удалениям, условиям эвакуации и т. п. Попутно разрешается вопрос о необходимости дробления этой площади на части с расположением их на разных уровнях в форме террас или балконов, свешивающихся над нижележащим пространством. Совокупность соображений этого порядка позволяет подойти обоснованно к определению объема по-



мещения, завершающего его геометрическое оформление. С этой работой связаны вопросы урегулирования распределения звуковой энергии и устранения вредных отражений.

Однако геометрическое оформление еще не разрешает задачи в полном объеме, так как акустическое благоустройство связано с надлежащим выбором материала. От этого выбора зависит количество поглощения и величина реверберации. Основывая этот выбор на условиях целесообразности и осуществимости, надлежит определить величину реверберации по данным проекта и сопоставить ее с величиной оптимума для данного объема и назначения. При существенном расхождении этих величин дальнейшая работа должна выразиться в таком изменении проекта, которое устраняет указанное расхождение и приближает проектную величину реверберации к оптимальной.

Так как величина реверберации зависит не только от материала, но и от геометрических элементов помещения, то на основании этой зависимости возможно сделать полезные практические выводы для упрощенного разрешения задач по акустическому проектированию.

§ 36. СВЯЗЬ РЕВЕРБЕРАЦИИ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПОМЕЩЕНИЯ. Расхождение проектной реверберации с оптимальной ее величиной представляет в процессе проектирования обычное явление, причем значительно чаще наблюдается превышение первой величины над второю, чем наоборот. Устранение такого расхождения возможно как путем изменения геометрических элементов, так и материала. Для сокращения величины реверберации геометрическим путем требуется сокращение объема помещения или увеличение поверхностей элементов поглощения. Однако акустически выгодное сокращение объема помещения неизбежно сопровождается невыгодным сокращением площади поглощающих поверхностей. Поэтому для сокращения реверберации действительно только такое сокращение объема, при котором относительное изменение его величины превосходит относительное изменение площади поверхностей. Задача осложняется и для окончательного разрешения требует нескольких пробных решений.

Знакомство с величиной оптимума реверберации и изменениями ее в зависимости от объема помещения дает возможность внести существенные упрощения для приближенного разрешения поставленной задачи. По установленной зависимости между величиной оптимума реверберации и объемом помещения нетрудно определить по формуле Сабина общее количество единиц поглощения, а вместе с тем и количество их на единицу объема помещения. Общее количество поглощения определяется по формуле

$$aS = \frac{0,164 V}{t_{\text{opt}}}$$

а число единиц поглощения на единицу объема

$$\frac{aS}{V} = \frac{0,164}{t_{\text{opt}}}$$

Первый график дает количество поглощения в зависимости от объема при величине оптимума реверберации по данным таблицы Михеля (§ 34), причем меньшие значения по нижней границе заштрихованной полосы отвечают музыкальным залам, а по верхней ее границе — залам универсального назначения.

Ординаты первого графика дают непосредственно количества единиц поглощения, отвечающие оптимуму реверберации в зависимости от объема. Зная потребное количество поглощения, возможно обоснованно подойти к выбору материалов по величине площади ограничивающих помещение поверхностей и по количеству иных элементов поглощения.

Пример. Для зала универсального назначения размерами  $25 \times 12 \times 10$  м и объемом в 3000 куб. м количество поглощения по

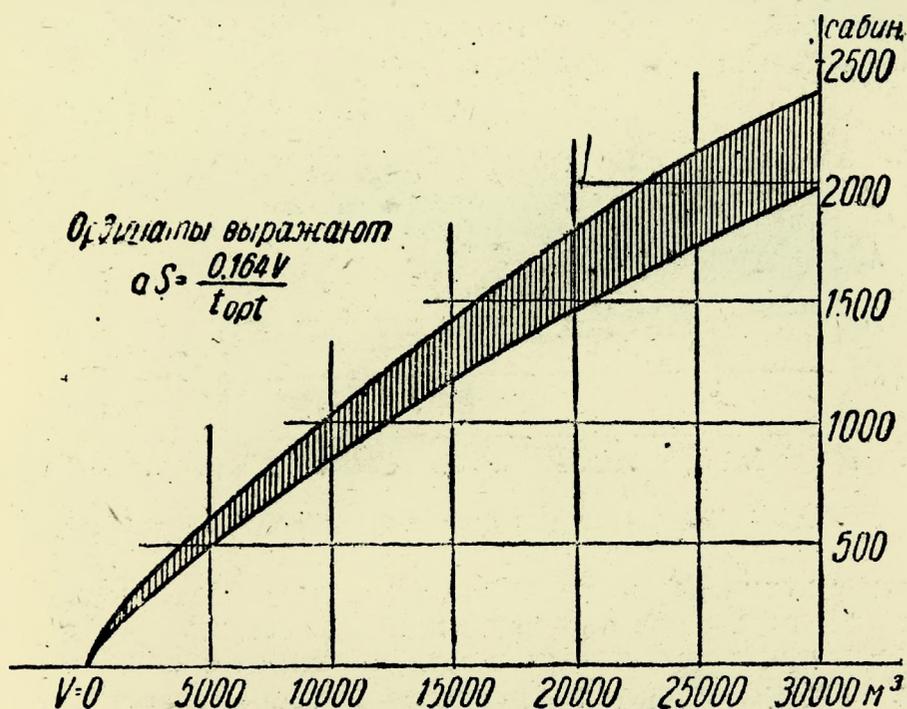


Рис. 53. Количество поглощения в зависимости от объема.

графику составляет 410 единиц. При вместимости зала в 500 человек с поглощением в  $500 \times 0,44 = 220$  единиц на остальные элементы поглощения остается  $410 - 220 = 190$  единиц. Площадь ограничивающих зал поверхностей составляет 1340 кв. м, что требует применения материалов со средним коэффициентом поглощения  $190 : 1340 = 0,14$ . Подсчет показывает невозможность в данных условиях ограничиться основными строительными материалами с малыми коэффициентами поглощения и необходимость применения отделочных сильно поглощающих материалов.

Второй график дает количества поглощения на единицу объема в различных конкретных условиях и помогает оценить эффективность изменения объема для достижения оптимальной реверберации. Ординаты графика выражены в процентах единицы поглощения или одного сабина. Минимальные значения относятся к му-

зыкальным залам, а максимальные — к залам универсального назначения.

**Пример.** В зале универсального назначения при объеме в 3000 куб. м, согласно подсчету в предыдущем примере, средний коэффициент поглощения определен в 0,14. Как изменится этот коэффициент при сокращении высоты зала на 2 м?

При площади зала в 300 кв. м указанное сокращение высоты уменьшает объем на 600 куб. м. По второму графику для зала данного объема для достижения оптимума на каждый куб. м требуется около 0,14 единиц поглощения. Таким образом при сокращении объема потребное количество поглощения сокращается на  $600 \times 0,14 = 84$  единицы, и поглощение поверхностей помещения снижается до  $190 - 84 = 106$  единиц. При общей площади ограничивающих поверхностей в 1340 кв. м средний коэффициент снижается до  $106 : 1340 = 0,08$ , что дает возможность обойтись без применения сильно поглощающих материалов.

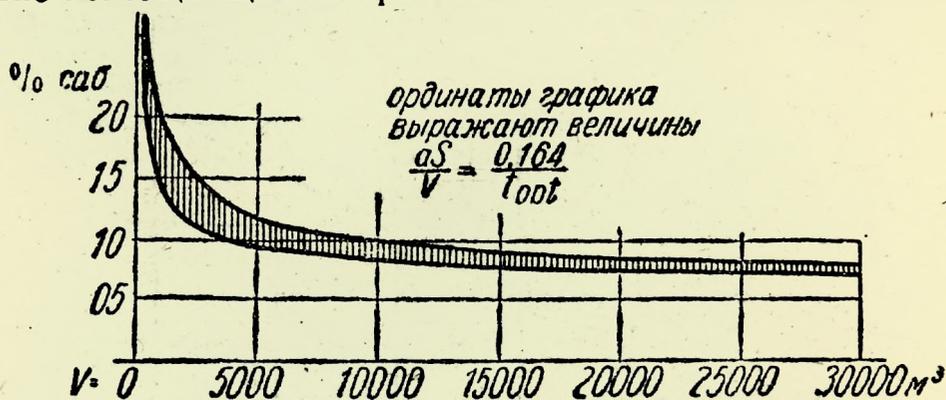


Рис. 54. Количество поглощения на один кубометр объема.

В связи с этими двумя графиками получает практическое значение третий график, определяющий количество куб. м объема, потребное на одного слушателя, в зависимости от общего объема помещения. Каждый слушатель представляет собою элемент поглощения с коэффициентом 0,44. Ординаты графика могут быть вычислены путем деления этой величины на количество поглощения, потребное на один куб. м объема согласно второму графику. Таким образом ординаты третьего графика выражают величины

$$\frac{0,44}{aS} = \frac{0,44 V}{aS}$$

В этом графике в расхождении с другими максимальные значения отвечают музыкальным залам, а минимальные — залам универсального назначения.

Определяемое по графику количество куб. м объема на одного слушателя могло бы служить для непосредственного вычисления предельной вместимости по объему зала, если бы в нем не было иных элементов поглощения. Однако с наличием таких элементов в форме ограждающих поверхностей, предметов обстановки и оборуду-

дования, дополнительное поглощение связано с дополнительным увеличением объема. Потребный объем на одного слушателя должен быть во столько раз более определенного по графику, во сколько общее поглощение более поглощения слушателей. Таким образом объем на слушателя по графику представляет собою тот жесткий минимум, который в каждом практическом случае должен быть превзойден в той или иной мере. Существенно важно, что указанный минимум колеблется в довольно широких пределах, возрастая с увеличением объема сперва быстро, а затем с постепенным замедлением. Поэтому и практическая величина объема на одного слушателя в крупных залах может существенно превышать таковую в помещениях ограниченных размеров и колебаться в пределах от 4 до 8 куб. м и даже более в помещениях особо крупных размеров.

§ 37. СВЯЗЬ РЕВЕРБЕРАЦИИ С ВЫБОРОМ МАТЕРИАЛОВ. Зависимость реверберации от выбора материалов для устройства поме-

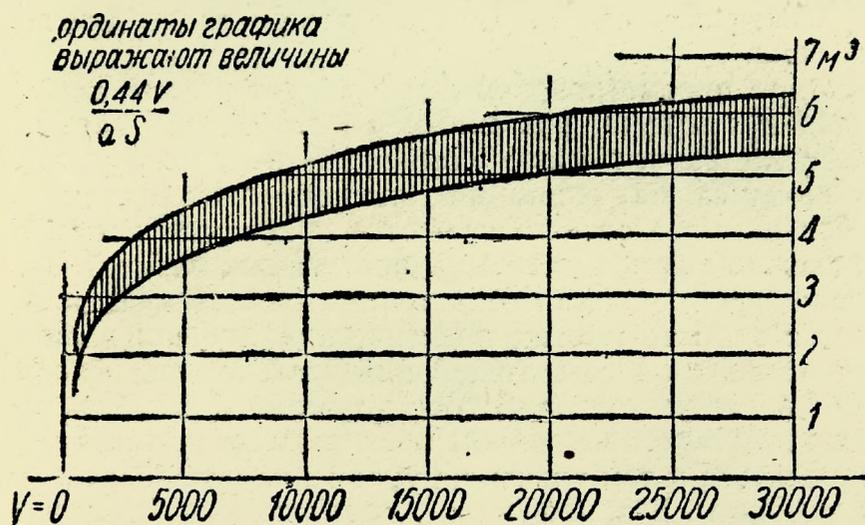


Рис. 55. Количество кубометров объема на одного слушателя без учета дополнительного поглощения.

щения осложняется наличием иных элементов поглощения. К таким элементам относятся не только слушатели, акустическая роль которых в большинстве случаев имеет преобладающее значение, но и переносные предметы обстановки, оборудования и декоративного убранства. Практически целесообразно разделять элементы поглощения на постоянные и временные, причем к временным относить такие, которые могут частично или полностью отсутствовать в помещении.

Акустический расчет по условиям задания ведется на некоторую совокупность постоянных и временных элементов. Вместимость помещения принимается в расчет полная, на три четверти, на две трети и т. п., с учетом наиболее вероятных условий заполнения. Особо может быть учитываемо наличие иных предметов, обладающих значительным поглощением. Всякое отклонение от расчетных условий сопровождается понижением качества звука вплоть до его неудовлетворительности. Поэтому существенно важно принятие мер к возможному устранению вредного влияния таких отклонений.

Акустические качества помещения тем менее подвержены переменам, чем значительнее роль постоянных элементов поглощения по сравнению с временными. Таким образом отношение количества единиц постоянного поглощения к количеству расчетного временного может быть рассматриваемо как показатель акустической устойчивости помещения. Остается коснуться вопроса о желательной величине указанного отношения и о мерах ее обеспечения.

Постоянное поглощение всегда менее временного, достигаемого в помещении при наличии слушателей и иных временных элементов поглощения. По экспериментальным данным Ватсона для акустически благоприятных помещений постоянное поглощение составляет 0,5 — 0,6 временного, причем первая величина является характерной для аудиторий, а вторая — для крупных музыкальных зал. Во всех случаях реверберация пустого зала не превышает реверберации заполненного более чем в два раза. К тем же выводам приходит Михель, допуская указанное возрастание реверберации для помещений малого объема.

Однако при проектировании легко убедиться, что далеко не всегда удается достигнуть указанных соотношений, гарантирующих благоприятную акустическую устойчивость помещения. Препятствием к этому служат экономические соображения, так как полезными в большинстве случаев являются временные элементы поглощения, а введение дополнительных постоянных элементов только по соображениям устойчивости невыгодно отражается на силе звука.

В связи с этим во многих практических случаях количество поглощения от наличия слушателей значительно превосходит поглощение остальных элементов. Это обстоятельство отражается на акустических качествах помещения, поскольку количество слушателей может изменяться и тем влиять на уклонение реверберации от оптимальной величины. В помещениях для сидящей публики возможно в значительной мере устранить этот недостаток путем устройства сильно поглощающей мебели для сидения. Тогда акустическая роль слушателя, как элемента поглощения, существенно сокращается и выражается разностью между коэффициентами поглощения слушателя и мебели для сидения. Из таблицы коэффициентов поглощения (§ 12) можно видеть, что благодаря мягкой мебели влияние колебаний в числе слушателей может быть ослаблено более чем наполовину, и помещение обеспечено благоприятной акустической устойчивостью.

Та же цель в известной мере может быть осуществляема установкою регуляторов поглощения, под которыми разумеются поглотители с переменным количеством поглощения. К таковым относятся завесы, жалюзи, ширмы и т. п., могущие по своему устройству изменять величину поглощающей поверхности. Практическим примером подобного устройства могут служить залы, приспособляемые по мере надобности под звуковое кино. Сокращение реверберации для этой цели может быть осуществляемо помощью оконных завес из сильно поглощающей материи, служащих в то же время для затемнения окон.

§ 38. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА. Пример 1. Требуется проверить пригодность концертного зала в акустическом отношении. Зал прямо-

угольный, размерами  $30 \times 14$  м, высотой 7 м; вместимость его — 560 человек. Пол зала — деревянный, стены каменные, оштукатуренные, потолок оштукатурен по дереву, отверстие сцены имеет размеры  $6 \times 10 = 60$  кв. м.

Для определения реверберации пользуемся формулой Сабина (§ 33)

$$t = \frac{0,164 V}{aS}$$

Объем зала  $V = 30 \times 14 \times 7 = 3000$  куб. м.

Поглощение по данным таблицы коэффициентов поглощения (§ 12) составляется из следующих элементов:

Пол деревянный . . . . .	$420 \times 0,061 =$	25,6
Потолок, оштук. по дереву . . . . .	$420 \times 0,034 =$	14,3
Стены кам. оштукат. . . . .	$556 \times 0,025 =$	13,9
Отверстие сцены . . . . .	$60 \times 0,250 =$	15,0

Итого . . . 68,8

Слушатели  $560 \times 0,44$  . . . . . 246,4

315,2

или округленно 315 единиц поглощения.

$$t = \frac{0,164 \times 3000}{315} = 1,56 \text{ секунды.}$$

Верхний предел благоприятной реверберации для данного объема по таблице Михеля (§34) составляет 1,50 секунды. Таким образом вычисленная реверберация превышает предельную, причем требуемое количество поглощения может быть определено по формуле  $aS = \frac{0,164 V}{t_{\text{opt}}} =$

$$= \frac{0,164 \times 3000}{1,5} = 328 \text{ единиц; не хватает } 328 - 315 = 13 \text{ единиц, ко-}$$

торые должны быть добавлены при выборе отделочных или декоративных материалов.

**Пример 2.** Определить вместимость того же зала, отвечающую благоприятной реверберации.

Для объема в 3000 куб. м реверберация в условиях концертного зала равняется 1,5 сек. Количество единиц постоянного поглощения — 68. По формуле  $aS = \frac{0,164 V}{t}$  имеем

$$68 + 0,44 n = \frac{0,164 \times 3000}{1,5} = 328,$$

откуда  $0,44 n = 260$ , и  $n = 590$  человек. Это решение нельзя считать вполне удачным, так как при отсутствии части слушателей реверберация возрастает выше допустимого предела.

**Пример 3.** Определить допустимое увеличение вместимости в том же зале в пределах сохранения благоприятной реверберации.

По таблице Михеля реверберация для объема в 3000 куб. м может быть безопасно сокращаема до 1,2 секунды, что требует соответствующей величины поглощения. Эта величина, отвечающая наибольшей вместимости, достигает  $68 + 0,44 n = \frac{0,164 \times 3000}{1,2} = 410$  еди-

ниц, откуда  $0,44 n = 342$ , и  $n = 777$  человек. При этом вместимость возрастает против примера 2 на  $777 - 590 = 187$  человек.

**Пример 4.** Колебания вместимости могут быть более значительными при пользовании мягкой мебелью и учете ее поглощения. При мягких стульях с коэффициентом поглощения 0,20, поглощение слушателя сокращается до  $0,44 - 0,20 = 0,24$ . Наименьшее число слушателей может быть определено по данным примеров 2 и 3, откуда видно, что общее поглощение зала может колебаться в пределах до  $410 - 328 = 82$  единицы. Такое колебание отвечает в новых условиях изменению числа слушателей на  $82 : 0,24 = 341$  человек, т. е. почти вдвое более допустимого, без учета поглощения стульев, как то установлено в примере 3.

## ЗАДАНИЕ XI

# ИСПРАВЛЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОМЕЩЕНИЙ

§ 39. АКУСТИЧЕСКИЕ НЕДОСТАТКИ ПОМЕЩЕНИЙ. На основе знакомства с приемами проектирования акустически благоприятных помещений возможно выявление главнейших недостатков существующих помещений и приемов их устранения. Так как общим условием акустического благоустройства служит надлежащий выбор размеров, формы и материала, то и типовые недостатки помещений могут быть сгруппированы по указанным трем категориям.

К первой категории относится несоответствие размеров помещения силе источника звука. Это несоответствие может выражаться как избытком, так и недостатком объема или удалений от источника звука. Недостатки этого рода отражаются не только на силе, но и на других технических качествах звука, так как при несоответствии силы не может быть речи ни об удовлетворительной ясности, ни о красоте звука. Избыток объема и удалений кроме того исключает возможность равномерного распределения звуковой энергии, являющегося необходимым условием для возможности слышать одинаково хорошо в различных частях помещения.

Недостатки формы помещения при удовлетворительных размерах могут служить причиной резких нарушений акустического благоустройства в отношении равномерности распределения энергии путем ее концентрации при отражении. Такая концентрация вместе с тем обычно сопряжена с образованием фокусных точек, недопустимых в местах расположения слушателей. Наличие сильных отражений вообще опасно при их опоздании и, смотря по его величине, может служить причиной образования эха одно- и многократного, представляющего один из наиболее грубых акустических недостатков.

Наконец, неудачный подбор материалов для устройства помещения, а также предметов его обстановки и убранства может служить

причиной неудовлетворительной реверберации, слишком большой или слишком малой, невыгодно отражающейся в первом случае на ясности, во втором — на силе, и в обоих случаях — на красоте звуков.

Еще острее и разнообразнее могут быть комбинированные недостатки помещений, связанные одновременно с размерами, формой и материалом. Выявление и анализ таких недостатков возможны посредством тщательного обследования помещения путем экспериментальным, а также при помощи чертежей, составляемых по обмерам помещения с учетом акустических свойств материалов. Чем определеннее выявлены недостатки, тем легче установить меры, необходимые для их устранения. При выборе этих мер надлежит считаться с их осуществимостью в местных конкретных условиях, так как меры, легко осуществимые при проектировании, могут оказаться совершенно непригодными в существующих помещениях.

**§ 40. УСТРАНЕНИЕ НЕДОСТАТКОВ, СВЯЗАННЫХ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПОМЕЩЕНИЯ.** Акустическая роль геометрических элементов помещения в прежнее время признавалась имеющей первостепенное значение, и искание акустической формы составляло основную задачу. Новейшие исследования уточняют и ограничивают значение формы и вместе с тем отмечают важную роль размеров помещения, которые в существующих помещениях далеко не всегда поддаются желательным изменениям.

Объем помещения является весьма важным условием акустического благоустройства. Он должен соответствовать не только энергии источника звука, но и вместимости помещения. Всякий избыток объема вдвойне невыгоден для силы звука, так как, с одной стороны, уменьшает плотность звуковой энергии в помещении, с другой — вызывает необходимость дополнительного поглощения, ослабляющего в свою очередь силу звука. Поэтому сокращение избытка объема является одним из наиболее настоятельных требований акустического благоустройства.

Примером подобного разрешения задачи может служить зал заседаний Нижней палаты в Лондоне, где чрезмерная высота и соответствующая неудовлетворительная реверберация делали помещение недопустимо гулким. Для устранения этого был устроен новый деревянный потолок на меньшей высоте, отвечающий уровню главного поперечного деления высоких готических окон.

