

**МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ)**

КАФЕДРА "АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА"

**ДИСЦИПЛИНА
"АРХИТЕКТУРНАЯ
ФИЗИКА"**

**Раздел
"АРХИТЕКТУРНАЯ
АКУСТИКА"**

**УЧЕБНО-
МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ**



**ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО
КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ
ЗВУКОУСИЛЕНИЯ**

ЧЕБАНОВ А.Д.

МОСКВА • МАРХИ • 2013



Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Московский архитектурный институт
(государственная академия)»

А.Д. Чебанов

**Обеспечение акустического качества
помещения с помощью распределенной
системы звукоусиления**

Учебно-методические указания

Москва
МАРХИ
2013

УДК 534.2
ББК 32.872
Ч 34

Чебанов А.Д.

Обеспечение акустического качества помещения с помощью распределенной системы звукоусиления: учебно-методические указания / А.Д. Чебанов.—М.: МАРХИ, 2013. — 36 с.

Учебно-методические указания по разделу «Архитектурная акустика» дисциплины «Архитектурная физика» составлены на основе действующих СНиП 23-03-2003 «Защита от шума». Они предназначены для выполнения курсовых расчетно-графических работ (5-й курс по ФГОС-2 и 4-й курс по ФГОС-3) или раздела дипломного проекта специалиста, бакалавра или магистра архитектуры на дневных и вечернем факультетах, а также могут быть использованы в НИРС. Выполнение РГР или раздела дипломного проекта сопровождается консультациями преподавателей кафедры «Архитектурная физика».

Учебно-методические указания являются необходимым актуализированным дополнением к главе «Архитектурная акустика» в учебнике «Архитектурная физика».

© МАРХИ, 2013

© Чебанов А.Д. 2013

СОДЕРЖАНИЕ

I. ЭЛЕКТРОАКУСТИКА.....	4
1. Введение.....	4
2. Основные составные части электроакустических систем звуко- воспроизведения.....	5
3. Сосредоточенные, распределенные и другие системы звуко- воспроизведения.....	7
4. Акустические и геометрические параметры помещений.....	9
5. Требования, предъявляемые к системам озвучения и их конструк- тивные особенности.....	10
6. Акустический расчет мощности систем звукоусиления.....	13
7. Расчет неравномерности прямого звука при звукоусилении.....	14
8. Расчет разборчивости речи при звукоусилении.....	15
9. Проверка расчета на отсутствие эха в помещении.....	15
II. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗВУКОУСИЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ АУДИТОРИИ НА 400 ЧЕЛОВЕК.....	16
10. Определение акустических и геометрических параметров помеще- ния.....	16
11. Выбор системы озвучения аудитории на 400 чел.....	17
12. Расчет акустической мощности системы озвучения помещения.....	18
13. Расчет неравномерности озвучения по ширине и длине помещения.....	19
14. Расчет разборчивости речи.....	22
15. Проверка на отсутствие эха в помещении.....	22
16. Выбор типа микрофона для системы звукоусиления в аудитории.....	23
17. Выбор аппаратуры звукоусилительного комплекса аудитории.....	23
III. ПРИЛОЖЕНИЯ.....	25
ЛИТЕРАТУРА.....	34
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	34

I. ЭЛЕКТРОАКУСТИКА

1. Введение.

Если помещение имеет объем до 300м^3 , голос отдельного человека можно расслышать без особого напряжения даже при отсутствии интенсивных ранних (с запаздыванием до 50мкс) отражений звука. Возникновение сильного эха в таком помещении маловероятно из-за малой длины свободного пробега звуковой волны и увеличения общего эквивалентного звукопоглощения поверхностями зала. Однако, если один из линейных размеров помещения меньше длины полуволны самой низкой слышимой частоты (около $8,5\text{м}$), в таком зале, особенно при параллельных противоположных поверхностях, могут появиться стоячие волны. Их взаимодействие приводит к появлению резонансных явлений, приводящих к увеличению громкости и времени реверберации для определенной звуковой частоты.

С увеличением объема помещения от 300м^3 до 3000м^3 появляется необходимость дополнительного равномерного усиления звука по всем зрительским местам, включая ложи, балконы и галереи.