Такое капитальное переустройство однако не всегда допустимо, так как сопряжено с нарушением архитектурного ансамбля. Для той же цели могут служить временные разборные устройства из легких конструкций или даже тканей. В качестве примера такого приспособления может служить неосуществленный проект переустройства зала Ленинградской фондовой биржи под зал собраний. Чрезмерная высота зала, перекрытого цилиндрическим сводом, давала объем, примерно вдвое более допустимого. В то же время наличие в своде светового фонаря и нежелательность искажения архитектурной обработки устраняли возможность устройства нового потолка либо навески парусов для сокращения объема. Поэтому было предположено подвесить на соответствующей высоте легкий деревянный переплет с прозрачным остеклением для доступа света и для сохранения вида на выделенную верхнюю часть зала.

Аналогичным образом сокращение объема может быть произведено не по высоте, а путем выделения части помещения перегородкой или завесой.

Площадь помещения тоже играет существенную роль в акустическом отношении, так как находится в тесной связи со вместимостью и предрешает вопрос о расположении слушателей в одном или нескольких ярусах. Избыток площади, как и избыток объема, вообще нежелателен по неблагоприятному влиянию на реверберацию и силу звука. Поэтому целесообразно ограничивать площадь размерами действительной потребности, что достижимо путем выделения излишних частей помещения перегородками и даже драпировками.

Линейные размеры помещения получают существенное значение, когда по размерам и форме помещения трудно рассчитывать на достаточную равномерность распределения звуковой энергии. В этих случаях получают важную роль предельные удаления слушателей от источника звука, а равно и удаления отражающих поверхностей, влияющие на относительную длину пути отраженных лучей и на опоздание отражений. Относительная длина отраженных лучей вообще возрастает по мере приближения слушателя к источнику звука, и в крупных помещениях опоздание отражений нередко превосходит предельно допустимое (§ 14). При этом надлежит заботиться о том, чтобы отражение было возможно слабым и не нарушало ясности чередующихся звуков. Изменение относительной длины отраженных лучей осуществляется в большинстве случаев путем изменения формы и расположения отражающих поверхностей, что относится к вопросам формы помещения.

Общая форма помещения предрешает вопрос о возможности достижения акустического совершенства путем обеспеченной равномерности распределения звуковой энергии. Для этого рекомендуется избегать всяких уклонений от компактности и простоты общей формы, а также резкого различия между основными линейными размерами.

Форма поверхностей, ограничивающих помещение, оказывает существенное влияние на рассеяние отражаемой энергии. В качестве наиболее благоприятной следует отметить выпуклую форму, усиливающую рассеяние отражений и тем способствующую равномерности распределения энергии в пределах помещения. Круглые столбы или колонны представляют характерный образец благоприятно рассеивающих поверхностей. В известной мере аналогичную роль играют поверхности, расчлененные элементами архитектурной или пластической обработки при достаточно крупных рельефах. Примером этого рода может служить обработка потолочных поверхностей кессонами и т. п. Поверхности плоские, как не изменяющие рассеяния, могут быть полезными и вредными, смотря по их расположению и удалению от источника звука и слушателей. К полезным в смысле усиления звука относятся поверхности, отражения от которых опаздывают не свыше 0,05 секунды, что отвечает предельной разнице длины отраженного и прямого лучей в 17 м. При большей разнице поверхности становятся вредными и подлежат заглушению или замене другими, имеющими иную форму или расположение. Однако нельзя забывать, что с возрастанием удалений и соответствующим

падением силы отражений вредная роль таких поверхностей теряет свою активность, и они становятся безразличными в акустическом отношении. Этот случай возникает на практике при таком соотношении количества энергии источника и размеров помещения, когда распределение энергии не только становится неравномерным, но приближается к условиям рассеяния в открытом пространстве. Наконец, особо активная роль поверхностей вогнутой формы была отмечена выше. Эта роль такова, что ни одна вогнутая поверхность не может быть оставлена без обследования для выяснения района концентрации отражаемой энергии. Во всех случаях, когда район концентрации охватывает слушателей или находится вблизи их расположения, нужны меры для устранения этого недостатка путем изменения расположения формы или материала отражающей поверхности. Последний прием относится уже к мероприятиям, связанным с выбором материала.

**§ 41. ЗАВИСИМОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ОТ ПОДБОРА МАТЕРИАЛОВ.** Устранение акустических недостатков приспособляемых помещений путем изменения их геометрических элементов связано в большинстве случаев со строительными работами, носящими иногда характер капитального переустройства. Поскольку недостатки размеров и формы могут быть нередко компенсированы надлежащим подбором отдельных материалов, этот последний прием получает важное практическое значение по относительной простоте его осуществления. Поэтому при разрешении практических задач можно считать целесообразным пользоваться в первую очередь средствами этой категории, и лишь при их недостаточности или неосуществимости прибегать к иным мерам.

Акустическое благоустройство находится в связи с соответствием количества поглощения объему помещения. Так как это количество в свою очередь связано с подбором материала, то надлежащий подбор во многих случаях является главным средством разрешения задачи. Одним из наиболее обычных недостатков приспособляемых помещений служит их гулкость, вызываемая наличием чрезмерной реверберации, которая для приближения к оптимуму требует введения дополнительного количества поглощения.

Этот процесс может быть осуществлен двумя приемами. По первому приему мало поглощающий материал заменяется или закрывается сильно поглощающим. В обоих случаях приращение поглощения определяется произведением разности коэффициентов поглощения того и другого материалов на занимаемую ими площадь. Вторым приемом состоит во введении дополнительных элементов поглощения в форме предметов обстановки или увеличения вместимости.

Расположение новых элементов поглощения в помещении безразлично, однако при соблюдении общего принципа сосредоточения хорошо отражающих поверхностей вблизи источника звука. Осуществление этого последнего условия иногда затруднительно. Так, в крупных аудиториях для сокращения предельных удалений иногда размещают оратора не у стены, а в удалении от нее. В подобных же условиях находится артист на авансцене или просцениуме при крупных размерах портала сцены. Единственной полезной поверхностью является при этом поверхность пола, которую следует делать

хорошо отражающей. Остальные поверхности при опоздании отражений свыше 0,05 секунды могут быть или вредными или безразличными, причем вредными — при достаточной силе отражений по сравнению с прямыми лучами, и безразличными — при относительно малой силе. Такие случаи вообще следует отнести к категории неблагоприятных и невыгодно влияющих на предельные размеры помещений при ограниченной энергии источника звука.

В качестве мер акустического приспособления помещений играют иногда значительную роль поглотители переменного действия. Потребность в таких поглотителях возникает при переменном назначении помещения или при переменной его вместимости. Типы их весьма разнообразны. К простейшим устройствам относятся завесы из сильно поглощающего материала, которые в свернутом виде обладают малой поверхностью, но при опускании или разворачивании могут дать сильно поглощающую поверхность желаемых размеров. Более сложными являются поверхности перфорированные, с отверстиями для пропуска звука, или поверхности из сильно поглощающего материала, защищаемые по мере надобности материалом, хорошо отражающим, например в форме металлических решеток жалюзийного типа. Наконец, та же цель может быть осуществляема складными и поворотными ширмами, стороны которых обладают различными поглощающими свойствами. Такие приспособления могут быть надлежащим образом механизированы для управления ими, что однако значительно осложняет все устройство и делает его осуществимым лишь в исключительных случаях.

**§ 42. КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРИЕМЫ ИСПРАВЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ.** Если изменение размеров и формы помещения по местным условиям представляется необходимым, то отсюда не следует, чтобы меры этого порядка были исчерпывающими. Наоборот, во многих случаях выгодно объединять их с надлежащим подбором материала, отдавая однако отчет в акустическом значении принятых мер. Так например, для устранения вредного влияния фокусов возможно заменить вогнутую поверхность плоской, и той же цели можно достигнуть, покрывая эту поверхность слоем сильно поглощающего материала. Результат этих мер однако существенно различен: в первом случае звуковая энергия сохраняется в значительной части, а во втором — теряется. Таким образом ценность сохранения энергии, потребной для обеспечения силы звука, может служить решающим признаком для выбора того или иного приема.

Для ориентировки при выборе приема могут служить следующие общие соображения. Обеспечение силы звука достигается сокращением объема помещения и понижением среднего коэффициента поглощения, а также величины поглощающих поверхностей. Ясность звуков, обеспечивающая благоприятную артикуляцию, осуществляется возможным сокращением реверберации, т. е. сокращением объема помещения и увеличением количества поглощения. Таким образом сокращение объема служит универсальным средством, содействующим одновременно увеличению силы и улучшению ясности звука, почему может быть рекомендуемо в первую очередь. Наоборот, увеличение поглощения для обеспечения ясности всегда наносит ущерб силе звука, почему должно быть применяемо с надлежащей осторож-

рожностью. Наконец, качество звука в смысле красоты его обеспечивается соответствием количества поглощения объему помещения и достигается надлежащим изменением количества поглощения или объема, а иногда того и другого совместно. В этом случае, как и в вышеуказанном, при необходимости сокращения реверберации выгодно уменьшение объема, а не увеличение поглощения. Наоборот, для увеличения реверберации следует предпочесть уменьшение поглощения, а не увеличение объема.

Таким образом увеличение объема является мерой вообще нежелательной, а уменьшение его может служить для повышения всех технических качеств звука, за исключением редких случаев избытка звуковой энергии в источнике звука.

Примером комбинированного приема приспособления может служить осуществленное по указаниям автора переустройство б. собора в городе Боровичах под театральный зал. Помещение, крытое сводами, при значительной высоте давало избыточный объем по своей вместимости и фокусные точки пересечения отраженных лучей в местах расположения слушателей. Сокращение объема и исправление формы было достигнуто совместно устройством плоского деревянного, оштукатуренного потолка подвесной конструкции на уровне несколько выше пят сводов. Нижние части сводчатых и арочных поверхностей замаскированы деревянной наклонной падугой, равным образом оштукатуренной. Несколько увеличенное поглощение потолка по сравнению со сводчатой поверхностью послужило для обеспечения надлежащей величины реверберации. Такое объединение всех технических средств оказалось наиболее экономичным и простым приемом достижения акустического благоустройства зала в местных условиях.

Резюмируя общие приемы обеспечения технических качеств звука выбором размеров, формы и материала, возможно установить следующие положения. В крупных помещениях размеры подлежат всевозможному сокращению во всех случаях. Форма помещения в целях обеспечения силы и красоты звука должна быть возможно компактная, ясность же звуков может требовать внесения в эту форму специальных коррективов и тем в большей степени, чем крупнее размеры. Наконец, материал для обеспечения силы звука требуется мало поглощающий, а в целях ясности сильно поглощающий; красота же звука достигается при некоторой промежуточной степени поглощения, определяемой совокупностью местных условий.

## *ЗАДАНИЕ XII*

### СРЕДСТВА АКУСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

§ 43. НАЗНАЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. Под средствами акустического оборудования понимаются приборы специального назначения, содействующие целям акустического благоустройства. Применение этих средств целесообразно в тех случаях, когда они дают упрощенное или более экономичное разрешение вопроса по сравнению с другими приемами. Характерным признаком

средств оборудования служит их относительная подвижность и возможность удаления и замены без нарушения цельности архитектурного оформления и убранства. Поэтому в помещениях, несущих различные функции, акустическое оборудование может носить временный характер, как вызываемое практической потребностью в одних случаях и излишнее в других.

Основную идею применения приборов акустического оборудования в прежнее время составляло перераспределение звуковой энергии в выгодном смысле. Целесообразность такого распределения возникает по преимуществу в тех помещениях, где трудно ожидать равномерного насыщения. В этих случаях приборы отражательные служат для направления энергии в районы наибольшей потребности, а поглощающие — для устранения вредных отражений, в какой бы форме они ни проявлялись. Таким образом общая цель тех и других состоит в устранении недостатков распределения звуковой энергии и в приближении его к равномерному, если не в пределах помещения, то по крайней мере в районе расположения слушателей.

В связи с изложенным уместно упомянуть о резонирующих приборах, применявшихся в отдаленные времена, в форме голосников античных театров и древних русских церквей. Под голосниками или резонаторами разумеются полые сосуды, обращенные отверстием в направлении к источнику звука. По указанию Витрувия такие сосуды, медные или гончарные, настроенные в различные тона, располагались в театрах Италии и Греции в уступах, разделяющих места для зрителей на отдельные террасы. Практическое значение такого устройства не вполне выяснено, но обосновать его возможно малым диапазоном древней музыки, при котором ограниченное число резонаторов удовлетворяло практическим целям усиления тонов путем резонанса. К современным условиям подобное устройство вряд ли применимо. О роли голосников в русских церквях мнения исследователей сильно расходятся. Из сторонников их акустического значения Стасов отмечает их влияние на силу звука, Павлинов и Грязнов — на красоту и наконец Даль — на поглощаемость звука. Наблюдаемое иногда заштукатуривание отверстий голосников, по мнению Покрышкина, объясняется или желанием получить резонирующую поверхность или невежеством мастеров. Все эти указания подтверждают невыясненность практической роли резонирующих приборов при отсутствии теоретических обоснований их применения.

Наконец, в последнее время явился новый вид акустического оборудования, имеющий целью не перераспределение, а уплотнение звуковой энергии. Для такого уплотнения, связанного с усилением звука, служат усиливающие приборы, называемые громкоговорящими.

Потребность усиления возникает при несоответствии мощности источника звука объему помещения, а так как в условиях нового быта существует необходимость в помещениях весьма крупного объема и вместимости, то приборы этого рода получают довольно широкое применение.

Само собою разумеется, что средства акустического оборудова-

ния не исключают обычных технических средств акустического благоустройства и могут быть применяемы с ними совместно. Основными типами приборов акустического оборудования в настоящее время служат приборы отражательные, поглощающие и усилители.

§ 44. ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. Отражательные приборы применяются в двух характерных формах. Более простую форму представляют отражательные щиты и более сложную — ниши.

Установка отраженного щита вблизи источника звука имеет двойное значение: она ограничивает район распространения звуковой энергии и отражает ее в желательном направлении. Указанное ограничение в первую очередь целесообразно в восходящем направлении, почему щит обычно располагается над источником звука. При таком расположении легко устраняется вредное влияние чрезмерной высоты или неблагоприятной формы верхнего перекрытия с заменой вредных отражений полезными. Однако задача установки щита разрешается благоприятно лишь при надлежащем выборе его расположения, размеров, формы и материала.

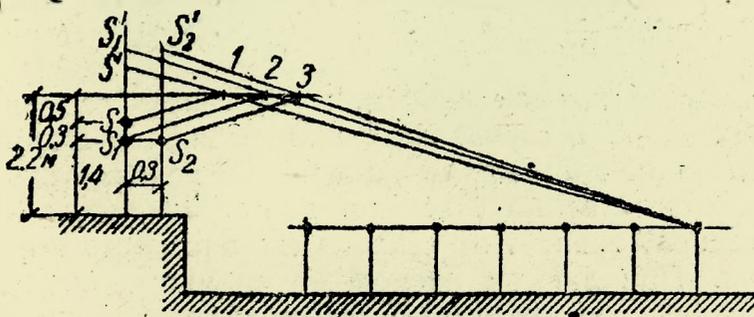


Рис. 56. Определение размеров горизонтального отражательного щита.

Расположение щита зависит от местных условий. При возвышенном расположении источника звука и ограниченных удалениях слушателей целесообразно расположение щита в горизонтальной плоскости. При значительном удалении слушателей выгодно располагать щит с подъемом в сторону наибольшего удаления, усиливая звук для удаленных слушателей и лишая ближайших доступа отраженных лучей в той части помещения, где прямые лучи обладают достаточной силой. Возвышение щита над источником звука влияет на размеры щита, которые могут быть сокращаемы при понижении его уровня. Однако это сокращение имеет практические пределы в случаях подвижности источника звука. Так например, располагая щит за 0,5 м над головою оратора высокого роста, надлежит предвидеть возможность, что это расстояние увеличится на 0,2—0,3 м при малом росте оратора. Равным образом, на величине щита отражаются и возможные уклонения оратора от центрального положения, которые для оратора на кафедре могут колебаться в пределах окружности, описанной радиусом до 0,3 м. Так при основном положении источника звука в точке  $S$  он может переместиться в точку  $S_1$  и даже в  $S_2$ , что побуждает передвинуть переднюю границу щита из точки 1 в точку 3. Поэтому при любом распо-

ложении щита целесообразно определять его размеры с некоторым запасом.

Размеры щита определяются при данном его расположении в зависимости от удаления границ района действия его полезных отражений. При этом общим условием существования отражений служит расположение источника звука и слушателя по одну сторону плоскости щита. Таким образом эта плоскость может быть парал-

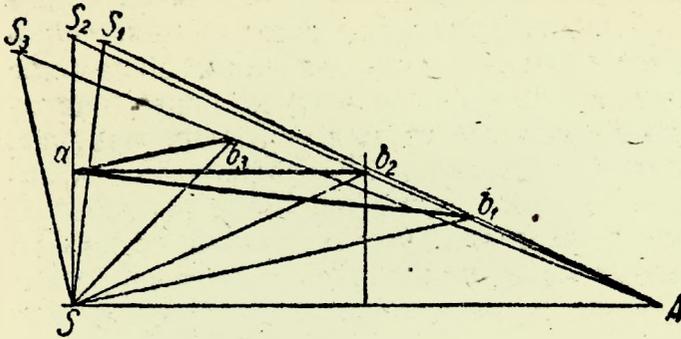


Рис. 57. Изменение размеров отражательного щита в зависимости от наклона.

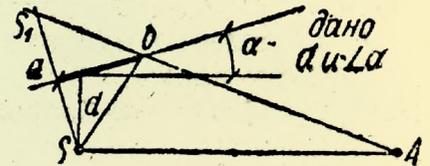


Рис. 58. Определение размеров щита по его удалению и наклону.

ельна прямому звуковому лучу или пересекать его продолжения вне указанных точек. В случае параллельности граница щита должна достигать половины длины прямого луча, а в других случаях должна находиться соответственно далее или ближе половины, причем размеры щита всецело зависят от наклона его плоскости к направлению прямого луча. При данном расположении источника и слушателя для определения размеров щита имеются две переменных величины,

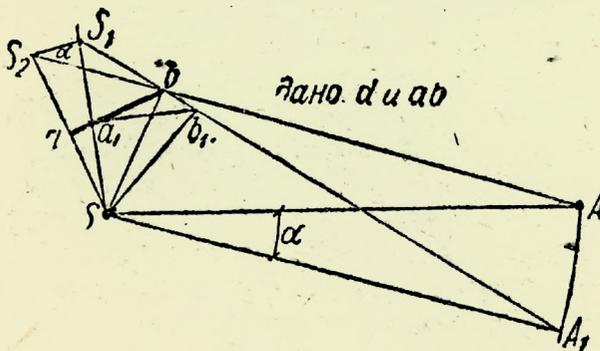


Рис. 59. Определение наклона щита по его размерам и удалению.

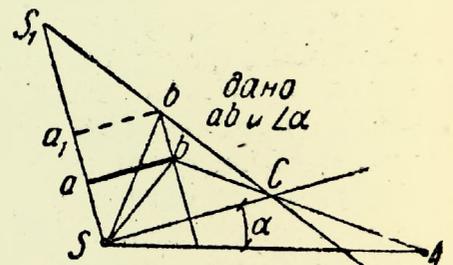


Рис. 60. Определение наклона щита по его размерам и наклону.

связанные функциональной зависимостью: угол, образуемый плоскостью щита с прямым лучом, и удаление плоскости щита от источника звука. В соответствии с этим возникают три основных задачи, где по двум данным величинам определяется третья неизвестная.

**Задача 1.** При заданных наклоне плоскости щита  $\alpha$  и удалении ее  $d$  от источника звука положение границы щита определяется построением отраженного луча от его плоскости. Для этого, опустив на плоскость щита перпендикуляр из источника и построив на продолжении перпендикуляра за плоскостью отражение источ-

ника как в зеркале, соединяют найденную точку  $S_1$  с местом расположения слушателя в точке  $A$ . Пересечение прямой —  $S_1A$  с плоскостью щита определяет границу последнего.

**Задача 2.** При заданных длине щита  $ab$  и его удалении  $Sa \equiv d$  для определения его наклона следует задаться некоторым примерным наклоном  $a_1b_1$  и, построив для него крайний отраженный луч, нанести на нем точку  $A_1$ , удаленную от источника наравне со слушателем. Если найденная точка не совпадает с расположением слушателя в точке  $A$ , то для совпадения их следует повернуть всю систему около источника, как центра вращения, на угол  $\alpha$ , составляемый истинным и полученным при построении направлениями прямого луча. Такой поворот определяет искомый наклон плоскости щита.

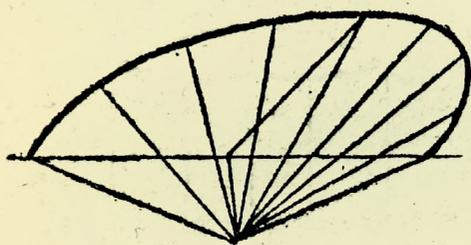


Рис. 61. Щит конической формы.

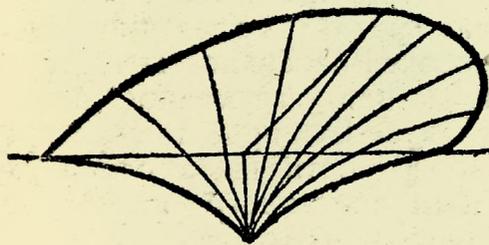
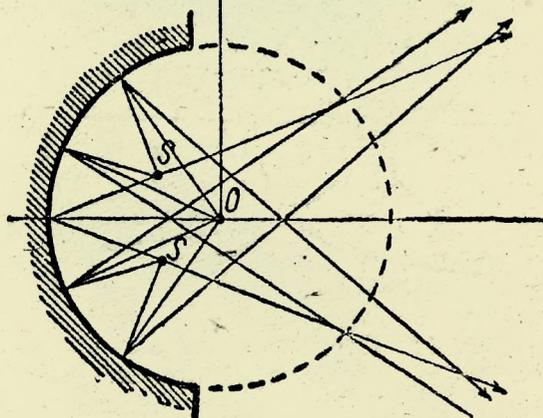
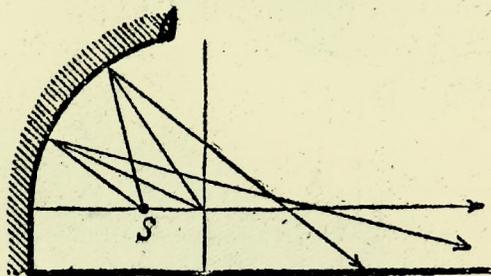


Рис. 62. Щит перевернутой формы.

Рис. 63. Отраженное действие сферической ниши.

**Задача 3.** При заданных наклоне и длине щита предельное удаление его от источника может быть определено, задаваясь примерным удалением  $Sa_1$  и проводя для него крайний отраженный луч. Точка пересечения последнего с линией  $SC$  и источник звука  $S$  очевидно равно отстоят от перпендикуляра к плоскости щита в его крайней точке. Поэтому, проводя отраженный луч через ту же точку пересечения  $C$  и место расположения слушателя в точке  $A$ , возможно в пересечении этого луча с указанным перпендикуляром определить искомое положение крайней точки щита.

Во всех этих случаях можно видеть, что ограничение размеров щита связано с сокращением его удаления, почему применение щитов вообще следует ограничивать случаями малой подвижности источников звука.

Форма щита находится в зависимости от размещения слуша-

телей. Если плоскость щита непараллельна прямым лучам, то плоский щит может рационально обслуживать слушателей лишь в одном направлении, так как угол наклона его плоскости изменяется по различным направлениям, сокращаясь до нуля для крайних слушателей при расположении мест в пределах полукруга с источником звука в центре. В таких случаях выгодно отказаться от плоской формы и заменить ее конической поверхностью, обращенной вершиною вниз над источником звука. Наконец, при значительном удалении слушателей, целесообразно плоскую производящую поверхность щита заменять вогнутою для усиления отражений.

Материал щита должен обладать возможно сильной отражающей способностью, почему для этой цели могут служить мрамор, поли-

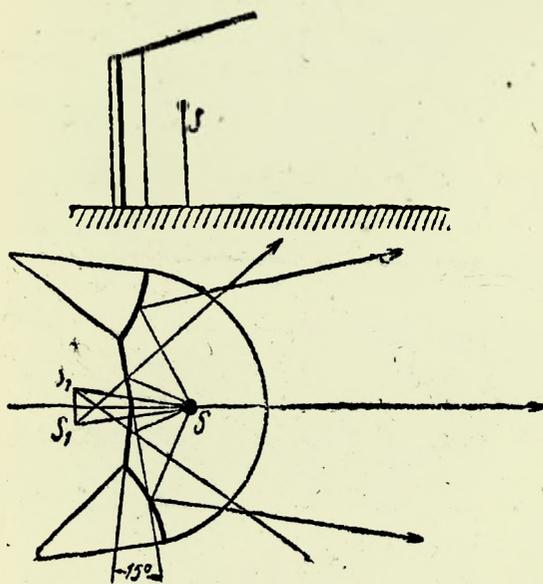
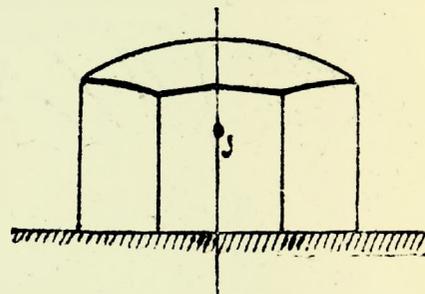


Рис. 64. Отражательная ниша, рассеивающая отражение.



рованное дерево, гладкая штукатурка и пр. Вторым условием служит малая звукопроводность щита, особенно важная при щитах с резонирующей рабочей поверхностью. Для сокращения звукопроводности следует изолировать обратную поверхность щита слоем резины или иного малозвукопроводного материала.

Другой тип отражательного прибора представляют ниши, являющиеся по существу разновидностью щитов с осложнением общей формы для ограничения района распространения звуковой энергии не только сверху, но и сбоку. Это условие ясно определяет случаи целесообразной замены щитов нишами. По своей геометрической форме ниши могут состоять из цилиндрической части и перекрытия, а при крупных размерах — иногда только из перекрытия сферической или осложненной формы. Во всех случаях ниши должны иметь достаточные размеры для размещения источника или источников звуков. Отражательное действие ниши определяется ее составными геометрическими элементами, причем должны быть избегаемы такие формы, при которых возможно образование фокусов отражений в районе расположения слушателей. Так, обычные сферические ниши не встречаются возражений при удалении слушателей от задней стены ниши не менее удвоенного радиуса кривизны. Наравне со сферическими и даже предпочтительно перед ними возможны ниши иных форм, устраняющих образование фоку-

сов. Так например стена за оратором может иметь призматическую форму с выступающим ребром, благодаря чему отражения минуют фигуру оратора. Допустим соответствующий наклон стены за оратором. Наконец, для равномерного рассеяния энергии эта стена или части ее могут иметь выпуклую форму. Выбор формы ниши производится на основании соображений, аналогичных с выбором формы помещения в части, ближайшей к источнику звука. При выборе материала для устройства ниши следует руководствоваться теми же соображениями, что и при устройстве щитов.

**§ 45. ПОГЛОЩАЮЩИЕ ПРИБОРЫ.** Основную целью применения поглощающих приборов служит устранение вредных отражений путем поглощения отражаемой энергии. Надлежит помнить, что всякая поглощенная энергия является потерянной в помещении и влечет потерю общей силы звука. Поэтому применение поглощающих приборов возможно лишь при некотором избытке энергии. В этих случаях такие приборы заслуживают предпочтения перед другими по крайней простоте устройства.

Обычным типом поглощающего прибора служат паруса или завесы из различного рода тканей, по возможности плотных и тяжелых, иногда располагаемых в два ряда для усиления поглощающего действия. Парусами изолируются горизонтальные и наклонные поверхности, завесами — вертикальные. Усилению действия таких приборов способствует их форма, так как паруса в свободно подвешенном состоянии получают выпуклые очертания, способствующие звукорассеянию, а завесы получают складки, усиливающие поглощающие действие в зависимости от возрастания поверхности.

Недостатком подобных устройств является их влияние на архитектурный ансамбль помещения, так как они устраняют вид на более или менее существенные элементы архитектурного убранства. Этот недостаток может иногда ограничивать их применение. Так например, завешивание верхних световых отверстий связано с затемнением помещения и потому допустимо лишь с соответствующими ограничениями. С другой стороны завешивание световых отверстий в вечернее время, если это допустимо по условиям пользования, представляется весьма практичным и рациональным.

Применение поглощающих приборов не ограничивается устранением вредных отражений, но независимо от этого может служить для увеличения количества поглощения в целях достижения благоприятной реверберации. Надлежит однако помнить, что та же цель может быть достигнута сокращением объема без ущерба, а наоборот с выигрышем силы звука, вместо ее потери, при введении дополнительного поглощения.

**§ 46. УСИЛИВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ.** Пользование громкоговорителями для усиления звука может быть рекомендуемо лишь в помещениях исключительно крупных размеров. Причина этого лежит в связанном с громкоговорителями понижении качества звука, а с другой стороны — в трудностях удачного расположения громкоговорителей.

Понижение качества кроется не только в несовершенстве приемного и передаточного аппарата, не охватывающего мелких особен-

ностей и оттенков звука, но и в лишении воспринимаемых звуков свойства пластичности, обусловливаемой пространственными условиями расположения составляющих элементов звука, что особенно наблюдается при крупном составе хора или оркестра. Непосредственное восприятие звука двумя ушами по аналогии со зрением обладает стереоскопичностью, недостижимой для приемника звука ограниченных размеров. Этот недостаток в известной мере может быть устранен применением одновременно нескольких приемников.

Расположение громкоговорителей не может быть произвольным, так как при этом необходимо учитывать условия распространения звука от нескольких совместных источников. При одновременном их действии они должны быть расположены таким образом, чтобы звуковые волны различных источников не достигали слушателей с вредным опозданием свыше 0,05—0,033 секунды. Простейшим разрешением этой задачи

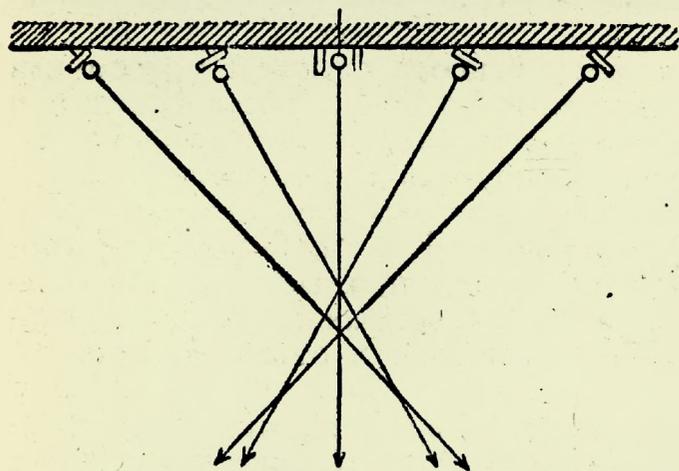


Рис. 65. Схема расположения громкоговорителей.

чтобы удаления источников звука от слушателей различались между собою не более 12 м.

Другой прием состоит в размещении источников звука на столь значительных расстояниях, при которых звуковые волны смежных источников получают относительно малую силу. Практически это целесообразно лишь при расположении слушателей у отдельных источников отдельными группами. При сближении и соприкосании этих групп вполне возможно такое расположение части слушателей по отношению к смежным источникам звука, при котором звуковые волны относительно большой силы будут опаздывать свыше допустимого предела. Эта возможность возрастает с увеличением расстояния между источниками звука и их мощности. Таким образом первый прием заслуживает предпочтения, если только местные условия допускают его применение.

При установке нескольких громкоговорителей в близком соседстве целесообразно принятие мер против возможного вредного влияния интерференции звуковых волн. С этой целью полезно располагать громкоговорители таким образом, чтобы оси смежных звуковых потоков были не параллельны между собою, а составляли

является расположением громкоговорителей в непосредственной близости как от основного источника звука, так и между собою. Если предельные расстояния между отдельными источниками звука не превышают 12 м, то задача разрешается при любом расположении слушателей. В частных случаях эти расстояния могут быть увеличены с соблюдением лишь общего принципа,

углы, величина которых зависит от формы площади, занятой слушателями. Равным образом, следует разделять смежно расположенные громкоговорители между собою отражающими, но не резонирующими щитами-перегородками. Для устройства их рекомендуются пробковые плиты, покрытые с обеих сторон листовым свинцом, пригодным в качестве материала, удовлетворительно отражающего, но не резонирующего.

Аналогичные соображения служат для оборудования громкоговорителями помещений звукового кино. В этих случаях особо подчеркивается необходимость сосредоточения громкоговорителей в границах экрана, что способствует полноте иллюзии. Следует впрочем иметь в виду, что слуховой аппарат не обладает способностью точно улавливать направления звуковых волн, а вместе с тем и определять расположение источника звука. В помещениях это свойство проявляется, как и следовало ожидать, гораздо резче, чем в открытом пространстве. Лишь противоположные и сильно уклоняющиеся направления распознаются как несовпадающие с действительными.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.** 1. Каковы основные технические средства для разрешения акустических задач?

2. В каких случаях допустимо расположение слушателей на горизонтальной плоскости?

3. В чем состоят преимущества расположения мест слушателей на наклонной плоскости?

4. В каких случаях такое расположение неприменимо?

5. В чем состоит принцип наименьшего подъема мест?

6. Каковы три типовых случая распределения звуковой энергии в помещении в зависимости от мощности источника звука?

7. Как определяется мощность хора или оркестра?

8. Какие имеются принципы регулирования распределения звуковой энергии?

9. Какие существуют средства для устранения эха и иных вредных отражений?

10. Какова зависимость силы звука от поглощающих свойств материала?

11. Что такое реверберация и какова ее практическая роль?

12. Как определяется реверберация при проектировании и в существующих помещениях?

13. Что называется оптимумом реверберации?

14. Какого порядка следует держаться при разрешении вопросов акустического благоустройства?

15. Какова связь между реверберацией и геометрическими элементами помещения?

16. Как влияет на реверберацию выбор материала?

17. Каковы обычные акустические недостатки существующих помещений?

18. В чем состоят меры борьбы с этими недостатками в части геометрических элементов помещения?

19. То же в части замены отделочных или декоративных материалов?

20. В каких случаях целесообразно прибегать к средствам акустического оборудования?

21. Какова практическая роль отражающих приборов?

22. Какие материалы целесообразно применять для устройства отражающих приборов?

23. В каких случаях применяются поглощающие приборы?

24. В каких случаях допустимы усилители?

25. Каковы практические достоинства и недостатки усилителей?

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО II ТЕМЕ.** В качестве задания для практической проработки настоящей темы может быть взят объект первой контрольной работы и проработан с исчерпывающей полнотой для разрешения всех вопросов акустического благоустройства в применении к вновь проектируемому или приспособляемому существующему помещению. При проработке рекомендуется держаться общего порядка проектирования, изложенного в § 35.

Обследование следует начать с выявления оптических условий расположения слушателей согласно указаниям, изложенным в задании VII. Корректирование оптических условий может влиять на изменения размеров и формы помещения. Эти изменения очевидно должны быть соответственно учтены при последующем анализе влияния геометрических элементов помещения на его акустическое благоустройство.

При устранении недостатков размеров и формы помещения полезно выявление тех его элементов, вредное отражающее влияние которых с большей легкостью или экономичностью может быть нейтрализовано путем поглощения звуковой энергии при выборе соответствующего материала. Учет поглощения отделочного и декоративного материала, а также предметов оборудования и убранства и наконец наличия слушателей дает возможность, пользуясь формулой Сабина, определить теоретическую величину стандартной реверберации. Сопоставление найденной величины с оптимумом реверберации для зала данного объема и назначения определяет недостающее или избыточное количество поглощения. Такой прием целесообразен для приспособляемых помещений, когда выбор материалов вообще ограничен. Наоборот, при свободном выборе возможно предварительно определить общее количество поглощения, отвечающее требуемой реверберации при данном объеме, и за вычетом поглощения, обуславливаемого наличием слушателей, найти количество так называемого дополнительного поглощения, которое должно быть осуществлено постоянными элементами поглощения. Это количество подлежит соответствующему распределению с учетом практического правила сосредоточения вблизи источника звука мало поглощающих элементов и удаления от него главных поглотителей.

Обследование полезно дополнить анализом акустической устойчивости помещения при переменной численности слушателей. Допуская предельное отклонение реверберации от ее оптимальной величины до 5% в ту и другую стороны, предлагается определить соответствующее изменение численности при размещении слушателей на деревянных и на мягких стульях.

Решение той же задачи осложняется при более резком изменении численности, например сокращении состава слушателей до двух третей или до половины нормального. В этих условиях колебания величины реверберации могут выходить за пределы, отвечающие требованиям акустического благоустройства, и нужен иной прием разрешения задачи. Таким приемом может служить применение переменных поглотителей звуковой энергии (§ 41). В качестве практического упражнения предлагается определить потребное количество квадратных метров завесы при отсутствии одной трети слушателей, принимая коэффициент поглощения ткани около 0,50.

# АКУСТИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

---

§ 47. ЗАДАЧИ И ПРИЕМЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ. При рассмотрении условий акустического благоустройства был обойден молчанием вопрос о влиянии посторонних звуков. Между тем, в практических условиях нельзя не считаться с их наличием в каждом помещении, а равным образом и с возможностью их вредного влияния на технические качества звука. К посторонним звукам относятся все звуки и шумы, не связанные с назначением помещения, где бы таковые ни возникали. При этом, по месту их возникновения, возможно различать звуки, источники которых находятся в самом помещении, в иных помещениях того же здания и, наконец, вне здания.

Во всяком помещении, при наличии некоторого количества людей, неизбежно возникновение звуков, связанных с движениями произвольными или случайными, с откашливанием и т. п. С увеличением численности собрания возрастает и количество подобных звуков, почему достижение полной тишины в крупных помещениях практически неосуществимо. Существенным стимулом к возможному сохранению тишины служит наличие благоприятных акустических условий. Наоборот, всякое напряжение внимания, вызываемое тем или иным акустическим недостатком помещения, быстро утомляет собравшихся, делает их рассеянными и, устраняя в связи с этим потребность соблюдения тишины, способствует развитию посторонних шумов и звуков. Это обстоятельство усугубляет практическое значение мероприятий в настоящей области.

Таким образом, первая задача акустической изоляции состоит в устранении звуков и шумов в пределах помещения в целях достижения потребной тишины. Мероприятия этого рода могут распространяться на все звуки в помещении, вообще, или же только на некоторые. Кроме того, при посредстве указанных мероприятий звуки могут быть устраняемы полностью или частично. В соответствии с этим возникают два основных приема устранения посторонних звуков: заглушение в источнике и заглушение в помещении.

Не меньшую практическую важность имеет вопрос преграждения доступа в помещение звуков из смежных помещений или извне. Очевидно, что мероприятия по заглушению звука могут быть полезны и в этом случае. Однако, осуществление этих мероприятий нередко практически недопустимо. Так например, в смежных классах музыкальной школы недопустимо для поддержания тишины в одном классе заглушать звуки в соседних. Поэтому основным техническим средством в подобных условиях является акустиче-

ская изоляция в узком смысле, осуществляемая применением специальных конструкций, препятствующих проникновению звуковых колебаний в желаемом направлении.

Следует иметь в виду, что вопросы акустической изоляции вообще касаются мероприятий по отношению к звукам и шумам обычной практической силы, отвечающей интенсивности ощущения до 60—80 децибелов. Распространение их на звуки исключительной силы при взрывах, выстрелах из крупных орудий, обрушениях и т. п. было бы практически бесцельным и чрезвычайно затруднительным, так как такие звуки относятся к явлениям катастрофического характера и развиваются крайне бурно, с громадным повышением давления и температуры и с значительным возрастанием скорости распространения, доходящей до нескольких тысяч метров в секунду в воздушной среде.

### ЗАДАНИЕ XIII

## ПРИЕМЫ ЗАГЛУШЕНИЯ ЗВУКА

§ 48. ЗАГЛУШЕНИЕ ЗВУКА В ИСТОЧНИКЕ. Для выбора приема заглушения звука в его источнике надлежит выяснить место и причину возникновения звука. Звуки воспринимаются нашим слуховым аппаратом почти исключительно через воздух, однако воздушная среда не является единственной для распространения звуковых колебаний. Наоборот, всякая материальная упругая среда способна передавать звуковые колебания, почему возможно различать две основные категории колебаний: воздушные и материальные. При этом слуховое ощущение связано в большинстве случаев с переходом материальных колебаний в воздушные, так как лишь весьма сильные и низкие тона могут быть воспринимаемы организмом непосредственно в форме материальных колебаний.

Источники возникновения звуковых воздушных и материальных колебаний весьма разнообразны и по роду вызывающих их явлений могут быть разделены на следующие категории:

1) звуки механического происхождения, вызываемые ударами, трением, кручением и пр.,

2) акустического происхождения, как резонанс, комбинационные тона,

3) термического происхождения, например, при неравномерном расширении труб отопления,

4) электрического и магнитного происхождения,

5) химического происхождения, как взрывы и поющее пламя,

6) физиологического происхождения, как голос, пение, мычание и пр.

Воздушные и материальные колебания возникают обычно совместно. Примером источника чисто воздушных колебаний может служить взрыв газового баллона в воздухе. Звуки голоса, звонка, скрипки, флейты и т. п. вызывают по преимуществу воздушные колебания, хотя в своем источнике имеют материальную основу. Звуки рояля, пишущей или швейной машины, удары молотка и пр. рас-

пространяются одновременно в форме воздушных и материальных колебаний, так как в обычных условиях их источники неразрывно связаны со звукопроводящей материальной средой. Наконец, чисто материальные колебания имеют для нас малое практическое значение, которое, однако, возрастает при контакте слухового аппарата со звукопроводящею средою. Так, приложив ухо к стене, можно уловить звуки, доносящиеся из весьма удаленных помещений, или через рельсы можно слушать шум поезда на значительно большем расстоянии, чем через воздух. •

Задача заглушения звука в источнике сводится к прекращению или ослаблению вызывающих звук колебаний. Приемы заглушения столь же разнообразны, как и причины возникновения колебаний. Из отдельных типовых случаев возможно отметить наиболее обычные, вызываемые механическими действиями. Борьба с шумом от трения частей машин и механизмов во многих случаях осуществляется успешно их надлежащей смазкой. Шум от ударов различного происхождения смягчается применением малоупругих заглушающих прокладок из войлока, пробки, резины и пр.; для той же цели могут служить пружины, смягчающие или исключющие возможность удара; наконец, уравнивание хода машин также содействует уменьшению вызываемого ими шума.

Наиболее резкие шумы промышленного характера, связанные с обработкой металлов, могут быть существенно ослабляемы изменением приемов работы. Так, ударная склепка металлических частей может быть заменена гидравлическою с более медленным, и потому бесшумным действием, или, наконец, автогенною сваркою. Равным образом механическая резка металлов, сопряженная с большим шумом, допускает замену применением для этой цели сжатого кислорода. Сюда же относится замена звуковых сигналов световыми.

Меры указанного порядка не всегда дают благоприятный результат, но, тем не менее, о них не следует забывать, потому что они являются первыми в ряду мероприятий в области акустической изоляции и в отдельных случаях могут делать излишним применение каких-либо иных приемов.

§ 49. ЗАГЛУШЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИИ. При обследовании практической роли отражений (§ 13) было установлено их влияние на силу звука в помещении. Таким образом, сила звука зависит не только от энергии источника, но и от условий распространения звука и может существенно изменяться. Изменение силы в зависимости от отражений (§ 33) обратно пропорционально количеству поглощения и при равномерном распределении звуковой энергии может колебаться в пределах возможных изменений величины среднего коэффициента поглощения.