В больших по объему залах* появление стоячих волн маловероятно из-за значительных линейных размеров, однако, возможно возникновение так называемого «театрального эха» от задней стены зала, особенно при ее прямоугольном сочленении с поверхностью потолка.

В акустически правильно спроектированных залах, в которых создается достаточное усиление звука за счет интенсивных полезных отражений, нет необходимости дополнительного звукоусиления для следующих значений их объемов:

1) $V \leq 1500\text{м}^3$ (до 300чел.), при этом обеспечивается высокий уровень разборчивости звукового сигнала;

2) $V \leq 8500\text{м}^3$ (до 1500чел.), при этом обеспечивается приемлемый, более низкий уровень разборчивости звукового сигнала.

В случае превышения этих пределов вместимости для обеспечения приемлемого уровня разборчивости необходимо использовать электрическую систему звукоусиления.

Система звукоусиления должна удовлетворять трем основным требованиям:

- обеспечить достаточный уровень звукового давления и его равномерное распределение по всему залу;
- не вносить дополнительных шумов в зал;
- сохранять постоянными параметры исходного звука по амплитудным и частотным характеристикам (минимизировать искажения звука).

Удовлетворительная мера качества воспроизведения звука есть произведение значений динамического диапазона звука ΔL и десятичного логарифма частотного диапазона Δf .

* В дальнейшем под термином «зал» подразумевается помещение с определенным функциональным назначением.

Для большого симфонического оркестра $\Delta L=75\text{дБ}$ (от пианиссимо до фортиссимо), при частотном диапазоне, включающем высшие гармоники тембра, $\Delta f=20\text{кГц}$. Тогда критерий акустического качества электрозвукоусиления $K(\Delta L, \Delta f)$ можно представить в виде:

$$K(\Delta L, \Delta f) = \Delta L \cdot \log \Delta f = 75 \cdot \log 20 = 97,6. \quad (1)$$

Подобное значение критерия акустического качества труднодостижимо для самих совершенных систем звукоусиления, в то время как наиболее распространенные системы с параметрами $\Delta L < 70\text{дБ}$ и $\Delta f = 15\text{кГц}$ позволяют получить следующий диапазон изменения:

$$70,5 < K(\Delta L, \Delta f) < 82,3. \quad (2)$$

2. Основные составные части электроакустических систем звуковоспроизведения.

Система звуковоспроизведения состоит из трех основных частей: микрофона (микрофонов), усилителя (усилителей) и громкоговорителя (громкоговорителей).

Микрофоны. Для звуковоспроизведения в настоящее время используются четыре типа микрофонов:

- конденсаторные;
- ленточные;
- катушечные электродинамические;
- пьезоэлектрические.

Наиболее широко используются микрофоны первого типа, имеющие линейные амплитудно-частотные характеристики в широком звуковом диапазоне. Важным критерием при выборе микрофона является его направленность, так как при использовании ненаправленного микрофона он будет воспринимать звук, излучаемый громкоговорителем, что приведет к возникновению обратной акустической связи, которая проявляется в виде воющих и свистящих шумов.

Обычно обратная акустическая связь возникает на частоте, соответствующей основной резонансной частоте помещения – $f_p = \frac{c}{2L}$, где L – характерный линейный размер зала, однако, затем она может возникнуть на частоте, соответствующей большому уровню звукового давления, излучаемого громкоговорителем в сторону микрофона.

Громкоговорители.

Средняя мощность, создаваемая в помещении средних размеров голоом одного человека (без усиления), составляет $P_a = 3 \cdot 10^{-6}$ Вт, а ее пиковые (максимальные) значения при повышении голоса могут достигать $3 \cdot 10^{-3}$ Вт. Средний коэффициент полезного действия (КПД) преобразования громкоговорителем электрического сигнала в акустический составляет 3% (максимальный КПД – 5%). Чтобы достичь указанного значения максимальной аку-