Этими соображениями определяется относительное значение приема заглушения звука в помещении в ряду других приемов акустической изоляции. Прием этот состоит в возможном увеличении количества поглощения путем введения в помещение энергичных поглотителей звука, как ковры, тяжелые ткани, мягкая мебель и т. п.

Нельзя, однако, забывать, что указанные меры противоречат требованиям акустического благоустройства, изменяя величину ре-

верберации обратно пропорционально количеству поглощения. При избытке последнего в целях заглушения звука реверберация может оказаться далеко недостаточной для удовлетворительного качества звука. Таким образом этот прием вообще мало применим в тех помещениях, где должно быть обеспечено удовлетворительное качество звука. Это, разумеется, не препятствует широко пользоваться указанным приемом для заглушения звуков, не имеющих утилитарного значения, неприятных и раздражающих слуховые нервы.

Для оценки эффективности этого приема могут служить следующие соображения. В благоприятных акустических условиях (§ 36) потребное количество единиц поглощения на куб. м объема составляет 0,1—0,2 и более для малых объемов. Предположим, что при помощи энергичных поглотителей звука количество поглощения увеличилось в 10 раз с сокращением во столько же раз силы звука. Интенсивность ощущения (§ 6) сокращается при указанном изменении на 10 децибелов. Таким образом при стандартной первоначальной интенсивности в 60 децибелов достигается сокращение ее до 50 децибелов. Равным образом начальная интенсивность в 30 децибелов снижается до 20 децибелов. Отсюда следует, что эффективность приема заглушения звука поглощением возрастает для звуков ограниченной силы, почему означенный прием может быть рекомендован в качестве полезного подсобного средства для устранения посторонних шумов второстепенной силы и для совместного применения с первым приемом заглушения звука в источнике.

Характерным практическим примером этого рода может служить заглушение шума в бюро машинописи, располагаемых нередко вблизи помещений для сосредоточенных занятий, требующих тишины и покоя. К первой категории мер относятся установка пишущих машин на мало упругие войлочные или резиновые подкладки, изоляция столиков под машинами от распространения материальных колебаний в конструкции пола путем резиновых наконечников на ножках и т. п. Меры второй категории могут состоять в покрытии пола ковром, стен — драпировками, в установке мягкой мебели, в возможно компактном расположении работников с предельным ограничением объема воздуха на человека и т. д. Если совокупность означенных мероприятий сократит интенсивность шума до 30—20 децибелов, задача может считаться решенной, так как такой шум в обычных условиях не требует специальных дополнительных мер изоляции.

**§ 50. ИЗОЛЯЦИЯ ЗВУКОВ В ПРЕДЕЛАХ ПОМЕЩЕНИЯ.** Основным средством обеспечения в помещении тишины и преграждения доступа в него звуков из смежных помещений служит применение акустически изолирующих конструкций. Такие конструкции, называемые акустическими изоляторами, необходимы между каждым помещением, где расположены источники звука, и помещением, изолируемым от доступа звуковых колебаний. Так как звуки распространяются в форме частью воздушных, частью материальных колебаний, то и изоляторы могут по своему назначению быть разделены на две основные категории — изоляторов воздушных и материальных колебаний. Эти категории существенно разнятся между собою, так как воздух служит основной средой распростра-

нения воздушных колебаний и в то же время лучшим изолятором для материальных колебаний. Однако, вопрос изоляции осложняется сравнительной легкостью перехода воздушных колебаний в материальные и обратно.

Как уже было указано выше (§ 48), материальные колебания в большинстве случаев получают практическое значение лишь в той мере, поскольку они обладают способностью переходить в воздушные, непосредственно воздействующие на слуховой аппарат. Из двух основных форм распространения материальных колебаний, а именно — в форме сжатия и растяжения и в форме изгиба — последняя играет в указанном отношении преобладающую роль. Поэтому основным средством против перехода материальных колебаний в воздушные служит устранение в конструкциях стен и перекрытий возможности подвергаться колебаниям изгиба. Эта последняя возможность легко распознается при ударах: чем сильнее и резче звук при ударе, тем легче конструкция получает колебания изгиба. Однако, при производстве такого испытания необходимо следить, чтобы наблюдаемый звук действительно возникал от колебаний испытываемой конструкции, а не от инструмента, служащего для удара.

Типичными конструкциями этого рода являются стены и перегородки, при малой их толщине и значительном напряжении имеющие характер упругой пластины. Сюда же относятся дверные и оконные створы и т. п. Все эти конструкции весьма легко передают воздуху воспринимаемую ими звуковую энергию от связанных с ними иных частей здания. Мало того, в отдельных случаях такая передача может быть вызываема не всей конструкцией, а ее поверхностным слоем в форме жесткой штукатурки или облицовки на менее упругой подкладке или с воздушной прослойкой. Такая передача приближается к явлению резонанса. Резонировать могут отдельные части конструкции — поверхностный слой и воздушные прослойки, или же вся конструкция в целом. Ясно, что при этом конструкция теряет в значительной мере свои изоляционные свойства.

Однако изолирующие конструкции характеризуются не только своей способностью трансформации материальных колебаний в воздушные, но всеми стадиями процесса передачи звука. Этот сложный процесс может быть рассмотрен отдельно в следующих отношениях:

1) в отношении восприимчивости конструкции к действию звуковых колебаний источника звука;

2) в отношении сопротивляемости передаче колебаний через толщу конструкции;

3) в отношении отдачи звука после передачи.

Восприимчивость конструкции может быть рассматриваема в количественном и качественном отношениях. Количественно восприимчивость возрастает с увеличением коэффициента поглощения поверхности изолятора. Поэтому одной из активных мер сокращения звукопроницаемости конструкции служит устройство поверхности, обращенной к источнику звука, из хорошо отражающего материала. В этих условиях проницаемость относится лишь к той небольшой части энергии, которая воспринимается путем по-

глощения. Дополнительными мерами того же значения являются вышеописанные, а именно заглушение звука в источнике и в помещении (§ 48, 49). Последняя из этих мер требует, однако, сознательно-го к ней отношения, так как по общему правилу заглушение звука в помещении связано с увеличением поглощения его поверхностей. В данном случае это условие не должно распространяться на поверхность изолирующей конструкции для возможного сокращения количества воспринимаемой ею энергии.

В качественном отношении восприимчивость различается по роду колебаний, возникающих в конструкции. Колебания сжатия и растяжения вообще более благоприятны, чем колебания изгиба, почему толщина и массивность конструкций являются их положительными качествами против звукопроницаемости, но, к сожалению, нередко противоречащими условиям экономики. Наоборот, наименее удачными изоляторами служат конструкции, резонирующие всей своей массой, причем материальные колебания изгиба весьма легко переходят в воздушные по другую сторону изолятора, делая его хорошим проводником звука.

Сопротивляемость конструкции передаче колебаний зависит от многих условий и нередко сопряжена с трансформацией колебаний. По практическим целям изоляции изолирующие конструкции возможно разделить на изоляторы воздушных и материальных колебаний, в зависимости от той категории колебаний, распространению которых они предназначены препятствовать. Таким образом, изоляция воздушных звуковых колебаний может быть осуществлена без их трансформации путем применения мало пористых изоляторов или же посредством непористых изоляторов с двумя последовательными трансформациями сперва из воздушных в материальные, а затем обратно из материальных в воздушные колебания. Изоляция материальных колебаний производится аналогично без трансформаций посредством сплошных, однородных или составных изоляторов, а также с трансформациями при наличии в составе изолятора воздушных прослоек.

Отдача звука изолирующими конструкциями связана, как уже было указано, с их пористостью и с условиями перехода материальных колебаний в воздушные и побуждает избегать конструкций, допускающих колебания изгиба.

Совокупность перечисленных условий, сопровождающих проникание звуковых колебаний через изолирующую конструкцию, позволяет установить технические требования для типовых случаев звуковой изоляции.

#### ЗАДАНИЕ XIV

### ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 51. ИЗОЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ КОЛЕБАНИЙ. В тех случаях, когда задача ограничивается изоляцией воздушных звуковых колебаний, надлежит помнить, что основной звукопроводящей средой

служит воздух и что первым техническим условием является создание преграды к распространению воздушных колебаний. Таким образом, категорически необходимо устранение в такой преграде всяких отверстий, скважин, трещин и т. п., создающих прямой путь для проникания воздушных колебаний, хотя бы с ограниченным поперечным сечением. Несколько благоприятнее для целей изоляции наличие в материале не прямых воздушных путей, образуемых связью воздушных пор между собою, обычной в пористых материалах. В виду широкого распространения таковых в строительном деле, трудно обойтись без их применения в изолирующих конструкциях, почему изоляторы воздушных колебаний возможно разделить, по указанному основному признаку, на пористые, непористые и сложные.

Пористые изоляторы в отношении их звукопроницаемости находятся в полной связи с условиями их воздухопроницаемости. По исследованиям Релея

проницаемость возрастает с увеличением пористости, диаметра пор и числа колебаний в секунду, а также с уменьшением толщины изолятора.

Под пористостью в данном случае разумеется отношение площади пор к площади всего сечения. Пористость уменьшается от уплотнения материала сжатием и от насыщения водой. Это последнее обстоятельство может делать качества изоляторов переменными и неустойчивыми.

В практических условиях пористость является основной, но не единственной причиной звукопроницаемости пористых изоляторов. Частично передача колебаний может происходить в них тем же путем, как и в непористых изоляторах. Поэтому для полного ознакомления с процессом необходимо ознакомиться с действием этих последних.

Непористые изоляторы могут передавать воздушные колебания только путем их двукратной трансформации из воздушных в материальные и обратно. Материальные колебания развиваются в форме колебаний сжатия и растяжения или же колебаний изгиба. По теоретическим данным Релея

проницаемость возрастает с уменьшением веса и сокращением числа колебаний в секунду.

т. е. с понижением тона или как раз обратно с проницаемостью пористых изоляторов. Особенно сильная передача осуществляется при совпадении числа колебаний с числом собственных колебаний изолирующей конструкции.

Сопоставление условий, определяющих качества пористых и непористых изоляторов, позволяет выяснить технические требования для изоляторов воздушных колебаний вообще. Такими требованиями являются:

- 1) возможное сокращение пористости или диаметра пор;

2) возможное увеличение толщины изолятора или его веса, что для однородных изоляторов равноценно увеличению их массы.

Эти два принципа должны быть положены в основу проектирования изоляторов воздушных колебаний, причем во многих случаях таковые предпочтительно делаются не однородными, а получают сложную конструкцию. Так, при пользовании пористым материалом в качестве основного, возможно повысить изолирующую способность конструкции применением непористых прослоек или покрытия поверхностей слоем непористого материала. Подобные решения оказываются наиболее осуществимыми и экономичными, так как значительная часть основных строительных материалов является пористой. Поэтому первый принцип в своем практическом применении не вызывает особых затруднений. Все каменные материалы естественного и искусственного происхождения, а также дерево могут служить основой конструкции при условии принятия мер против ее пористости. Таким путем возникают изоляторы с л о ж н о г о т и п а.

Борьба с пористостью осуществляется мерами двух категорий. К первой категории относится устранение местных недостатков конструкции при наличии в ней слабых мест, как швы, стыки, трещины, скважины и пр. Вследствие восприимчивости уха к звукам малой силы, невнимательное отношение к устранению этих недостатков может аннулировать значение всей работы. Лучшим средством для заполнения отдельных пустот и промежутков служат пластичные мало упругие материалы, как невысыхающая замазка, воск, пластилин и т. п. Вторую категорию составляют меры уменьшения общей пористости в виде непористых прослоек или обделок. Обычными средствами этого рода служат окраска масляными красками, оклейка плотными обоями, облицовки из мало пористых плиток на цементном или гипсовом растворе, оштукатурка, причем известковый раствор уступает гипсовому и цементному и т. п. Сюда же относятся прокладки из листового материала, как руберойд, асфальтовый толь и др.

Второй принцип изоляции, выражающийся в потребности увеличения массы изолятора, встречает нередко препятствия к его практическому осуществлению. Действительно условия экономики выдвигают требования возможного сокращения количества использованного материала и толщины конструкции с сокращением ее веса в качестве нагрузки на нижележащие части и, наконец, с возможно полным использованием механических свойств материала. Все эти требования находятся в противоречии с указанным принципом, что приводит нередко к компромиссным половинчатым решениям. Во всяком случае, акустические требования следует контролировать и ограничивать пределами действительной потребности, учитывая, что полная изоляция практически почти неосуществима и может быть ограничиваема в большинстве случаев сокращением интенсивности звука на 30—40 децибелов.

Для выбора материала изоляторов воздушных колебаний возможно руководствоваться указанием, что изолирующие свойства возрастают по мере увеличения произведения массы на скорость звука в данном материале по сравнению с воздухом. Для характеристики главных материалов в этом отношении служит следующая таблица:

Род материала	Скорость звука в секунду	Удельный вес	Произведение скорости на массу	То же по отношению к воздуху
Воздух . . . . .	340	0,0013	0,44	1
Каучук . . . . .	40	0,9	36	82
Пробка . . . . .	450	0,24	108	245
Дерево . . . . .	4000	0,4 — 1,0	1600 — 4000	3636 — 9090
Кирпич . . . . .	3600	1,5	5400	12272
Железобетон . . . . .	4000	1,5	6000	13636
Стекло . . . . .	5000	2,6	13000	29545
Свинец . . . . .	1300	11,3	14700	33409
Латунь . . . . .	3200	8,4	26880	61091
Медь . . . . .	3700	8,9	32930	74841
Сталь . . . . .	5100	7,8	39780	90409

В таблице материалы размещены в порядке возрастания их изоляционных качеств, начиная с воздуха, изолирующая способность которого в последней графе принята за единицу.

§ 52. ИЗОЛЯЦИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ. Материальные колебания могут возникать независимо или — чаще — одновременно с воздушными. Практическую роль материальные колебания начинают играть в большинстве случаев лишь при переходе их в воздушные. Поэтому изоляция материальных колебаний преследует не столько возможность их распространения, как возможность трансформации в воздушные колебания. А так как указанная трансформация легче всего осуществляется при материальных колебаниях изгиба, то изоляции подлежат, в первую очередь, те части, в которых могут возникнуть колебания этого рода, т. е. конструкции из упругих материалов, отличающиеся небольшой массой и способностью резонировать.

Теоретические исследования показывают, что колебания сжатия и растяжения при их распространении в однородной материальной среде подчиняются следующему общему закону:

Потеря энергии пропорциональна пройденному пути, внутреннему трению и квадрату числа колебаний в секунду и в то же время обратно пропорциональна плотности среды и кубу скорости звука в этой среде.

Отсюда следует, что твердые материалы, несмотря на большое внутреннее трение, являются вообще хорошими проводниками колебаний, так как их плотность и особенно скорость звука парализуют влияние трения. Руководствуясь данными таблицы, помещенной в § 51, возможно признать лучшим изолятором материальных колебаний воздуха (при отсутствии резонанса), а затем материалы малого удельного веса и с малой скоростью звука, как резина, воск, пробка,

вата и войлок в уплотненном состоянии и, наконец, из тяжелых материалов — свинец, благодаря ограниченной скорости звука.

Таким образом, изоляторы материальных колебаний в большинстве своем не обладают механическими свойствами, необходимыми для самостоятельных строительных конструкций, но в то же время могут служить в качестве изолирующих прокладок и облицовок. Поэтому изоляция материальных колебаний при конструкциях, хорошо проводящих таковые, состоит обычно в преграждении передачи колебаний в нежелательных направлениях. Способ изоляции всецело зависит от такого направления. Так например конструкция стены допускает изоляцию продольную и поперечную. Продольная изоляция от распространения колебаний по длине или высоте стены с передачей таковых примыкающим конструкциям перекрытий, перегородок и пр. осуществляется введением изолирующих поперечных прокладок во всю толщину стены. Наоборот, поперечная изоляция от передачи материальных колебаний через толщину стены может быть достигнута соответствующей отделкой ее поверхностей. Ковер на полу представляет наглядный пример изолирующей отделки поверхности конструкции.

При пользовании для целей изоляции воздушными прослойками следует иметь в виду, что ограниченные объемы воздуха легко могут резонировать, причем теряют свои изолирующие качества. Во избежание этого, такие прослойки следует ограничивать, хотя бы с одной стороны, отделкою из сильно поглощающего материала, например войлока.

При выборе материала для изолятора надлежит обратить внимание на явление, которое может существенно влиять на изолирующие качества материала. Таким явлением служит преломление звуковых волн при переходе из одной среды в другую, причем угол преломления зависит от разницы скоростей звука в той и другой среде и выражается по принципу Гюйгенса отношением синусов углов, образуемых с нормалью к поверхности лучами падающим и преломленным. Это отношение называется коэффициентом преломления второй среды относительно первой. При переходе энергии в акустически менее плотную среду т. е. в такую, в которой скорость звука более первой, преломление может обратиться в полное внутреннее отражение, если угол падения достигает величины, при которой угол преломления становится более прямого угла. При этом проникание энергии во вторую среду прекращается, и она в данных условиях становится незвукопроводной.

Так, по таблице, помещенной в § 51, коэффициент преломления стекла по отношению к воздуху составляет  $5000 : 340 = 14,4$ , причем синус угла падения для возможности преломления не должен превосходить  $1 : 14,4 = 0,069$ , что отвечает величине угла падения в 4 градуса. Таким образом, все лучи, составляющие с нормалью более 4 градусов, подвергаются полному внутреннему отражению. Этим можно объяснить благоприятные условия передачи звука по трубам, где полого падающие лучи находятся в аналогичных условиях.

Указанное явление наводит на мысль о выгоде применения изоляторов из нескольких слоев материалов с различной акустической плотностью и с чередованием слоев, наиболее различающихся

по плотности. Наглядным примером служит опыт П. Сабина по изоляции звука интенсивностью в 60 децибелов слоями войлока и железа в количестве от 1 до 6, с применением каждого из этих материалов раздельно и в последовательном чередовании. Результаты опыта представлены в следующей таблице:



Рис. 66.  
Распространение звука в трубе.

Число слоев	Интенсивность звука в децибелах		
	Войлок	Железо	Войлок и железо
1	54,3	43,6	43,6
2	51,1	39,4	35,2
3	48,1	36,9	28,4
4	45,2	35,0	23,4
5	43,3	33,1	21,8
6	40,6	31,8	19,4

Таблица подтверждает выгодность чередования материалов различной акустической плотности.

Однако явление преломления звуковых волн существенно меняется при пористых материалах, где, благодаря прониканию воздуха в поры материала и движению его в порах, граница между воздушной и материальной средой становится в известной мере неопределенной. Таковы, например так называемые акустические штукатурки, применяемые в качестве специальных поглотителей. В подобных случаях коэффициент поглощения при падении волн нормально к поверхности материала с возрастанием угла падения возрастает сначала медленно, а потом быстрее, проходит через максимальное значение для некоторой величины угла и затем падает до нуля, когда угол падения достигает 90 градусов с нормалью к поверхности.

§ 53. ИЗОЛЯТОРЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. Хотя средства изоляции воздушных и материальных колебаний существенно различаются между собою, практическая необходимость побуждает нередко к устройству изоляторов универсального назначения. Причина этого лежит как в разнообразии источников звука, так и условиях его распространения, которое во многих случаях осуществляется одновременно в форме воздушных и материальных колебаний.

При проектировании изоляторов указанного типа необходимо считаться с совокупностью принципов устройства изоляторов обеих основных категорий. Таким образом, конструкция изолятора должна обладать:

- 1) возможно малой пористостью,
- 2) возможно большой массой,
- 3) способностью изолировать материальные колебания.

Так как третье условие в значительной мере противоречит двум первым, то и удовлетворение его обычно сопровождается осложнением конструкции дополнительными элементами в форме прослоек

или облицовок. В совокупности, такие изоляции являются конструкциями сложного типа и неэкономичными. Исключения составляют практически мало применимые изоляторы из пластичных материалов, в которых возникновение колебаний невозможно и которые одновременно поглощают и воздушные и материальные колебания.

Изложенные соображения о трудности и неэкономичности приемов осуществления универсальной акустической изоляции побуждают обратить внимание проектировщиков на возможность, путем рационального проектирования зданий и сооружений, сокращения потребности изоляции. Вопросы изоляции от внешних источников звука неразрывно связаны с выбором места для постройки и расположением здания на участке, а потребность изоляции от внутренних источников во многом зависит от группировки помещений в здании и от взаимного расположения и связи отдельных помещений между собою.

## ЗАДАНИЕ XV

### СВЯЗЬ ПЛАНИРОВКИ С ЗАДАЧАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

§ 54. ВЫБОР МЕСТА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ. Вопросы рациональной планировки получают тем большее значение, чем труднее по местным условиям осуществление акустической изоляции здания. Первым вопросом в этой области служит выбор места для постройки в связи с наличием и расположением главнейших источников внешних шумов. Такими источниками, в первую очередь, служат шумы от промышленных производств и от транспорта. Поэтому вопрос выбора места связан с приемом планировки населенного места.

Практическое разрешение этого вопроса в новейших планировках осуществляется применением принципа концентрации главнейших источников шума. Концентрация промышленного шума достигается объединением крупных промышленных объектов и выделением их в особый район в надлежащем удалении от других видов строительства, с изоляцией этого района от смежных так называемыми защитными полосами древесных насаждений и т. п. Такое разрешение задачи на первый взгляд может казаться непрактичным, так как сосредоточение источников шума может осложнить акустическую изоляцию тех помещений в пределах промышленного района, которые по своему назначению не могут быть шумными. Однако, следует иметь в виду, что понятие бесшумности является относительным, и малозумными признаются помещения, в которых интенсивность звука сокращается по отношению к местным источникам звука до 30—40 децибелов, разумеется при условии, что остаточный шум не может вызывать психических и физиологических уклонений в организме. Так, по исследованиям Теккера, в Нью-Йорке остаточный шум в жилых домах определен в размере 45—20 децибелов, причем последняя величина относится к самому спокойному дому на тихой улице города.

Концентрация шума, вызываемого транспортом, достигается раз-

делением городских путей сообщения на магистральные и местные, с сосредоточением лишь на некоторых из них грузового и массового движения. Такое решение обладает и экономическими преимуществами, сокращая количество путей с широкою и дорогою одеждою в соответствии с предъявляемыми к ней техническими требованиями. В связи с этим различные виды строительства группируются по своему назначению, с сосредоточением зданий торгового, общественного и административного значения у магистральных путей и выделением жилых, учебных и лечебных зданий в районы местных путей сообщения с ограниченным транспортом. Более прочная одежда улиц является в большинстве случаев и более шумною, почему местный транспорт может отличаться не только по интенсивности движения, но и по его бесшумности.

В существующих местностях указанные принципы планировки могут быть проводимы в обычных условиях лишь частично и в порядке планомерного и последовательного регулирования существующей планировки. Это создает нередко значительные затруднения при выборе места для постройки, вследствие вредных влияний соседней застройки и сети уличного движения. В качестве местных мер акустической изоляции могут быть применяемы защитные древесные насаждения и замена шумной уличной одежды бесшумной.

§ 55. РАСПОЛОЖЕНИЕ ЗДАНИЯ НА УЧАСТКЕ. В отношении связи с влиянием уличного шума расположение здания на участке далеко не безразлично. Часто практикуемое расположение развернутым фронтом по границе участка, на так называемой красной линии, является наименее выгодным по легкости доступа к зданию уличного шума в форме как воздушных, так и материальных колебаний. Воздушные звуковые волны, достигая фасадной стены по кратчайшему и притом нормальному направлению, производят наиболее активное действие. Материальные колебания уличной одежды беспрепятственно проникают в ее толще к стенам здания, и через них в помещения, где трансформируются в воздушные.

Для ослабления действия воздушных колебаний могут служить следующие меры:

- 1) перенос здания в глубь участка от лицевой границы,
- 2) поворот здания к оси улицы под углом или торцевым фасадом,
- 3) посадка между зданием и улицей зеленых насаждений.

Вследствие того, что распространение звука на улице приближается к условиям открытого пространства, все эти меры следует считать практичными. В первом случае сила внешнего шума падает обратно пропорционально квадратам удаления; во втором — благодаря пологому направлению лучей по отношению к фасадным стенам, преломление их может перейти в полное внутреннее отражение, без проникания в массу стен путем поглощения (§ 52); наконец, последняя мера служит для отражения и поглощения внешних шумов, а степень ее полезного действия зависит от густоты насаждений.

Борьба с прониканием в здание материальных колебаний осуществляется применением соответствующих изоляторов. Жесткая уличная одежда, служащая хорошим проводником материальных колебаний, не должна никоим образом примыкать вплотную к стенам здания. Для заполнения разрыва могут служить разрыхленный грунт.

газон, открытый ров и т. п. Уширение разрыва в этом случае особой роли не играет.

**§ 56. ГРУППИРОВКА ПОМЕЩЕНИЙ В ЗДАНИИ.** По выяснении расположения здания на участке следующим вопросом служит группировка помещений. В отношении акустической изоляции помещения могут быть разделены на шумные — с определенными источниками звука или шума, на безразличные в отношении шума и на требующие охраны тишины. Первая группа безразлична в отношении мер ее охраны, но служит главным объектом, на который распространяются меры изоляции со стороны охраняемых помещений; ко второй группе относятся помещения со случайными источниками шума и вообще помещения для кратковременного пребывания; наконец, помещения охраняемые могут быть подразделены на тихие, в которых звука и шума не предполагается, и на предназначенные к слушанию звуков от определенных источников в благоприятных условиях без препятствий, создаваемых доступом иных звуков и шумов.

Принцип правильной группировки помещений состоит в раздельном расположении первой и третьей групп, причем помещения второй группы могут занимать промежуточное положение. Несмежное расположение основных групп облегчает изоляцию охраняемых помещений и иногда может делать ее даже излишнею. Таким образом при помощи правильной группировки можно значительно сократить и даже устранить применение специальных приемов изоляции.

Означенная группировка должна равным образом учитывать условия доступа звуков извне и потребность их изоляции. Устранение влияние уличного шума простейшим образом достигается расположением изолируемых помещений в удалении от улицы с окнами и дверями в противоположную от улицы сторону. Однако наименее благоприятный случай представляет расположение охраняемых помещений окнами на тесные замкнутые двory при наличии там источников шума. При хорошо отражающих поверхностях стен шум в этих условиях может значительно возрасти в силе и становится трудно переносимым.

Что касается вопроса группировки помещений по этажам здания, то простейшим и целесообразным решением служит расположение однородных групп одна над другою. При этом облегчается изоляция от распространения шума по этажам как через перекрытия, так и через лестничные клетки.

**§ 57. ПЛАНИРОВКА ИЗОЛИРУЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ.** Последним вопросом планировки является правильное расположение в здании отдельных изолируемых помещений по отношению к смежным и организация связи с ними в соответствии с задачами акустической изоляции. Выбор рациональной формы помещения связан в известной мере с его расположением по отношению к смежным помещениям и с конструкцией смежных стен.

Учитывая практическую важность возможного сокращения размеров изолирующих конструкций при данной форме помещения, следует давать ему такое расположение, при котором достигается указанное сокращение. Так, если помещение изолируется от звуков извне, то ему следует дать торцевое положение по отношению к на-

ружной стене; равным образом, два взаимно изолируемые помещения рационально сопрягаются между собою короткими, а не длинными сторонами. При этом количество проникающей в помещение звуковой энергии убывает пропорционально сокращению площади смежной стены, а кроме того сокращение размеров влечет увеличение жесткости конструкции, чем улучшает ее изолирующие качества, так как жесткость устраняет колебания изгиба.

По аналогичным соображениям, если стены помещения частью капитальной, частью легкой конструкции, следует считать целесообразным, чтобы изолирующими стенами служили именно капитальные, так как их изолирующие свойства по природе значительно выше, чем в легких стенах типа перегородок.

Наконец, дверные проемы, неизбежные для связи изолируемого помещения с другими и составляющие слабое место изолирующих конструкций, желательно располагать в стенах, не служащих для изоляции. В крайнем случае, при неосуществимости этой меры, следует сокращать по возможности число и размеры дверей или снабжать таковые тамбурами.

Остается вопрос об условиях изоляции помещений в различных этажах, разделенных междуэтажным перекрытием. Задача эта существенно различается в зависимости от типа изолируемого источника звука. Если источником служит человеческий голос, звуки скрипки, флейты и т. п., распространяющиеся исключительно или по преимуществу в форме воздушных колебаний, то расположение источника звука над или под изолируемым помещением почти безразлично. Совершенно иначе обстоит дело, когда материальные колебания получают значительную роль в распространении звука, как например, при игре на рояле, при работе на пишущей или швейной машине, токарном станке, не говоря уже о ходьбе, танцах, передвижении мебели и пр. В этих условиях передача звуков сверху вниз несравненно значительнее, чем в обратном направлении. В первом случае материальные колебания источников звука, соединенных с перекрытием, легко проникают через его толщу и, трансформируясь в воздушные колебания, достигают слушателей в нижнем помещении. Обратный путь снизу вверх значительно сложнее. Для этой цели материальные колебания пола нижнего помещения должны пройти длинный путь через стены и междуэтажное перекрытие и, достигнув верхнего помещения, трансформироваться в воздушные колебания. Возможен и другой путь, более короткий, но не менее сложный, при котором воздушные колебания источника достигают потолочного перекрытия, после трансформации в материальные проникают в верхнее помещение и путем вторичной трансформации в воздушные колебания достигают слушателей. Вот почему в многоквартирных домах вообще легко быть в курсе происходящего этажом выше, в то время как из нижнего этажа почти ничего не слышно.

В отдельных случаях может быть поставлен вопрос об изоляции помещения от доступа шума через верхнее кровельное перекрытие. Такая изоляция требует прежде всего преграждения доступа к поверхности кровли прямых звуковых лучей от внешних источников. Поскольку в большинстве случаев таким источником служит уличный шум, задача не создает затруднений при условии защиты по-

верхности кровли от доступа восходящих звуковых лучей. Труднее разрешается вопрос изоляции шума аэропланов и дождя, причем первый служит источником чисто воздушных, а второй по преимуществу материальных колебаний.

Полезно коснуться еще одного частного случая планировки, который представляют устанавливаемые в помещениях телефоны будки. Для выбора правильного приема изоляции надлежит выявить предварительно сущность настоящей задачи. Основным условием является взаимность изоляции как будки от помещения, так и обратно. Источник звука в будке распространяет одновременно воздушные и материальные колебания. Кроме того надлежит считаться с тем, что источник звука в будке по ограниченным ее размерам обладает скорее избытком, чем недостатком энергии. Учитывая изложенное и считаясь с невозможностью заглушения звука в источнике, первую мерой изоляции следует признать заглушение звука в будке путем обделки внутренних поверхностей стен ее звукопоглощающим материалом. Следующей мерою является изоляция стен будки от передачи как воздушных, так и материальных колебаний. Для изоляции воздушных колебаний стены должны быть малопористы и обладать достаточной массой, препятствующей развитию в них колебаний изгиба. Изоляция материальных колебаний требует разобщения будки в целом от помещения, в котором она расположена. Поэтому будка должна иметь самостоятельные стены, пол и потолок, по возможности без материальной связи с поверхностями, ограничивающими помещение. При устройстве в стенах будки окон, таковые следует делать возможно ограниченными размерами и снабжать толстыми стеклами в хорошо уплотненных фальцах. Дверь должна быть ограниченными размерами с возможно плотным створом. При этом следует иметь в виду, что вследствие малого объема будки захлопывание двери сопровождается повышением воздушного давления, что влечет на некоторый период времени ослабление слуховой способности. Этого неудобства можно полностью избежать при замене створной двери раздвижною.

#### ЗАДАНИЕ XVI

### ТИПЫ ВЕРТИКАЛЬНО ИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 58. ФУНДАМЕНТЫ. Вопрос о мерах акустической изоляции фундаментов возникает в тех случаях, когда они воспринимают материальные колебания от некоторых источников звука и в свою очередь могут распространить их на другие конструктивные элементы здания. Источником таких колебаний служат обычно вибрирующие быстроходные машины. Основной принцип изоляции состоит в расположении между источником колебаний и фундаментом изолирующей прокладки для заглушения материальных колебаний. Однако эта мера далеко не всегда бывает достаточна, особенно при случайном совпадении числа колебаний машины с числом собственных колебаний массы фундамента. В этих условиях фундамент начинает резонировать и становится вторичным источником распространения материальных колебаний.

Более совершенная изоляция фундаментов осуществляется совокупностью следующих приемов:

1. Установка машины на отдельном фундаменте, независимом от фундаментов здания.

2. Введение изолирующей прокладки между машиной и ее фундаментом.

3. То же между фундаментом под машиной и грунтом или искусственным основанием под фундаментом.

4. Углубление фундамента под машиной на возможную глубину и увеличение массы фундамента по сравнению с колеблющейся массой.

5. Изоляция фундаментного массива со всех сторон свободным промежутком шириною от 5 до 10 см.

Расположение изолирующих прокладок может изменяться, и машина может быть устанавливаема на фундаменте непосредственно при целесообразности увеличения колеблющейся массы и понижения

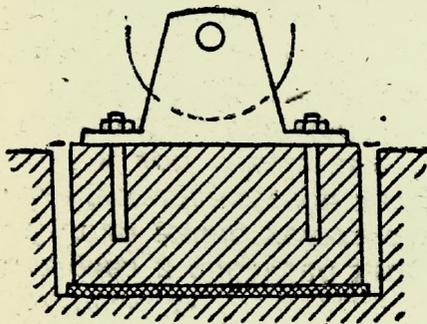


Рис. 67. Изоляция фундамента.

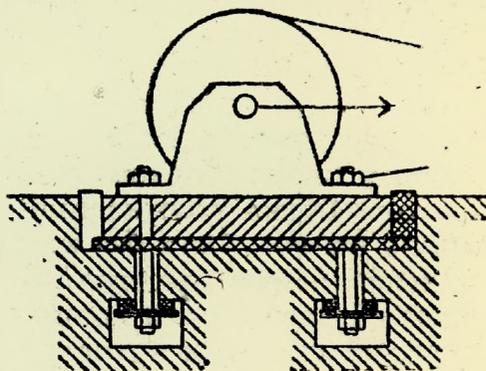


Рис. 68. Изоляция фундамента при боковом давлении.

ее центра тяжести. Болты, скрепляющие машину с фундаментной кладкой, располагаются полностью выше уровня прокладки, в ином же случае под шайбами болтов требуются дополнительные изолирующие прокладки. Если в машине развивается значительное горизонтальное усилие, опасное для устойчивости фундамента, допустима замена одного из свободных боковых промежутков боковой изолирующей прокладкой. Возможно объединение на общем фундаменте группы машин, если только их колебания не причиняют взаимного вреда.

Наиболее употребительным материалом для изолирующих прокладок служит пробка натуральная, прессованная и, наконец, армированная железом, смотря по величине расчетного давления. Из других материалов применяются войлок, резина, свинец, дерево, песок и гравий и в отдельных случаях пружинные приспособления.

Свободные промежутки вокруг изолируемых фундаментов должны быть сохраняемы на всю высоту и на уровне чистого пола могут быть прикрыты с оставлением узкой щели, или же заполнены полосой из изолирующего материала. Общим правилом при изоляции фундаментов служит расположение изолирующих прокладок у самого источника колебаний для их локализации до распростране-

ния на большие расстояния, когда борьба с ними значительно осложняется.

§ 59. КАПИТАЛЬНЫЕ СТЕНЫ. Стены нуждаются в большинстве случаев в изоляции воздушных колебаний, так как непосредственная связь источников звука со стенами представляет скорее случайное, чем постоянное явление. Такими источниками могут служить удары, звонки, телефоны и т. п., носящие вообще временный характер. Таким образом по своему устройству стены должны отвечать в первую очередь требованиям, установленным для изоляторов воздушных колебаний.

Капитальные стены, каменные, кирпичные и бетонные, обычно по своей конструкции удовлетворяют требованиям жесткости, достаточной для противодействия развитию в них колебаний изгиба. При устройстве стен каркасного типа заполняющие элементы стены равным образом должны быть достаточно жесткими. Деревянные стены как рубленые, так и каркасные, должны удовлетворять тому же требованию, которое при каркасной конструкции удовлетворяется обычно путем заполнения промежуточного пространства между двусторонней обшивкой сыпучим материалом для надлежащего увеличения массы стены. Вообще по принципу массивности капитальные стены зданий в большинстве случаев являются акустически удовлетворительными.

Удовлетворение второго принципа малой пористости требует в некоторых случаях специальных приемов. Так как основные материалы капитальных стен нередко обладают значительной пористостью, то для указанной цели применяются малопористые облицовки, как оштукатурка, окраска, оклейка обоями и пр. Особого внимания в этом отношении требуют деревянные стены, в которых усушка и растрескивание дерева, а также усадка заполнения при каркасной конструкции способствуют возрастанию пористости с течением времени. Этим же свойством в известной мере обладают и кирпичные стены, которые при просыхании кладки становятся более пористыми.

Из различных видов штукатурки заслуживают предпочтения более пластичные — глиняная и известковая, несмотря на их относительно большую пористость. Часто предпочитаемые твердые штукатурки, гипсовая и цементная, на подкладке из пробки или войлока или при неплотном прилегании к стене легко могут резонировать и тем увеличивать звукопроводность всей конструкции. Способность резонировать характеризуется резким звуком при ударе о поверхность стены.

При такой конструкции капитальные стены в большинстве случаев являются хорошими проводниками материальных колебаний, почему в местах ожидаемого возникновения последних требуется применение дополнительных мер изоляции. Такими местами являются в первую очередь места связи капитальных стен с примыкающими к ним перекрытиями. Передача звука от трамвайных проводов при подвесной системе устраняется установкой изоляторов на примыкающих к наружным стенам здания натяжных тросах.

§ 60. ПЕРЕГОРОДКИ. Под перегородками в отличие от капитальных стен разумеются стены легкой конструкции, не играющие самостоятельной конструктивной роли в здании и предназначенные для раз-

деления здания на части с целью изоляции последних. Среди различных целей изоляции не последнюю роль играет изоляция акустическая. Однако осуществление этой цели встречает значительные практические затруднения.

Массивность конструкции, как было неоднократно указано, служит основным условием ее сопротивляемости передаче воздушных колебаний, и в то же время по конструктивной роли перегородок это качество является излишним и противоречащим требованиям экономики. Поэтому рациональным решением следует признать возможное сокращение размеров перегородки в длину и высоту для обеспечения ее жесткости при ограниченной толщине, или же усиление жесткости перегородки помощью жесткого каркаса при достаточной жесткости заполняющих каркас элементов. Таким образом нормальным типом акустически изолирующей перегородки значительных размеров будет снабженная каркасом с выступающими с одной или двух сторон жесткими вертикальными, а иногда и горизонтальными ребрами. Внешний неблагоприятный вид такой перегородки может быть улучшен посредством заполнения или обшивки каркаса с обеих сторон.

В этом последнем виде тип перегородки получается аналогичным применяемому для целей тепловой изоляции, так как неподвижные объемы воздуха являются хорошими тепловыми изоляторами. Однако акустические качества такого типа подвержены большому сомнению из-за возможности резонирования замкнутых ограниченных объемов воздуха, что аннулирует изоляционные качества всей конструкции. Поэтому стена с пустотами не встречает возражений лишь при условии, что каждая из двух ее оболочек обладает достаточно жесткой конструкцией.

Нормальным типом двойной перегородки служит такая, пустоты которой заполнены сыпучим плотно залегающим материалом, тормозящим самостоятельные колебания упругой обшивки. Для заполнения могут служить сухой песок, толченый шлак, инфузорная земля, пробковые опилки и т. п.

Легкие перегородки огнестойкого типа железобетонной или железокирпичной конструкции являются мало удовлетворительными изоляторами, так как в большинстве случаев не обладают достаточной жесткостью.

Для обеспечения малой пористости перегородок служат средства, применяемые с этой целью и для капитальных стен зданий.

Общим внешним признаком удовлетворительности перегородки, как изолятора, при обеспеченной ее малой пористости служит глухой и низкий звук при ударе о ее поверхность.

В виду громадного разнообразия конструкций изолирующих перегородок, были сделаны неоднократные попытки классификации их по изолирующим качествам. Общим характерным признаком их звуконепроходимости может служить так называемый коэффициент непроходимости, выражаемый количеством децибелов, на которое сокращается интенсивность звука при проникании через перегородку. Примерная классификация дана в следующей таблице.

Класс изоляции	Количество децибелов	Признак класса	Практическая оценка непроницаемости
I	> 60	Разговор обычной силы не слышен	Очень хорошая
II	50 — 60	Едва слышен и неразличим	Хорошая
III	40 — 50	Хорошо слышен, но плохо различим	Посредственная
IV	< 40	Хорошо слышен и различим	Плохая

По общему правилу непроницаемость сплошных конструкций однородного состава по отношению к воздушным колебаниям возрастает с увеличением их веса. По опытам Бергера перегородка весом в 2 кг на кв. м обладает непроницаемостью около 20 децибелов, причем с увеличением веса в 10 раз непроницаемость возрастает на 15 децибелов. Таким образом перегородка весом в 200 кг на кв. м дает непроницаемость около 50 децибелов. Для более точного определения коэффициента непроницаемости, а равно и для расчета сложных конструкций с воздушными прослойками, приходится прибегать к помощи специальных лабораторных исследований.

§ 61. ПРОЕМЫ В СТЕНАХ. Проемы в стенах и перегородках для устройства дверей и окон представляют вообще слабое место изолирующих конструкций. По классификации непроницаемости в таблице, приведенной в § 60, двери и окна одиночные относятся обычно к последнему IV классу, а двойные — не выше III класса. Поэтому основной мерой служит полное устранение проемов в стенах, исполняющих роль изоляторов, а при исключительной к тому необходимости возможное сокращение числа и размеров проемов.

Установка створов в проемах требует особой тщательности. Поэтому для навески створов применяются коробки жестких профилей с широкими фальцами, которые для плотности притвора полезно снабжать войлочными или резиновыми прокладками. Для плотного укрепления коробок в проемах следует в кладке стен оставлять так называемые четверти и тщательно проконопачивать все скважины и промежутки между коробкой и кладкою.

Все деревянные части требуют для своего изготовления возможно сухого леса, так как последующая усушка и коробление могут существенно отражаться на плотности притвора. С этой же целью приправка и навеска створов в установленных для них коробках производится как можно позже во избежание возможного деформирования коробок при осадке здания.

Дверные створы из филенок в обязательствах акустически неудовлетворительны, так как легко резонируют; значительно лучше створы переклейные из склеенных накрест рядов досок или фанеры, причем полезным добавлением могут служить прокладки из картона или асбеста. Требуется плотная приправка фальцев в притворе и снабжение замочных скважин личинками. При навеске в одном проеме двух

последовательных дверей возникает опасность резонанса в замкнутом объеме воздуха между ними. Для предупреждения этого полезно обить хотя бы одну из дверей с внутренней стороны звукопоглощающим материалом. Выгоднейшее расстояние между дверными створами, по указанию Винтергерста, составляет от 5 до 10 см.

Оконные переплеты следует делать с горбылями возможно жестких профилей и снабжать толстыми стеклами небольшого размера с плотным закреплением в фальцах. Целесообразно ограничивать размеры створных частей в оконных переплетах и снабжать их в фальцах войлочными или резиновыми прокладками. Наружные и внутренние ставни могут содействовать повышению изоляционных качеств, особенно при обивке их звукопоглощающим материалом.

При устройстве верхнего освещения при посредстве остекленных фонарей, в целях изоляции от доступа уличного шума, следует располагать их таким образом, чтобы восходящие звуковые лучи не могли достигать остекленных поверхностей фонарей.