стической мощности повышенного голоса человека, электрическая мощность громкоговорителя должна составлять:

$$P_{эл} = 0,003/0,03 = 0,1 \text{ Вт.}$$

Направленность излучения звуковой колонки, состоящей из 6-9 громкоговорителей, установленных в один ряд (чаще вертикально), есть:

$$D_r = 2,4\sqrt{\ell \cdot f \cdot 10^{-3}}, \text{ где } f - \text{ звуковая частота, Гц; } \ell - \text{ высота колонки, м.}$$

Например, 1,5-метровая звуковая колонка имеет следующие значения направленности:

$$\text{а) } f=125\text{Гц} \quad D_r = 2,4\sqrt{1,5 \cdot 0,125} = 1;$$

$$\text{б) } f=250\text{Гц} \quad D_r = 2,4\sqrt{1,5 \cdot 0,25} = 1,47;$$

$$\text{в) } f=1000\text{Гц} \quad D_r = 2,4\sqrt{1,5 \cdot 1} = 2,94.$$

В диффузорных громкоговорителях диафрагма, входящая в его механическую подвижную систему, выполняет как функцию преобразования механических колебаний в акустические, так и функцию излучения звука в окружающую среду. Чтобы избежать влияния резонансов объема корпуса колонки, внутренние стенки покрывают звукопоглощающим материалом.

Для получения остронаправленных характеристик излучения и повышения мощности применяют групповые излучатели – звуковые колонки, радиальные громкоговорители и звуковые люстры.

Рупорные громкоговорители имеют различные формы изменения поперечного сечения – экспоненциальные, реже – конические.

Необходимо отметить, что при значительной звуковой мощности рупоры вносят заметные нелинейные искажения, обусловленные большой величиной и резким изменением амплитуды звукового давления в горловине.

Современные громкоговорители преимущественно электродинамические и редко – электростатические, хотя преимущества последних очевидны – малые нелинейные искажения, хорошая передача высоких частот, высокая равномерность частотных характеристик.

При выборе усилителей целесообразно использовать те, у которых выходная мощность значительно превосходит требуемую, используя при этом лишь часть его номинальной мощности, поскольку использование усилителя на предельной мощности может привести к появлению шумов и искажений спектральных амплитудно-частотных характеристик.

Залы, оборудованные электроакустическими системами (системами озвучивания) могут относиться к двум группам:

1) залы, в которых зрители воспринимают звук непосредственно со сцены и с помощью системы звукоусиления (лекционные, концертные залы, залы многоцелевого назначения);

2) залы, в которых зрители воспринимают звук только с помощью звуковоспроизводящей системы (кинотеатры).

Система озвучивания – это совокупность устройств, предназначенных для передачи звука через систему звукоусиления или звуковоспроизведения.

Система звуковоспроизведения – это система, передающая сигнал от носителя (CD, DVD-плееры, магнитофоны, электрофоны или кинопроекторы, видеопроекторы и т.п.) к слушателю. Целесообразность использования систем звукоусиления в залах первой группы (для кинотеатров это очевидно) определяется прежде всего их значительными линейными размерами. В современных залах многоцелевого назначения большого объема, кроме усиления звука, специальные цифровые электроакустические системы могут выполнять еще и функции регулирования времени реверберации (т.н. амбиофонические системы звуковоспроизведения).

Вследствие разнообразия форм, высот и объемов залов решение задач звукоусиления состоит:

- в обоснованном выборе электротехнической аппаратуры;
- выборе мест расположения микрофонов и громкоговорителей;
- необходимой коррекции амплитудно-частотных характеристик звукоусиления.

3. Сосредоточенные, распределенные и другие системы звуковоспроизведения.

В современных залах используют следующие виды систем звукоусиления: сосредоточенная, рассредоточенная и распределенная конфигурации.

При сосредоточенной системе один или несколько громкоговорителей расположены в одной части зала достаточно близко друг к другу, например, над эстрадой или по бокам сценического портала. Громкоговорители выносятся вперед и выше по отношению к микрофону (микрофонам) с целью ослабления обратной акустической взаимосвязи.

Рассредоточенная система – это система, при которой громкоговорители располагаются на таких расстояниях друг от друга, при которых уровень звукового давления в каждой озвучиваемой зоне создается ближайшим громкоговорителем, а на стыках зон звукоусиления уровни звукового давления от соседних громкоговорителей суммируются.

При распределенной системе озвучивания громкоговорители размещены на небольшие расстояния друг от друга и суммарный уровень звукового давления в каждой точке зала определяется действием большей части громкоговорителей.

Распределенная система может быть двух видов:

- громкоговорители расположены на поверхностях зала;
- маломощные громкоговорители вмонтированы в спинки кресел.

Основным достоинством кресельной системы, оправдывающим ее применение в залах больших объемов, есть хорошая однородность давления

звукового поля; повышенная четкость усиленного сигнала и малая акустическая обратная связь.

Однако невысокое качество звука у громкоговорителей малого размера позволяет использовать их преимущественно для усиления речи и очень редко для усиления музыкальных программ. Для усиления концертных программ и солистов в больших залах используется многоканальная стереофоническая система, позволяющая получить не только высококачественное звукоусиление, но и обеспечить пространственную акустическую перспективу. Стереофонический эффект в зале заметно возрастает при увеличении каналов связи микрофонов с громкоговорителями до 5, а затем его рост замедляется.

В современных панорамных кинотеатрах и киноконцертных залах используют 5-ти, 9-ти и 12-ти и более каналные системы звуковоспроизведения, позволяющие создать стерео, расширенный стерео, пространственные стереофонические и другие эффекты, обеспечивающие качественное восприятие речевых и музыкальных программ. Основная трудность акустического проектирования залов многоцелевого назначения заключается в том, что для речевых программ требуется меньшее время реверберации, чем для музыкальных программ. С помощью современных цифровых систем искусственной реверберации осуществляется необходимое управление (уменьшение, увеличение) времени реверберации, а также формирование соответствующих ему амплитудно-частотных характеристик в зависимости от типа музыкальных программ.

Амбиофонические системы звуковоспроизведения позволяют создать управляемую систему искусственной реверберации, основанную на формировании звуковых сигналов с различным временем запаздывания, которая воспринимается совместно с собственной акустической реверберацией зала.

При работе амбиофонической системы улучшается звучание музыки, оно становится более полным, объемным и выразительным за счет увеличения диффузности звукового поля в зале.

Следует отметить, что в основном зрители воспринимают прямую звуковую энергию от громкоговорителей, так как отраженная от поверхностей зала звуковая энергия менее интенсивна, чем прямая. Следовательно, структурная форма плана и разреза зала со звукоусилением менее значительна чем в залах с естественной акустикой, особенно с учетом того, что большая часть внутренних поверхностей имеет достаточно большое звукопоглощение с целью обеспечения оптимального времени реверберации. Кроме того, возможные акустические дефекты могут быть устранены в процессе электроакустического проектирования и связанной с ним профессиональной наладке электроакустических систем.

В залах большого объема «ранний звук» определяется как прямой и отраженный звук, поступившие в течение первых 80 мс после прихода прямого звука. При этом существенное значение имеет направление прихода этих ранних звуков – так, например, звуки, пришедшие от боковых стен в

первые 80 мс, создают ощущение «расширения» источника звука и объемности звучания музыки.

4. Акустические и геометрические параметры помещений.

Для речи важнейшим параметром является ее разборчивость (артикуляция) и степень зависимости от уровня громкости источника звука и посторонних шумов. Высокое качество музыкального восприятия определяется также уровнем громкости источника (источников) звука, прозрачностью и объемом звучания, тембральной окраской, балансом звука и рядом других субъективных критериев.

Для речи главный субъективный критерий качества звучания - хорошая слоговая и общая разборчивость. При этом следует различать чисто «информативную» речь – лекцию, доклад, монолог и т.п. и речь художественную, имеющую, благодаря интонации, определенное эстетическое содержание (драмтеатр).

Для каждого вида музыки и речи существуют оптимальные пределы изменения времени реверберации, которые изменяются в пределах от 0,4сек до 1сек для речи, от 1сек до 1,5сек для камерной музыки и от 1,8сек до 2,2сек для симфонической музыки, при этом наибольшее влияние на субъективное ощущение «жизненности» звучания оказывает значение времени реверберации на средних частотах.