Применение аналогичного приема для окон встречает практические затруднения, так как расположение оконных переплетов в глубоких нишах оконных проемов невыгодно отражается на освещенности помещений.

**§ 62. РАСЧЕТ ИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ.** Классификация конструкций по степени их непроницаемости для воздушных звуковых колебаний (§ 60) дает возможность выбора соответствующего класса в конкретных условиях. Однако для выбора конструкций необходимы надлежащие признаки, позволяющие отнести конструкцию к тому или иному классу. Мало того, в практических условиях нельзя не считаться с разнообразием и неоднородностью состава изолирующих конструкций, которые в различных частях могут существенно различаться по своим изолирующим качествам. Наглядным примером такой неоднородной конструкции служит стена с оконными или дверными проемами, где проницаемость проемов может во много раз превосходить проницаемость стены. Таким образом на основе указанной классификации возникает потребность надлежащего расчета изолирующих конструкций.

В качестве практического приема расчета возможно указать прием, предложенный Петцольдом и обоснованный на данных Кнудсена о влиянии поглощения помещения на изолирующие свойства конструкции. Это влияние формулируется выражением  $M = \frac{aS}{D}$ , где

$M$  — потеря силы звука при проходе через изолирующую конструкцию;  $aS$  — количество поглощения изолируемого помещения в сабинах;  $D$  — относительная проницаемость конструкции по сравнению с полной проницаемостью кв. м открытого проема, принимаемой за единицу. Величина  $aS$  определяется общим приемом, указанным при вычислении реверберации (§ 32),

$$aS = a_1S_1 + a_2S_2 + \dots$$

т. е. суммой произведений поглощающих поверхностей на их коэффициенты поглощения. Величина  $D$  может быть вычислена аналогичным путем, как сумма произведений составляющих площадей изо-

лирующей конструкции на их коэффициенты проницаемости. Под последним коэффициентом разумеется относительная проницаемость кв. м конструкции по сравнению с проницаемостью открытого проема той же площади. Непроницаемость всей конструкции в децибелах определяется при этом выражением  $10 \log_{10} M$ . Таким образом для разрешения практических задач необходимо знать коэффициенты проницаемости конструкций.

Определение этих коэффициентов производится лабораторным путем в специальных испытательных камерах, причем значения коэффициентов получаются все же приближенными, в виду легкости перехода материальных колебаний сжатия и растяжения в колебания изгиба, значительно увеличивающие проницаемость конструкций. Поэтому показания различных исследователей существенно разнятся между собою, хотя это различие смягчается при выражении непроницаемости конструкции в децибелах. В нижеследующей таблице даны коэффициенты проницаемости  $d$  по различным источникам и потому частично не вполне увязанные между собою. Таблица дополнена указанием непроницаемости тех же конструкций в децибелах, определяемой из выражения  $10 \log_{10} \frac{1}{d}$ .

Наименование конструкции	Толщина в см	Коэффициент проницаемости	Непроницаемость
Кирпичная стена } . . . . .	12	0,00001	50
	25	0,00 003	55
	38	0,0000016	58
	51	0,000001	60
Деревянная стена из сосновых шпунтованных досок . . .	2	0.012	19
То же, оклеенная с двух сторон бумагой . . . . .	2,1	0,0025	26
То же, обитая с одной стороны свинцом . . . . .	2,04	0,000004	53
Пробковая плита . . . . .	5	0,00018	37
То же, оклеенная с двух сторон бумагой . . . . .	5,1	0,00012	39
То же, обитая с одной стороны свинцом . . . . .	5,04	0,000004	54
Деревянная стена двойная из двух облицовок по 2 см с воздушным прослойком в 5 см . . . . .	9	0,006	22
То же с засыпкой пробковой крошкой . . . . .	9	0,0036	24
То же с заполнением песком . . . . .	9	0,0002	37
Оконный переплет одиночный с плотным притвором . . .	—	0,00053	32
Стекло толщиной 6 мм . . .	0 6	0,0011—0,0005	30—32
Оконный переплет двойной с плотным притвором . . . . .	—	0,000006	52
То же с неплотным . . . . .	—	0,023	16
То же при исключительной плотности . . . . .	—	0,0000026	56

По данным Геймбургера проницаемость дверей близка к проницаемости окон; междуэтажные перекрытия обычных конструкций со смазкой в большинстве случаев обладают коэффициентом проницаемости в пределах 0,00001—0,00001 и в отношении воздушных колебаний относятся к двум высшим классам.

**Пример.** При уличном шуме в 50 децибелов требуется определить достаточность изоляции помещения при площади наружной кирпичной стены в 20 кв. м с окном, имеющим одиночный переплет площадью 3 кв. м.

Принимая коэффициенты проницаемости стены в 0,000003 и окна в 0,00053, имеем:

$$D = 0,000003 \times 20 + 0,00053 \times 3 = 0,00165.$$

Если по местным условиям поглощение помещения составляет 30 сабинов, то

$$M = \frac{aS}{D} = \frac{30}{0,00165} = 18182, \text{ откуда } 10 \log_{10} M = 42,6 \text{ децибела.}$$

При интенсивности уличного шума в 50 децибелов и непроницаемости изолирующей конструкции в 42,6, в помещение проникает остаточный шум интенсивность  $50 - 42,6 = 7,4$  децибела, вообще мало заметный и допустимый в помещениях, за исключением требующих особой охраны тишины. Конструкция в совокупности относится к III классу.

## ЗАДАНИЕ XVII

# ГОРИЗОНТАЛЬНО ИЗОЛИРУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗДАНИЯ

§ 63. МЕЖДУЭТАЖНЫЕ ПЕРЕКРЫТИЯ. Изоляция междуэтажных перекрытий представляет один из наиболее сложных вопросов акустической изоляции по трудности разграничения путей передачи звука. Основными колебаниями в данном случае являются материальные, возникающие от разного рода механических воздействий на поверхность пола. Распространение таких колебаний возможно через конструкцию перекрытия, а равным образом через примыкающие части стен здания с последующей трансформацией их в воздушные колебания в том и другом случае. Поэтому и приемы изоляции должны учитывать возможность существования обоих этих путей совместно.

Конструкция междуэтажных перекрытий по общему правилу является сложною и состоит из рабочей поверхности или так называемого чистого пола, несущих конструктивных элементов — балок с заполнением между ними и ограничивающей перекрытие снизу потолочной конструкции. Примером упрощения конструкции может служить система, еще недавно находившая сторонников ее применения и состоящая из сплошного ряда досок, уложенных на ребро вплотную одна к другой. Эта система в аку-

стическом отношении не выдерживает критики в виду несоответствия основным принципам изоляции.

Сложные конструкции целесообразно рассмотреть отдельно в отношении каждого из составляющих элементов.

Чистый пол служит местом возникновения материальных колебаний и в то же время воспринимает воздушные колебания. Борьба с распространением материальных колебаний может быть осуществлена двумя способами:

1. Заглушением звука в источнике, если поверхностный слой служит дурным проводником и обладает заглушающим свойством, как ковер, циновка, резина, пробковые плиты, линолеум и пр.

2. Изоляцией чистого пола от поддерживающих и примыкающих поверхностей, если таковой служит хорошим проводником, как дерево, мрамор, искусственные плитки и т. п. Воздействие воздушных колебаний может выразиться колебаниями изгиба, если чистый пол имеет опоры лишь в некоторых точках, и колебаниями сжатия и растяжения — при сплошном прилегании чистого пола и к нижележащему слою. В связи с этими мерами изоляции могут служить:

1) в первом случае — уничтожение резонанса в подпольном пространстве и достаточная масса и малая пористость остальной части конструкции перекрытия;

2) во втором случае — только вышесказанные требования по остальной части конструкции.

Резюмируя совокупность требований изоляции против совместного действия материальных и воздушных колебаний, возможно принять следующие общие меры изоляции:

1) изоляция чистого пола от поддерживающих конструкций и примыкающих стен против распространения материальных колебаний, если таковые не заглушены в месте их возникновения;

2) уничтожение резонанса воздушных прослоек;

3) массивность конструкции перекрытия, препятствующая возникновению в ней колебаний изгиба;

4) малая пористость конструкции, противодействующая прониканию воздушных колебаний.

Первая мера осуществляется изолирующими прокладками во всех местах соприкосновения. Прокладки размещаются между настилом чистого пола и поддерживающими его балками или переводами и делаются из пробки, картона, асфальтового толя, торфолеума и т. п. Независимо от этого чистый пол не должен примыкать вплотную к стенам, и остающиеся промежутки заполняются аналогичным изоляционным материалом. Уничтожение резонанса воздушных прослоек обеспечивается таким чередованием материалов, чтобы воздушные прослойки примыкали хотя бы одной стороной к слою сильно поглощающего материала. Затем массивность конструкции требует введения в нее массивного заполнения между несущими балками, что увеличивает вес и стоимость конструкции. Наконец, малая пористость конструкции вызывает потребность применения в ней хотя бы одного слоя малопористого материала. Таким образом совокупность мероприятий по акустической изоляции предопределяет в значительной мере состав конструкции перекрытия. Следует отметить при этом, что условие массивности конструкции не является исключи-

тельно акустическим требованием, но совпадает с требованиями тепловой изоляции, а также с условием обеспечения достаточной жесткости конструкции в отношении сопротивляемости живой силе при сотрясении и ударах.

Балки, как наиболее напряженные элементы перекрытия, могут быть осуществляемы только из материалов, служащих хорошими проводниками материальных колебаний. Поэтому возникает необходимость их двойной изоляции:

- 1) от чистого пола, о чем было указано выше;
- 2) от стен здания против взаимной передачи материальных колебаний с дальнейшим их распространением.

В связи с этим концы балок не должны быть зажимаемы в кладке, а оставляемы свободными на изолирующих подкладках, без соприкосновения с кладкой с других сторон или с обертыванием концов изолирующим материалом, во избежание случайного соприкосновения с кладкой. Полное нарушение принципов изоляции представляют железобетонные рамные конструкции, где балки, стойки и прогоны иногда вместе с заполнением связаны в одно неразрывное целое и где вся система служит хорошим проводником материальных колебаний. Осуществление изоляции в этих условиях крайне затруднительно и возможно лишь путем сплошной обделки изолирующими материалами всех поверхностей конструктивной системы, могущих трансформировать материальные колебания в воздушные. Аналогичные условия возникают и при замене балок коренными сводами, неразрывно связанными со стенами. Во всех таких случаях требуется тщательная изоляция чистого пола от поддерживающей и примыкающих конструкций.

Заполнение между балками состоит обыкновенно из двух частей: конструктивного несущего слоя — сводиков, плит или черного пола и слоя заполняющего, носящего название смазки. Конструктивный слой, как напряженный и обладающий свойствами хорошего проводника материальных колебаний, подлежит аналогично с балками изоляции в местах его соприкосновения со стенами. Заполняющий слой представляет собой ту инертную массу, которая необходима для придания конструкции перекрытия свойств хорошего изолятора воздушных колебаний, почему помимо толщины слоя целесообразна его малая пористость. Если заполняющий слой является частично или полностью поддерживающим конструкцию чистого пола, его полезно сделать из материала, служащего плохим проводником материальных колебаний, например из пробковых опилок. Состав заполняющего слоя может быть неоднородным, в виде нескольких последовательных слоев, обеспечивающих в своей совокупности удовлетворение требований изоляции. Каждый из составляющих слоев может преследовать самостоятельную меру изоляции, например заглушение материальных колебаний, малую пористость и увеличение массы конструкции.

Потолочная конструкция может представлять собою нижнюю поверхность заполнения между балками или самостоятельный конструктивный слой. В том и другом случае ее роль в отношении акустической изоляции весьма ограничена, но зато имеет крупное значение в акустическом благоустройстве помещения. По-

толочная конструкция, отделенная от заполнения воздушными прослойками, обладает нередко способностью резонировать. В этих случаях полезно изолировать потолочный слой от стен помещения против передачи им материальных колебаний.

Изложенные соображения показывают, что сложность и многослойность конструкции междуэтажных перекрытий имеют свои практические основания и в отношении акустической изоляции могут представлять наиболее экономичные решения, отвечающие по степени непроницаемости (§ 60) для воздушных колебаний требованиям I и II класса. Звуконепроницаемость при ударах осуществляется значительно труднее по малой определенности задачи.

Верхнее под чердачное перекрытие отличается обычно от междуэтажных отсутствием в нем источников материальных колебаний за исключением связанных с техническим оборудованием здания. Однако с наличием воздушных колебаний, вызываемых шумом дождя, града, ветра, необходимо считаться, почему независимо от условий тепловой изоляции верхнее перекрытие должно быть малопористым и обладать достаточной массивностью. Отдельные

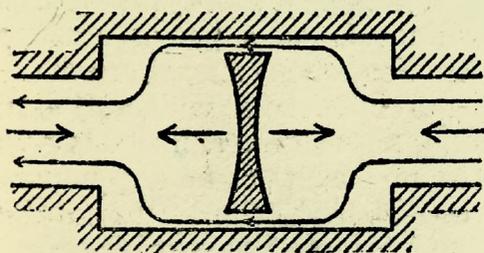


Рис. 69. Отражательный экран в вентиляционном канале.

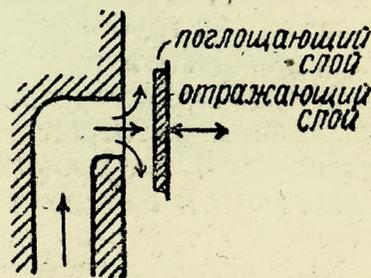


Рис. 70. Защитный экран.

источники материальных колебаний, как например камеры с вытяжными вентиляторами, подлежат особой изоляции, равным образом как и мостки для прохода по чердаку.

При объединении верхнего перекрытия и кровли в общую конструкцию задача акустической изоляции становится аналогичной с изоляцией междуэтажных перекрытий.

§ 64. ОТВЕРСТИЯ И КАНАЛЫ. Отверстия в изолируемых конструкциях для пропуска электропроводки, трубопроводов, трансмиссий и пр. играют в отношении передачи воздушных колебаний ту же вредную роль, что и неплотные створы проемов, а также пористость конструкций. Так как тщательное заполнение малых скважин затруднительно, то по общему правилу требуемые сквозные отверстия делают с некоторым запасом для возможности плотного заполнения промежутков на всю толщину конструкции. Для заполнения выбирается материал малопористый и в то же время дурной проводник материальных колебаний против их распространения в примыкающей конструкции. Таким материалом может служить пробка, уплотненный войлок и (для мелких отверстий) невысыхающая замазка.

Не меньший ущерб в области охраны тишины приносят обобщающие несколько помещений вентиляционные каналы. При централизованной системе подачи и вытяжки воздуха такое обобщение не-

избежно, причем движение воздуха в каналах не играет существенной роли вследствие значительно большей скорости распространения звука. В целях изоляции возможно каждое из изолируемых помещений снабжать отдельным каналом, а сборную камеру обделывать сильно звукопоглощающим материалом. Эта система дает удовлетворительные результаты, но является относительно дорогой. Проще и не менее успешно средство, которое состоит в устройстве в надлежащих местах уширенных камер, с укреплением в них отражающих экранов массивной конструкции во избежание резонирования. При этом распространение звуковых колебаний прекращается вследствие отражения от экрана, без прекращения тока воздуха в желаемом направлении через промежутки вокруг экрана. Та же цель может быть достигнута установкою защитных экранов.

§ 65. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗДАНИЯ. Из элементов технического оборудования едва ли не самым неблагоприятным являются т р у б о п р о в о д ы различного назначения. По своей конструкции и материалу они вообще служат хорошими проводниками материальных колебаний на весьма большие расстояния и с сравнительной легкостью трансформируют их в воздушные. Поэтому желательна охрана трубопроводов от всякого механического воздействия, возбуждающего в них материальные колебания, а равно изоляция таковых, возникающих в смежных с трубопроводами конструкциях. Последняя мера осуществляется обычно простыми средствами путем изолирующих прокладок из пробки, картона и т. п. между трубопроводами и поддерживающими или подвесными конструкциями. Значительно труднее устранение в отдельных случаях непосредственных источников материальных колебаний, так как некоторые из них являются функциональной особенностью системы.

Наглядным примером могут служить трубопроводы центрального отопления. Водяное отопление работает почти бесшумно, при паровом же наблюдается обычно характерный своеобразный шум в форме ударов, щелканья и шипенья, вызываемых расширением труб при перемене температуры, образованием конденсационной воды и т. п. Дополнительным источником служит шум от загрузки топливом котлов или выгребания из них шлаков, легко распространяющийся по трубопроводу, если не принять мер изоляции вблизи источника.

Водопроводная сеть также может служить источником шума при пользования водосборными кранами, особенно при высоком давлении в сети. Средством для предотвращения шума могут служить приспособления для медленного открывания кранов. Стеkanie воды по трубам спускной сети также сопровождается шумом, выражающимся в особо резкой форме при баках сифонной системы для промывки клозетов. Такие баки служат обычным источником шума, почему правильное расположение уборных должно быть предусмотрено при планировке, с достаточным удалением и надлежащей изоляцией их от охраняемых помещений. Тождественность расположения уборных по этажам здания служит наиболее практичной мерой, облегчающей условия изоляции и удовлетворяющей в то же время требованиям экономики.

Существенное внимание должно быть также обращено на изоляцию разного рода движущихся и подвижных элементов техниче-

ского оборудования. Выше была уже отмечена важность изоляции двигателей и иных механизмов при установке их непосредственно на фундаментах (§ 58). Однако в некоторых случаях аналогичные механизмы могут быть размещаемы в различных частях здания в связи со стенами и перекрытиями. Сюда относится прежде всего установка механических вентиляторов в сборных вентиляционных камерах, располагаемых во многих случаях на чердаке здания. Указание конкретных мероприятий для устранения вредного действия подобных установок затруднительно по крайнему разнообразию местных условий, но очевидно, что в зависимости от важности охраны тишины надлежит пользоваться мерами всех категорий, начиная с мер планировочного характера и сосредоточивая на них особое внимание. Эти соображения подчеркивают необходимость заблаговременной разработки вопросов технического оборудования, так как недосмотры в этом отношении связаны со значительными перерасходами при менее удовлетворительных результатах.

Наконец, не меньшее внимание должно быть уделено вопросу изоляции подъемных механизмов в здании. Располагаясь в специальных шахтах, объединяющих все этажи, они способствуют распространению как воздушных, так и материальных колебаний. Материальные колебания движущихся частей подлежат изоляции в возможной близости от их источников, но независимо от этого должны быть изолированы и хорошие проводники колебаний, которыми служат направляющие подъемника. Помещение шахты, по условиям пользования связанное с возникновением воздушных колебаний, подлежит в свою очередь изоляции от распространения последних мерами соответствующей планировки или конструктивными.

При расположении подъемников в пролетах или в одном объеме с лестничными клетками меры изоляции по существу остаются неизменными. В отношении же лестничных клеток вообще не следует забывать о том источнике материальных колебаний, который представляет ходьба по лестницам. Заделка концов ступеней в кладку стен лестничной клетки создает большие затруднения для изоляции, которых можно избежать при иных конструкциях, ограничиваясь тщательной изоляцией концов балок, поддерживающих лестничные марши и площадки.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.** 1. Чем вызывается потребность акустической изоляции?

2. Какими пределами ограничиваются задачи изоляции звуков?

3. Каковы общие приемы заглушения звука?

4. Какие основные категории колебаний предусматривает акустическая изоляция?

5. Назовите несколько источников воздушных колебаний; то же — материальных; то же совместно воздушных и материальных.

6. Как можно заглушить звук в источнике?

7. Как заглушается звук в помещении?

8. Какие меры заглушения звука более эффективны — в источнике или в помещении?

9. Как можно подразделить процесс передачи звуковых колебаний конструкциями?

10. В чем состоит разница между количественной и качественной восприимчивостью конструкции к звуковым колебаниям?

11. От чего зависит сопротивляемость пористых конструкций передаче воздушных колебаний? То же — непористых?

12. Каким требованиям должны отвечать изоляторы воздушных колебаний?

13. Почему выгодны изоляторы сложного типа?

14. Как устраняется проницаемость конструкций для материальных колебаний?

15. В каких условиях воздушные прослойки могут изолировать материальные колебания?

16. Каким условиям должны отвечать изоляторы универсального типа?

17. В чем состоит связь планировки с мерами акустической изоляции?

18. Какое расположение здания на участке благоприятствует изоляции от уличного шума?

19. Как группируются помещения в целях акустической изоляции?

20. Какие планировочные меры могут облегчать изоляцию отдельных помещений?

21. Как изолируются фундаменты под машинами?

22. Какие меры изоляции применяются в капитальных стенах?

23. Как изолируются перегородки?

24. Что называется коэффициентом проницаемости и какова приближенная зависимость между ним и весом стены?

25. Как устраиваются двери и окна в целях изоляции?

26. Какие меры применяются для изоляции междуэтажных перекрытий?

27. Как устраняется передача звука через каналы?

28. Какие источники шума связаны с техническим оборудованием здания и каковы меры борьбы с ними?

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО III ТЕМЕ.** Для практической проработки основных вопросов в области акустической изоляции в качестве конкретного задания может служить в общем объект, избранный для двух прежних работ. При этом однако задание уже не может ограничиваться одним помещением для собраний, но должно учитывать связь его с другими помещениями того же здания, могущими служить местом самостоятельных источников звука или, наоборот, местом, охраняемым от доступа звуков, и, наконец, связь здания с окружающей местностью для выявления внешних источников шума и условий его изоляции.

На основе теоретического ознакомления с приемами изоляции и типами изоляторов по заданиям XIII и XIV надлежит подойти к контрольной оценке и корректировке избранного примера в отношении планировки, руководствуясь материалом задания XV и начиная с вопросов выбора места для постройки и расположения здания на участке вплоть до внутренней группировки помещений в здании и относительного их размещения с учетом путей связи. При выявлении существенных недостатков планировки необходимо установить меры для их устранения и в случае возможности пользования для этого

различными приемами произвести их сравнительную критическую оценку для обоснованного выбора наилучшего приема.