Следует отметить, что для залов больших объемов при использовании систем звуковоспроизведения и звукоусиления время реверберации уже не может служить единственным критерием акустического качества. Между прямым звуком и сигналом завершающего участка реверберационного процесса расположен спектр ранних полезных отражений, существенно влияющих на качество звучания. Их интенсивность, направление и время прихода определяют комфортные и дискомфортные зоны партера и зависят от расположения, формы и акустической отделки отражающих элементов стен и потолков, с которыми такие отражения взаимодействуют до прихода к слушателям. Системы звукоусиления с цифровым управлением акустикой зала позволяют улучшить звуковую картину ранних полезных отражений, так как они позволяют заполнить искусственными запаздывающими повторениями звукового сигнала те интервалы времени, в пределах которых отсутствуют естественные акустические отражения, обеспечивая при этом неразрывность звучания.

Граница между ранними и поздними звуковыми отражениями лежит вблизи 50мс для речи и 80мс для музыки, при этом ранние отражения преимущественно от потолка повышают разборчивость и прозрачность, поздние – пространственное впечатление (объемность). Боковые отражения, приходящие в интервале времени от 25 до 80мс, могут одновременно повышать как прозрачность так и пространственное впечатление речевого и музыкального сигнала.

Громкость при оценке качества зала представляет собой субъективную оценку громкости источника звука при игре «фортиссимо» по отношению к некоторой ожидаемой громкости на месте прослушивания. Наиболее благоприятное расстояние, соответствующее параметру «громкость» в большинстве хороших залов при прослушивании прямого звука от оркестра – 18м, от солистов - 6÷15м.

В силу значимости влияния ранних и поздних звуковых отражений на акустическое качество можно предложить простые рекомендации при формировании геометрии концертных залов. В таблице представлены рекомендуемые времена запаздывания для речи и музыки с учетом того, что первое запаздывающее отражение, как правило, приходит от потолка; второе – от боковых стен; третье – от задней стены зала.

Таблица

Вид звучания	$\Delta t_{\text{пот}}$ (мс)	$\Delta t_{\text{бок.ст.}}$ (мс)	$\Delta t_{\text{задн. ст.}}$ (мс)
речь	10-15	15-22	24-45
музыка	20-30	35-50	50-70

Из нее видно, что для достижения хорошей разборчивости речи ранние и поздние времена запаздывания должны быть небольшими, в то время как для подчеркивания музыкального мелодического звучания требуется большее запаздывание. Отсюда вытекают рекомендуемые размеры для речевых залов: высота и ширина не менее 7м и 14м; для концертных залов: высота и ширина не менее 9м и 18м соответственно.

5. Требования, предъявляемые к системам озвучения и их конструктивные особенности.

Требования к системам озвучения состоят в том, что они, прежде всего, должны обеспечивать необходимый уровень звука на всей площади зрительных мест. Максимальный уровень звука при этом определяется из условий естественного (без искажений) звучания первичных источников звука. Для музыкальных программ такой уровень составляет 90-94дБ, что соответствует уровню звука симфонического оркестра в центральной зоне зала.

Для речевых программ максимальный уровень должен составлять 80дБ÷86дБ. Примерно такой уровень звука обеспечивает оратор на расстоянии 1,5м÷2м от источника звука.

Наряду с необходимым уровнем звука система озвучения должна обеспечить и его равномерное распределение по площади слушательских мест. Разница между максимальным и минимальным уровнями звука, создаваемыми системой по всей площади посадочных мест, не должна превышать 6дБ для музыки и 8дБ для речи при обеспечении надлежащей разборчивости речи.