Последующую задачу контрольной работы составляет проработка вопросов устройства и оборудования здания для осуществления мер акустической изоляции. Порядок этой части работы должен исходить из общего принципа приближения мер изоляции к возможным источникам колебаний. Изоляция источников может быть индивидуальная или групповая. Следует помнить, что наиболее эффективной мерой изоляции служит заглушение звука в источнике, если только оно возможно и осуществимо. При выборе типа изолирующих конструкций необходимо предварительно установить категорию изолируемых колебаний. Иначе меры изоляции могут оказаться бесцельными, так как хорошие изоляторы материальных колебаний не препятствуют распространению воздушных и наоборот.

Меры изоляции в части основных конструкций должны быть осуществляемы своевременно, с отведением для них надлежащей очереди в плане производства работ. Сюда относятся вопросы изоляции фундаментов, концов балок и заполнения между ними от стен здания, изоляция ступеней лестничных маршей и пр. Аналогичные меры должны быть приняты и в отношении отделочных работ, во избежание последующих переделок.

Независимую часть работы составляет проработка мероприятий по изоляции элементов технического оборудования здания, поскольку таковые служат источниками шума. Все такие элементы должны быть предусмотрены заблаговременно, чтобы последующим их введением не приходилось разбивать план работ или причинять ущерб уже достигнутому благоустройству.

## ПРИМЕРЫ РАЗРЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО АКУСТИКЕ ПОМЕЩЕНИЙ

**Задача 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ДОСТУПА К СЛУШАТЕЛЯМ ПРЯМЫХ ЗВУКОВЫХ ЛУЧЕЙ В ЗАЛЕ ЗВУКОВОГО КИНО.** Расположение основной массы зрителей предположено на горизонтальной плоскости партера в 27 рядах; расстояние экрана от переднего края ближайшего ряда мест равно шестикратной глубине ряда; возвышение нижней границы экрана от пола партера составляет 1,8 м. Экран имеет размеры  $3,9 \times 5,2$  м.

Принимая уровень глаза сидящего зрителя на высоте 1,20 м от пола, проводим зрительный луч от нижней границы экрана через глаз ближайшего зрителя. Превышение уровня глаза зрителя последнего ряда над продолжением этого луча составляет 2,10 м. Для проверки достаточности такого повышения возможно воспользоваться формулой (§ 27) для определения подъема мест расположенных на плоскости. Формула эта имеет вид.

$$H = nh \frac{n - m - 1}{m + 1}.$$

По местным условиям  $n = 343$  и  $m = 6$ . Принимая для  $h$  минимальное значение в 6 см, получаем  $H = 33 \times 0,06 \frac{33 - 6 - 1}{6 + 1} = 1,98 \times$

$\times \frac{26}{7} = 7,35$  м. Результат подсчета показывает, что требуемое минимальное превышение группы рядов превосходит принятое по проекту в 3,5 раза, и таким образом видимость по проекту является удовлетворительной, а превышение для одного ряда по той же формуле составляет не 6 см, а лишь  $h - H \frac{m + 1}{n(n - m - 1)} =$   
 $= 2,1 \frac{6}{33 \times 26} = 0,017$ , т. е. 1,7 см.

Рассмотрим различные способы устранения этого существенного недостатка для выбора из них наиболее рационального. Первый способ состоит в замене горизонтальной плоскости пола партера наклонною. Для этого уровень пола в глубине зала надлежит поднять на 5,15 м. Недостатком этого способа служат существенное ухудшение эвакуации, связанное с подъемом мест, значительное повышение балкона и связанная с этим необходимость увеличения высоты и объема зала.

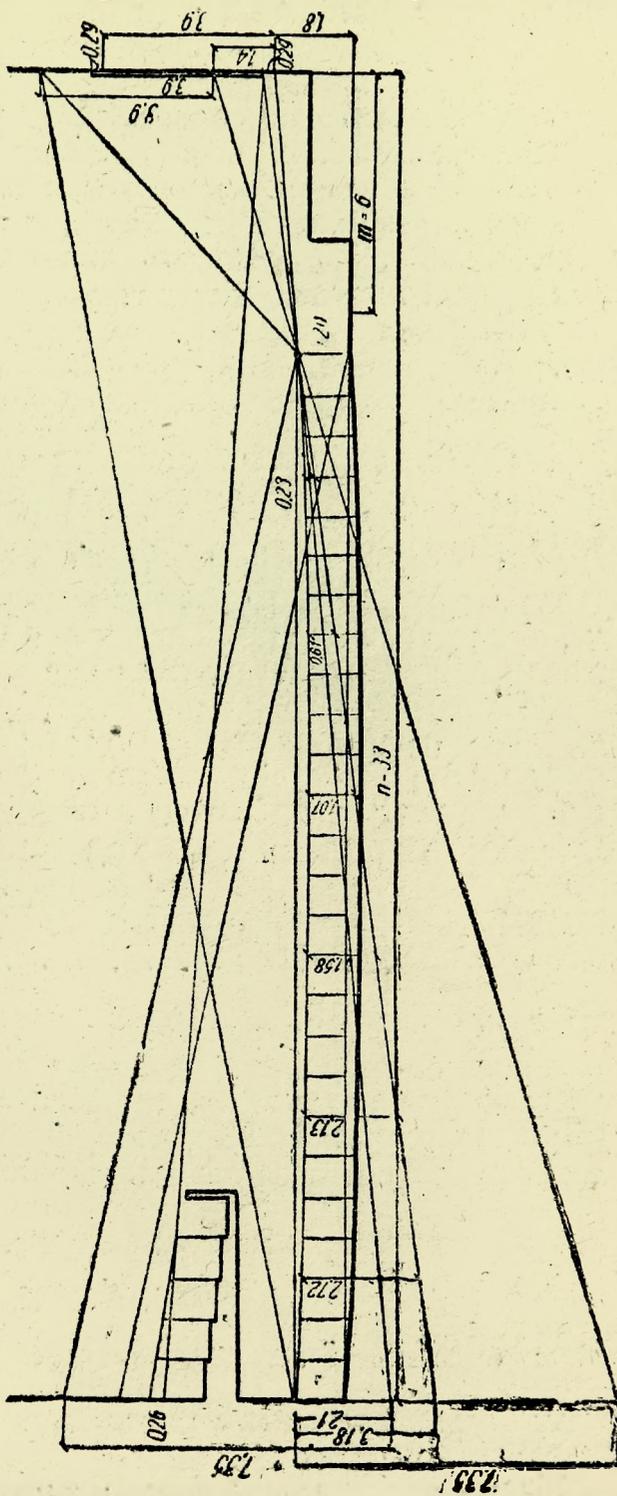
Второй способ улучшения видимости представляет подъем экрана на надлежащую высоту. Для определения этой высоты откладываем вниз от уровня глаза зрителя последнего ряда вычисленную величину превышения. Через нижнюю точку и глаз зрителя первого ряда проводим зрительный луч, отсекающий на экране верхнюю часть, находящуюся в условиях полной видимости для всех рядов. Нижняя граница этой части возвышается над низом экрана на 1,4 м и для видимости экрана целиком является необходимым поднять его на эту высоту. Такой подъем экрана создает не вполне благоприятные условия видимости для ближайших к нему рядов, так как зрительные лучи к верхнему краю экрана составляют при этом углы почти до 45 градусов с горизонтом, что утомительно для зрителей.

Третий способ представляет отказ от расположения рядов мест на плоскости, с заменой ее вогнутой поверхностью для осуществления наименьшего подъема. Величина превышения в этом случае может быть вычислена на формуле

$$H = nh \left( \frac{1}{m+1} + \frac{1}{m+2} + \dots + \frac{1}{n-1} \right) \quad (\text{\S } 28).$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$H = 33 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + 0,083 + 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059 + 0,056 + 0,053 + 0,050 + 0,048 + 0,045 + 0,043 + 0,042 + 0,040 + 0,038 + 0,037 + 0,036 + 0,034 + 0,033 + 0,032 + 0,031) = 1,98 \times 1,607 = 3,18 \text{ м.}$$



Черт. 1. Схема расположения мест в разрезе зала.

Потребное превышение в этих условиях превосходит проектное лишь на  $3,18 - 2,10 = 1,08$  м. Для осуществления видимости надлежит поднять последний ряд мест на 1,08 м. Равным образом можно достигнуть полной видимости при сохранении первого и последнего рядов на одном уровне, но с подъемом экрана по второму способу на высоту 0,29 м. Эти оба решения без труда осуществимы и представляются в равной мере целесообразными.

Останавливаемся на подъеме экрана, как не связанном с необходимостью какого-либо увеличения высоты зала.

Таким образом, для осуществления полной видимости в новых условиях остается определить достаточное число промежуточных точек кривой подъема, которая очевидно образует обратный отрицательный уклон для ближайших к экрану рядов мест. Определяем по вышеприведенной формуле превышения над продолжением первого зрительного луча для каждого четвертого ряда мест.

$$\begin{aligned}
 H_4 &= 10 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111) = 0,6 \times 0,379 = \dots & 0,227 \\
 H_8 &= 14 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + 0,083 + \\
 &+ 0,077) = 0,84 \times 0,730 = \dots & 0,613 \\
 H_{12} &= 18 \times 0,06 (0,043 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + \\
 &+ 0,083 + 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059) = 1,08 \times 0,989 = & 1,068 \\
 H_{16} &= 22 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + \\
 &+ 0,083 + 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059 + 0,056 + 0,053 + \\
 &+ 0,050 + 0,048 = 1,32 \times 1,196) = \dots & 1,579 \\
 H_{20} &= 26 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + 0,083 + \\
 &+ 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059 + 0,056 + 0,053 + 0,050 + \\
 &+ 0,048 + 0,045 + 0,043 + 0,042 + 0,040) = 1,56 \times 1,366 \dots & 2,131 \\
 H_{24} &= 30 \times 0,06 (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + 0,091 + 0,083 + \\
 &+ 0,077 + 0,071 + 0,067 + 0,062 + 0,059 + 0,056 + 0,053 + 0,050 + \\
 &+ 0,048 + 0,045 + 0,043 + 0,042 + 0,040 + 0,038 + 0,037 + 0,036 + \\
 &+ 0,034) = 1,80 \times 1,511 = \dots & 2,720
 \end{aligned}$$

Нанося вычисленные величины превышения на чертеже и откладывая вниз от найденных уровней глаз зрителей по 1,20 м, определяем точки, принадлежащие к вогнутой поверхности пола партера.

Переходя к расположению мест на балконе в количестве 5 рядов, задаемся уровнем глаза зрителя первого ряда и проводим первый зрительный луч. Та же формула может служить для определения наименьшего подъема мест на балконе.

$$h = 0,06, \quad m = 28, \quad n = 33$$

$$H = 33 \times 0,06 (0,034 + 0,033 + 0,032 + 0,031) = 1,98 \times 0,130 = 0,257 \text{ м.}$$

В виду большой крутизны подъема ряды на балконе целесообразно расположить уступами.

Остается практический вопрос, пригоден ли вычисленный подъем для боковых мест, расположенных вне вертикальной плоскости симметрии или, что то же самое, могут ли отдельные ряды мест по всей своей длине сохранять горизонтальное расположение.

Разрешение этого вопроса связано с характером объекта наблюдения и формой рядов в плане. При ограниченных размерах объекта

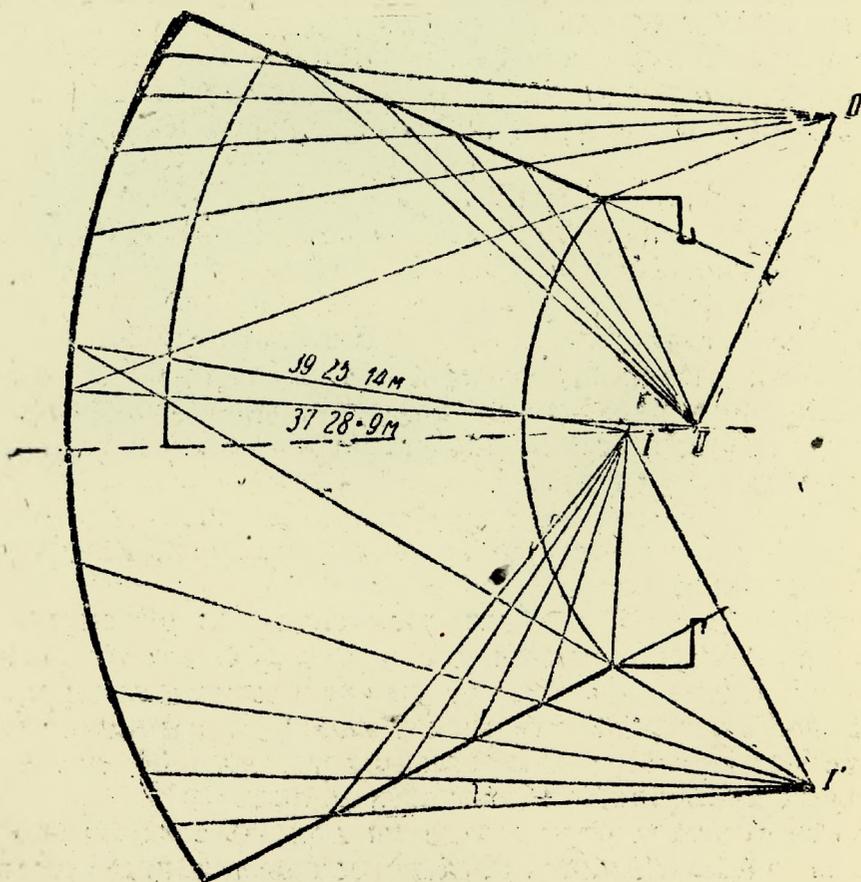
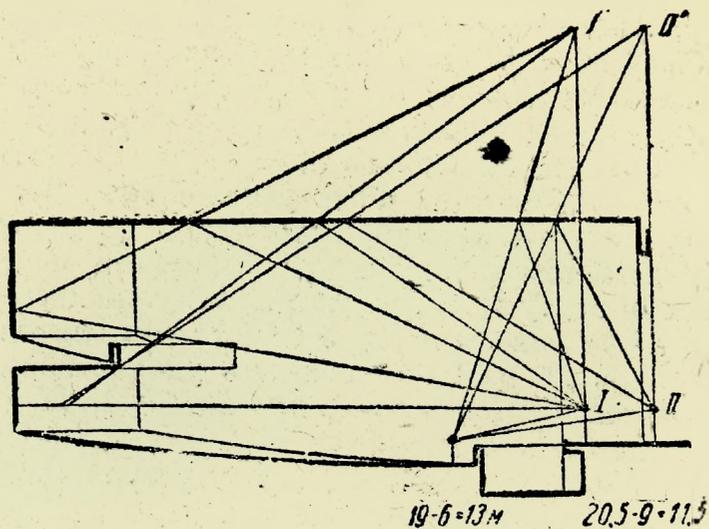
в виде оратора или артиста на эстраде все зрительные лучи можно считать сходящимися в плане в одной центральной точке расположения объекта. Если ряды мест имеют в плане дугообразную форму с центром в той же точке, то условия видимости по всем направлениям получаются одинаковые, и горизонтальность рядов вполне отвечает условиям видимости. Если центр, служащий для начертания рядов, расположен позади объекта в глубине эстрады или сцены, то боковые места при горизонтальности рядов оказываются в более благоприятных условиях видимости, так как возрастание величины  $m$  — расстояния объекта от первого ряда — происходит вообще быстрее увеличения глубины ряда, а это условие способствует улучшению видимости. Наконец, если ряды описаны из центра, расположенного перед объектом наблюдения, то боковые места в связи с приближением к объекту могут оказаться в худших условиях видимости и требуют проверки их подъема. При этом общий подъем горизонтальных рядов должен обеспечивать удовлетворительную видимость для крайних боковых мест, или же боковые места отдельных рядов должны быть приподняты против средних мест, что однако не вполне удобно, так как требует или уступчатого расположения горизонтальных сидений по длине ряда, или замены их наклонными с достаточным наклоном.

Таким образом проверка подъема рядов мест в продольном разрезе зала является достаточной во всех случаях, кроме такого начертания рядов в плане, при котором боковые места ряда располагаются в меньшем удалении от объекта наблюдения, чем центральные.

**Задача 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ АКУСТИЧЕСКОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ТЕАТРАЛЬНОГО ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА ВМЕСТИМОСТЬЮ НА 1200 ЧЕЛОВЕК ПРИ ОБЪЕМЕ 7700 куб. м.** Согласно общему порядку проектирования (§ 35) обследование акустического благоустройства зала должно охватить последовательно вопросы выбора размеров, формы и материала при условии расположения зрителей в удовлетворительных оптических условиях. При этом выявление оптических условий выдвигается в первую очередь и даже независимо от расположения публики в помещении или на открытом пространстве. Пример проверки оптических условий содержит задача 1, где рассмотрены различные случаи и возможные осложнения такой проверки.

Размеры зала играют двоякую роль: объем зала должен находиться в благоприятном соответствии с его вместимостью, и предельные удаления подлежат увязке с количеством энергии источника звука. Зависимость между объемом и вместимостью приближенно определяется по третьему графику § 36, дающему минимум объема на слушателя без учета дополнительного поглощения. В настоящем случае объем зала на одного слушателя составляет  $7700 : 1200 = 6,4$  куб. м, что по данным графика практически приемлемо, так как в местных условиях минимум объема по графику требуется в пределах от 4,2 до 5 куб. м, при среднем значении в 4,6 куб. м. Таким образом дополнительный объем на слушателя в 1,8 куб. м обеспечивает дополнительное поглощение, которое составляет при этом около 30 процентов полного поглощения или около 40 про-

центров поглощения публики. Предельные удаления слушателей от источников звука составляют 28—29 м, что не встречает возражений, особенно принимая во внимание наличие отражений, способствующее равномерности распределения звуковой энергии.



Черт. II. Продольный разрез и план зала.

Форма зала по проекту представляет в плане усеченный сектор; перекрытие — горизонтальное; места расположены в партере и на балконе. Основными отражающими поверхностями служат по-

толок и боковые стены зала, так как портал сцены представляет собою сильно поглощающую поверхность. Задняя стена, как наиболее удаленная, сильных отражений не дает, что можно рассматривать как благоприятное обстоятельство в связи с ее вогнутой формой. По этой же причине целесообразно сделать ее звукопоглощающей. Построение отражений в плане и разрезе при нормальных условиях расположения источника звука в точках I и II убеждает в отсутствии вредных отражений, так как наиболее опаздывающие отражения в разрезе получаются от потолка для ближайших рядов мест и в плане от боковых стен для центральных мест в глубине зала, причем опоздание тех и других не превышает  $14 : 340 = 0,04$  секунды.

Вторым вопросом, связанным с выбором формы зала, служит наличие балкона, ограничивающее доступ отражений к слушателям, расположенным под балконом. Однако, принимая во внимание, что свес балкона лишь незначительно превосходит высоту пространства под ним и что туда проникают не только прямые звуковые лучи, но и отражения от боковых стен, возможно считать акустические условия и в этой части зала удовлетворительными. Таким образом общая форма зала может быть принята без возражений. Проектируемое нередко снижение потолка над просцениумом, с приданием этой части потолка наклона, для направления сильных отражений к удаленным слушателям при данных размерах зала не является необходимым, тем более что при передвижении источника звука отражающее действие этой наклонной поверхности получает случайный характер и приносимая им польза может оказаться сомнительной.

Завершающим вопросом служит выбор материала, связанный с одной стороны с осуществлением потребного дополнительного поглощения, с другой — с обеспечением достаточной силы полезных отражений.

Общее количество поглощения при данном объеме зала может быть определено по формуле Сабина (§ 33), исходя из благоприятной величины реверберации, которая в соответствии с назначением зала может быть принята по данным Михеля (§ 34) равной 1,6 секунды.

$$t = \frac{0,164V}{aS}, \text{ откуда } aS = \frac{0,164V}{t} = \frac{0,164 \times 7700}{1,6} = 717,5 \text{ сабинов.}$$

В означенное количество входит поглощение слушателей в количестве  $1200 \times 0,44 = 528$  сабинов. Таким образом дополнительное поглощение определяется в  $717,5 - 528 = 189,5$  сабинов. Это количество подлежит разверстке между наличными элементами поглощения, кроме публики, с учетом по возможности сосредоточения вблизи источника звука хорошо отражающих поверхностей.

Может быть предложена следующая примерная разверстка (на стр. 124) на основе данных таблицы коэффициентов поглощения (§ 12).

Подсчет количества поглощения показывает полную практическую осуществимость проектных предположений. В последней строке отмечены элементы, точное значение которых может быть выявлено при детальной разработке проекта. Если при этом останется

неиспользованным некоторое количество поглощения, то могут быть введены дополнительные элементы в форме деревянных панелей, драпировок и т. п., для размещения которых в первую очередь целесообразно использовать поверхность задней стены, если не полностью, то на высоту несколько более человеческого роста, чтобы смягчить отражения от вогнутой поверхности.

Наименование элемента	Площадь в кв. м	Коэфф. поглощения	Количество сабинов
Пол зала и балкона дер. . .	960	0,061	58,6
Потолок, оштук. по дер. . .	960	0,034	32,6
Барьеры и оркестр. дер. . .	170	0,10	17
Стены кам. оштук. . . . .	852	0,025	21,3
Портал сцены . . . . .	144	0,25	36
Вентил. отв. и пр. . . . .	—	—	24
		Итого . .	189,5

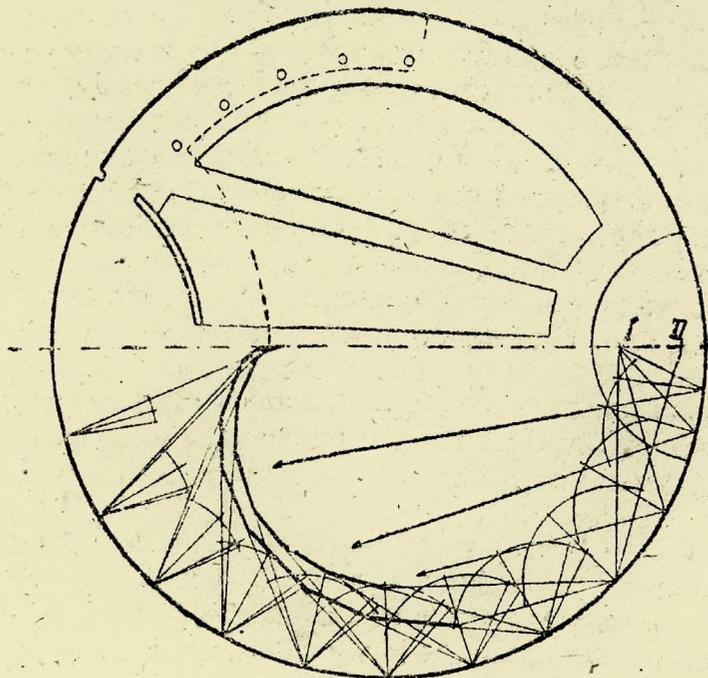
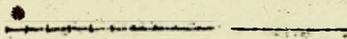
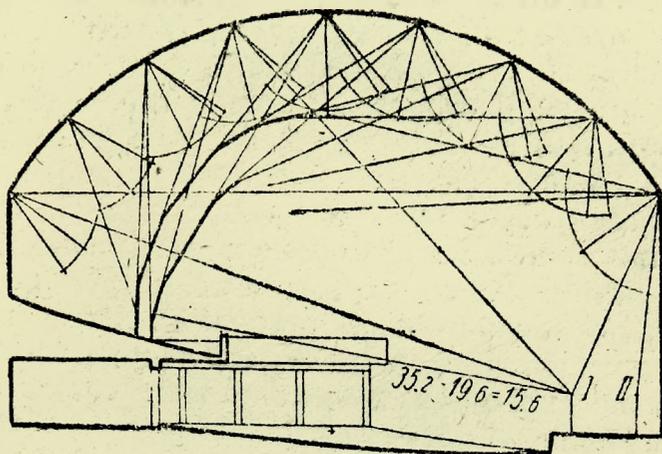
При подсчете не была учтена роль мебели для сидения, так как она аннулируется при наличии сидящей публики. Однако поглощение мебели нельзя не учитывать при переменной численности слушателей, когда часть мест остается свободной. Роль мебели, как элемента поглощения, выясняется из условия, что активное поглощение каждого слушателя выражается разностью между полным его поглощением и поглощением мебели, на которой он сидит. При деревянной мебели разница между полным и активным поглощением ничтожна, но она возрастает существенно при мягкой мебели, когда поглощающая роль слушателей сокращается до двух раз и даже более. Это обстоятельство имеет большое значение для акустической устойчивости зала, так как способствует сохранению благоприятной величины реверберации зала при переменной численности собравшихся.

В конкретных условиях рассматриваемого примера поглощение слушателей, включая мебель, составляет около 70% полного поглощения зала. Отсутствие одной трети общего числа слушателей сокращает поглощение зала на 23%, с возрастанием реверберации обратно пропорционально этому сокращению, причем зал может оказаться неприятно гулким. Замена деревянной мебели мягкой, с кожаными подушками на сидениях и спинках стульев, может в значительной мере смягчить этот недостаток, так как активное поглощение слушателей оказывается в новых условиях примерно вдвое менее полного. Таким образом мягкая мебель играет роль поглотителя переменного действия, выгодно отличающегося от других систем своей автоматичностью.

**Задача 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ АКУСТИЧЕСКОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ПРИСПОСОБЛЯЕМОГО ЗАЛА, ОГРАНИЧЕННОГО ВОГНУТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ.** Приспособляемый зал имеет круглую в плане форму и купольное перекрытие. Места для слушателей располагаются в партере и на балконе, окаймляющем зал в глубине его. Объем зала составляет 10000 куб. м при вместимости

мости в 1200 человек. Наибольшие удаления слушателей составляют около 30 м.

Размеры зала по его объему и удалениям находятся в соответствии с энергией человеческого голоса и поэтому не создают практических затруднений. Характерной особенностью зала является



Черт. III. Разрез и план зала.

относительно крупный объем его, составляющий на одного слушателя 8,3 куб. м.

Форма зала не может быть признана акустически благоприятной и подлежит обследованию для выявления ее влияния на распределение звуковой энергии. Это обследование может быть произведено в наглядной форме графическим путем. Целью обследования служит определение расположения фокусов отраженных лучей

по отношению к слушателям, для принятия мер против образования эха или вредных отражений.

Начинаем обследование с купольного перекрытия зала при условии расположения источников звука на эстраде в точках I и II, отстоящих на 1 м от границ эстрады. Построив в разрезе отражения от купольной поверхности для ряда точек, легко убедиться, что эта поверхность не дает отражений для слушателей партера, так как ближайшие ряды мест находятся вне отражающего действия, а удаленные — защищены свесом балкона. Таким образом потолочные отражения на партер не распространяются и ограничивают свое действие балконом. Как и следовало ожидать, в удалении от источников звука возникают фокусные точки, отмечающие места наибольшей концентрации отражаемой энергии. Эти места отмечены в разрезе жирными ломаными линиями, из которых ближайшая осуществляется при источнике звука в точке I и другая, расположенная вблизи первой, — для источника в точке II. Следует иметь в виду, что эхо в этих частях не возникает, так как наибольшее превышение длины отраженного луча против прямого составляет 15,6 м, что отвечает опозданию по времени в  $15,6 : 340 = 0,046$  секунды, вместо необходимого для образования эха не менее 0,055 секунды (§ 14).

Однако указанные отражения, несмотря на то, что по времени опоздания они не являются вредными, все же не могут быть терпимы в акустически благоустроенном помещении, вследствие их значительной силы и вредного влияния на качество звука. Для ликвидации их необходимо предварительно выявить тот район отражающей поверхности, который способствует образованию фокусов. Таким районом в местных условиях служит центральная часть купольного перекрытия с радиусом большого круга около 10 м.

Наиболее радикальной мерой борьбы с образованием фокусов служит изменение общей формы перекрытия в этой части, например путем устройства светового фонаря, ограниченного плоскими поверхностями и т. п. При недопустимости такого переустройства возможно ограничиться применением для декоративной обработки этой части купола крупных кессонов с целью возможного рассеяния отражений. Наконец, более простым средством может служить завешивание этой части парусом из достаточно плотной и тяжелой ткани.

Обделку купольной поверхности звукопоглощающим материалом с сохранением ее формы в данных условиях следует считать средством менее надежным, так как ослабление отражений из-за потери силы на поглощение может оказаться далеко недостаточным в борьбе с концентрацией звука. Поэтому указанное средство можно рекомендовать как подсобное, но не исчерпывающее.

Переходя к обследованию отражений от стен зала, нетрудно убедиться из аналогичного построения в плане, что стены равным образом содействуют образованию фокусов, геометрическим местом которых служат жирные ломаные линии, располагающиеся в плане в задних и боковых местах партера. Значительная часть партера получает благоприятные отражения от стены за эстрадою, однако эти отражения по мере приближения к боковым и задним местам возрастают в силе и теряют в качестве, доходя до недопусти-

мых пределов. Боковые части стен в этом явлении играют наиболее активную роль.

Борьба с образованием фокусов может быть в данном случае осуществлена мерами, аналогичными с вышеуказанными. Для выявления района, вызывающего недопустимые фокусы отраженных лучей, могут служить следующие соображения. Часть стены за эстрадою дает полезные отражения, поэтому опасными являются главным образом боковые части. Кроме того, нельзя забывать, что восходящие прямые лучи при отражении от цилиндрической поверхности с вертикальной осью дают восходящие отражения. Поэтому фокусы, охватывающие места партера, в то же время оказываются почти безвредными на балконе, так как располагаются выше слушателей. В связи с этим и меры рассеяния или ослабления отражения могут быть ограничены пределами опасных районов и распространены лишь на боковые части стен партера и на некоторую высоту в тех же частях на балконе. Следует заметить при этом, что столбы, поддерживающие балкон, равно как и ограничивающая глубину партера стена выпуклого очертания, оказывают существенное рассеивающее действие. Мерами к устранению фокусов могут служить замена цилиндрической поверхности многогранною с плоскими гранями или заглушение опасных частей сильно поглощающим материалом типа специальных акустических штукатурок или тяжелыми тканями. Выбор того или иного приема связан с допустимым количеством поглощения, почему окончательное разрешение вопроса о форме зала в настоящих условиях связано с вопросом о материале.

В этой стадии разрешение задачи требует предварительного определения потребного количества дополнительного поглощения. Принимая в зависимости от объема благоприятную величину реверберации в 1,7 секунды, получаем по формуле Сабина общее количество поглощения

$$aS = \frac{0,164 \times 10000}{1,7} = 965 \text{ сабинов.}$$

Поглощение публики в количестве 1200 человек составляет  $1200 \times 0,44 = 528$  сабинов. Таким образом дополнительное поглощение может достигать  $965 - 528 = 437$  сабинов. Производим разверстку этого количества между наличными элементами поглощения при обычных отделочных материалах для выявления размеров запаса, позволяющего бороться с вредными отражениями путем их заглушения. Примерная разверстка дает следующие результаты:

Наименование элемента	Площадь в кв. м	Козфф. поглощения	Количество сабинов
Пол зала и балкона дерев. .	840	0,061	51
Потолок, оштукатуренн. по дереву . . . . .	840	0,034	28
Барьеры деревянные . . . .	110	0,10	11
Стены кам. оштукатур. . . .	960	0,025	24
		Итого . .	114

Благодаря наличию значительного запаса поглощения, составляющего  $437 - 114 = 323$  сабина, возникает возможность устранения основных недостатков формы зала путем применения сильно поглощающих материалов. Дополнительными элементами поглощения могут служить парус или так называемое *шапито* для занавески центральной части купола и акустическая штукатурка для части боковых стен зала. Примерное распределение достаточного поглощения может быть осуществлено следующим образом:

Наименование элемента	Площадь в кв. м	Кэфф. поглощения	Количество сабинов
Парус в куполе . . . . .	350	0,466	163
Панель на стенах . . . . .	200	0,675	135
Вентил. отв. и пр. . . . .	—	—	25
		Итого . . .	323

Коэффициенты поглощения основных поглотителей учтены как разность между полным их поглощением и принятым в учет при первоначальном подсчете. Таким образом, при пользовании для паруса тканью с коэффициентом поглощения 0,50, для подсчета принят коэффициент  $0,500 - 0,034 = 0,466$ ; то же для панели из целотекса высшей марки (§ 12) вместо 0,770 принято  $0,700 - 0,025 = 0,675$ .

Изложенное показывает, что настоящая задача является практически разрешимой без капитального переустройства зала. Такое решение оказывается возможным лишь вследствие ограниченной вместимости зала и относительно крупного объема на слушателя. С увеличением вместимости этот прием оказался бы неосуществимым, и для акустического благоустройства зала пришлось бы прибегнуть к частичному изменению его формы.

**Задача 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЯ ОТ ДОСТУПА ШУМА.** Изолируемое помещение отделено от улицы кирпичной стеной площадью 55 кв. м с пятью окнами, по 3 кв. м каждое; толщина стены 0,51 м; окна с двойными переплетами. В смежном помещении за двойной деревянной перегородкой, площадью 32,5 кв. м, заполненной песком, расположено бюро машинописи, соединенное с изолируемым помещением дверью площадью 2,5 кв. м.

Интенсивность уличного шума составляет 65 децибелов, а шума бюро машинописи — 40 децибелов.

Руководствуясь данными § 62, возможно принять коэффициент проницаемости кирпичной стены в 0,000001; для окна с двойным переплетом 0,000006; для двойной деревянной перегородки — 0,0002 и наконец для одиночной двери — 0,00053. Поглощение изолируемого помещения в невыгоднейших условиях при отсутствии в нем людей составляет 20 сабинов.

Для определения потери силы уличного шума при проникании

через наружную стену помещения надлежит воспользоваться формулой Кундсена (§ 62):

$$M = \frac{aS}{D}$$

Так как величина  $aS$  известна, то для определения  $M$  требуется вычислить  $D$ , т. е. относительную проницаемость наружной стены.

$$40 \times 0,000001 + 15 \times 0,000006 = 0,00004 + 0,00009 = 0,00013.$$

$$M = \frac{20}{0,00013} = 153846, \text{ откуда } 10 \log_{10} M = 51,9.$$

Таким образом непроницаемость конструкции составляет 51,9 децибела, почему при уличном шуме интенсивностью в 65 децибелов интенсивность шума в помещении достигает  $65 - 51,9 = 13,1$  децибела.

При потребности дальнейшего сокращения шума в помещении, его можно достигнуть двумя путями — увеличением количества поглощения в помещении или улучшением изолирующих свойств конструкции.

По первому приему количество поглощения без труда может быть увеличено с 20 до 60 сабинов за счет находящихся в помещении людей или путем введения иных элементов поглощения. При этом:

$$M = \frac{60}{0,00013} = 461538 \text{ и } 10 \log_{10} M = 56,6.$$

В новых условиях интенсивность проникающего в помещение уличного шума сокращается до  $65 - 56,6 = 8,4$  децибела.

В качестве дополнительной меры изоляции возможно использовать второй прием, например в форме применения оконных переплетов особо плотного устройства с коэффициентом проницаемости 0,0000026. В этих условиях

$$D = 40 \times 0,000001 + 15 \times 0,0000026 = 0,00004 + 0,000039 = 0,000079$$

$$M_2 = \frac{60}{0,000079} = 759500 \quad 10 \log_{10} M = 58,8.$$

Уплотнение створов повышает незначительно непроницаемость конструкции, доводя ее до 58,8 децибела и тем сокращая интенсивность уличного шума до 6,2 децибела. Означенная интенсивность в обычных условиях не создает беспокойства, если только помещение не требует исключительной охраны тишины.

Полезно коснуться вопроса изменения условий изоляции от уличного шума при открытии окон настежь.

Открытие одного окна увеличивает проницаемость наружной стены до  $D = 0,000004 + 12 \times 0,0000026 + 3 \times 1 = 3,0000712$

$$M_3 = \frac{60}{3,0000712} \approx 20 \quad 10 \log_{10} M_3 = 13,0.$$

Открытие всех пяти окон доводит проницаемость до

$$D = 0,00004 + 15 \times 1 = 15,00004$$

$$M_1 = \frac{60}{15,00004} \approx 4 \quad 10 \log_{10} M_1 = 7,0.$$

Таким образом открытие одного окна увеличивает интенсивность уличного шума в помещении с 6,2 до 52 децибелов, а при открытии всех пяти окон — до 58 децибелов.

Вопрос об условиях изоляции помещения от смежного бюро машинописи может быть разрешен аналогичным порядком. Непроницаемость деревянной перегородки определяется из условия:

$$D = 32,5 \times 0,0002 + 2,5 \times 0,00053 = 0,0065 + 0,001325 = 0,007825$$

$$M = \frac{20}{0,007825} = 2556 \quad 10 \log_{10} M = 34$$

$$M_1 = \frac{60}{0,0076925} = 7668 \quad 10 \log_{10} M = 39.$$

В данных условиях интенсивность шума пишущих машин в пустом помещении составляет лишь  $40 - 34 = 6$  децибелов, а при повышенном поглощении снижается до интенсивности слухового порога.

Для выяснения возрастания интенсивности при открытой двери имеем:

$$D = 0,0065 + 2,5 \times 1 = 2,5065$$

$$M_2 = \frac{60}{2,5065} \approx 24 \quad 10 \log_{10} M_2 = 14.$$

Подсчет показывает, что при открытой двери интенсивность шума возрастает до  $40 - 14 = 26$  децибелов. Сопоставляя эту интенсивность с интенсивностью уличного шума при открытых окнах, замечаем, что вторая перекрывает первую, так как уличный шум достигает 58 децибелов и превышает шум машинописи на  $58 - 26 = 32$  децибела. Выше было указано (§ 6), что разница интенсивности звуков свыше 30 децибелов делает более слабые звуки мало осязаемыми.

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Тема I. Технические качества звука . . . . .	4
§ 1. Задачи акустики помещений (4) . . . . .	—
Задание I. Понятие о звуке . . . . .	—
§ 2. Явление звука (4). — § 3. Звуковые волны и лучи (5). — § 4. Виды звука (7) . . . . .	—
Задание II. Свободное распространение звука . . . . .	9
§ 5. Скорость звука (9). — § 6. Сила звука (10). — § 7. Сила голоса (12). — § 8. Роль интерференции (13). — § 9. Ясность и красота звука (15) . . . . .	15
Задание III. Распространение звука в помещении . . . . .	—
§ 10. Влияние препятствий на распространение звука (15). — § 11. Поглощение звука (17). — § 12. Коэффициенты поглощения звука (18) . . . . .	18
Задание IV. Отражение звука . . . . .	21
§ 13. Практическая роль отражения звука (21). — § 14. Полезные и вредные отражения (24). — § 15. Построение отраженных лучей (26). — § 16. Построение отраженных волн (29). — § 17. Отражение зеркальное и диффузное . . . . .	31
Задание V. Влияние формы отражающих поверхностей . . . . .	32
§ 18. Плоские поверхности (32). — § 19. Выпуклые поверхности (33). — § 20. Вогнутые поверхности (34). — § 21. Определение силы отражений (37) . . . . .	37
Задание VI. Местные особенности распространения звука . . . . .	39
§ 22. Препятствия в пределах помещения (39). — § 23. Резонанс (41). — § 24. Воздушные явления (42) . . . . .	42
Вопросы для самопроверки . . . . .	43
Контрольная работа по первой теме . . . . .	44
Тема II. Акустическое благоустройство помещений . . . . .	46
§ 25. Технические средства для разрешения акустических задач (46) . . . . .	—
Задание VII. Основы проектирования помещений . . . . .	47
§ 26. Связь акустических условий с оптическими (47). — § 27. Расположение слушателей на наклонной плоскости (48). — § 28. Расположение слушателей с наименьшим подъемом мест (50) . . . . .	50
Задание VIII. Выбор размеров и формы помещения . . . . .	53
§ 29. Акустическая роль геометрических элементов помещения (53). — § 30. Регулирование распределения звуковой энергии (55). — § 31. Устранение вредных отражений (58) . . . . .	55
Задание IX. Выбор материала . . . . .	58
§ 32. Акустическая роль материала (59). — § 33. Реверберация (61). — § 34. Оптимум реверберации (63) . . . . .	59
Задание X. Акустическое проектирование . . . . .	63
§ 35. Порядок проектирования (65). — § 36. Связь реверберации с геометрическими элементами помещения (66). — § 37. Связь реверберации с выбором материалов (69). — § 38. Примеры расчета (70) . . . . .	65
Задание XI. Исправление существующих помещений . . . . .	70
§ 39. Акустические недостатки помещений (72). — § 40. Устранение недостатков, связанных с геометрическими элементами помещения (73). — § 41. Зависимость акустического благоустройства от подбора материалов (75). — § 42. Комбинированные приемы исправления помещений (76) . . . . .	72
	76

ц 2р.50к. № 00812.

Задание XII. Средства акустического оборудования . . . . .	77
§ 43. Назначение акустического оборудования (77). — § 44. Отража- тельные приборы (79). § 45. Поглощающие приборы (83). — § 46. Усиливающие приборы (83) . . . . .	83
Вопросы для самопроверки . . . . .	85
Контрольная работа по второй теме . . . . .	86
 Г е м а III. Акустическая изоляция . . . . .	88
§ 47. Задачи и приемы акустической изоляции (88) . . . . .	—
Задание XIII. Приемы заглушения звука . . . . .	89
§ 48. Заглушение звука в источнике (89). — § 49. Заглушение звука в помещении (90). — § 50. Изоляция звуков в пределах помеще- ния (91) . . . . .	91
Задание XIV. Принципы проектирования изолирующих конструкций ,	93
§ 51. Изоляция воздушных колебаний (93). — § 52. Изоляция мате- риальных колебаний (96). — § 53. Изоляторы универсального назначения (98) . . . . .	98
Задание XV. Связь планировки с задачами акустической изоляции . .	99
§ 54. Выбор места для постройки (99). — § 55. Расположение здания на участке (100). — § 56. Группировка помещений в здании (101). — § 57. Планировка изолируемых помещений (101) . . . . .	—
Задание XVI. Типы вертикально изолирующих конструкций . . . . .	103
§ 58. Фундаменты (103). — § 59. Капитальные стены (105). — § 60. Пере- городки (105). — § 61. Проемы в стенах (107). — § 62. Расчет изо- лирующих конструкций (108) . . . . .	108
Задание XVII. Горизонтально изолирующие конструкции и техниче- ское оборудование здания . . . . .	110
§ 63. Междуетажные перекрытия (110). — § 64. Отверстия и каналы (113). — § 65. Техническое оборудование здания (114) . . . . .	114
Вопросы для самопроверки . . . . .	115
Контрольная работа по третьей теме . . . . .	116
П р и л о ж е н и е. Примеры разрешения практических задач по аку- стике помещений . . . . .	118

  
**Центральная Библиотека**  
**им. Бежинского**

Отв. редактор инж. И. Л. Лейкин.

Техн. редактор Э. А. Старк.

ОНТИ № 831. Индекс С-40-5-2. Сдано в набор 2/XI 1932 г. Подписано в печать 18/I 1933 г. Тираж 3150.  
 Формат бумаги 62 × 94. Печать. 8<sup>1</sup>/<sub>2</sub> лист. Колич. бумажных листов 4<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Колич. печатных знаков на  
 бумажном листе 103168. Заказ № 1378. Ленгорт № 740. Выход в свет февраль 1933 г.

3-я типография ОНТИ им. Бухарина, Ленинград, ул. Мясоевко, 10.



2 р. 50 к.

С-40-5-2

№ 00812.