Расположение громкоговорителей в зале не должно приводить к появлению мешающего или заметного эха. Этот эффект может возникнуть, если

звук ближайшего к слушателю громкоговорителя приходит значительно раньше звука первичного источника или другого громкоговорителя. Для быстрой оценки опасности эхообразования, как и в случае естественной акустики, можно воспользоваться пороговыми кривыми, приведенными на рис. 3. Эхообразование в системах озвучения устраняется с помощью задержки электрических сигналов, поступающих на ближайшие к слушателю громкоговорители. С расположением громкоговорителей связано и требование пространственной локализации первичных источников звука. Нарушение пространственной локализации часто встречается в широких залах при расположении громкоговорителей по бокам портала сцены или на боковых стенах. Чтобы усилить эффект локализации источников звука необходимо использовать дополнительную линейку группы громкоговорителей, расположенных над первичным источником (источниками) звука.

Такую линейку громкоговорителей обычно называют верхним звуковым порталом, причем уровень звука, создаваемый им, должен быть преобладающим по сравнению с уровнями звука других громкоговорителей.

Важное требование, которому должна удовлетворять система озвучения – отсутствие тембровых искажений. Для контроля этого требования на вход системы озвучения подаются электрические сигналы постоянного уровня, но с различной частотой. Это могут быть синусоидальные сигналы с плавно изменяющейся частотой или третьоктавные полосы «розового» шума. Изменение уровня звукового сигнала, принятого в различных точках зала, не должны выходить за допустимые пределы.

Конструктивные особенности систем озвучения и звуковоспроизведения зависят от расположения громкоговорителей по отношению к озвучиваемой площади и подразделяются на сосредоточенные (централизованные), зонные и распределенные.

Громкоговорители сосредоточенных систем располагаются в пределах ограниченного пространства на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга. В зрительных залах громкоговорители сосредоточенных систем обычно размещаются над верхним порталом и по его бокам. Высоту подвеса сосредоточенной системы необходимо определять в зависимости от назначения данной системы: будет ли она использоваться для озвучивания или для звукоусиления.

Для сильно заглушенной задней стены зала ($\alpha > 0,8$) в случае озвучивания высота подвеса звуковой колонки:

$$h \cong \ell \sqrt{1 - e_g^2}, \text{ а в случае звукоусиления:} \quad (3)$$

$$h \cong 2\ell \sqrt{1 - e_g^2}, \text{ где} \quad (4)$$

ℓ - длина зала, м; e_g - эксцентриситет эллипса, аппроксимирующего диаграмму направленности в плоскости, проходящей через продольную ось колонки.

В сосредоточенных системах направление распространения звука может быть легко совмещено с направлением прихода зрительного ощущения, т.е. с усилением пространственной ориентации на источник звука. Если слушательские места охватывают сцену, находящуюся в центре зала, то громкоговорители могут быть сгруппированы в «звуковую люстру», находящуюся посередине потолка. Сосредоточенные системы озвучения обеспечивают приемлемую пространственную локализацию источника звука при стереофоническом звуковоспроизведении, хотя не всегда можно добиться требуемой неравномерности звукового поля при их использовании.

В зональных системах озвучения громкоговорители располагаются на таких расстояниях друг от друга, что уровень звука в каждой из точек нахождения слушателей, создается в основном одним из ближайших громкоговорителей и только на стыках зон уровни от соседних громкоговорителей суммируются (по интенсивности). Это суммирование приводит к повышению уровня звука в стыковых зонах и соответственно к уменьшению неравномерности озвучения. Зональные системы чаще всего используются в комбинации с сосредоточенными для «подзвучки» частично изолированных участков зала – ниш, балконов, лож, узких пространственных арок. Зональные группы громкоговорителей на боковых стенах залов используются для создания объемного звучания, причем электрические сигналы поступают на них, как правило, через цифровые линии задержки.

Распределенные системы озвучения устраиваются обычно в залах с малой высотой и значительной длиной. В длинных залах громкоговорители располагаются в виде цепочек по боковым стенам, причем расстояния между громкоговорителями выбираются такими, чтобы в каждой точке помещения суммарный уровень звука формировался от действия всех или большей части излучателей.

В залах с малой высотой громкоговорители располагаются в узлах регулярной сетки, на которую разбивается поверхность потолка, при этом шаг в любой цепочке излучателей должен выбираться таким, чтобы запаздывание сигналов соседних громкоговорителей не вызывало отчетливого эха. Решетка (сетка) по всему потолку может иметь шахматную или прямоугольную структуру громкоговорителей с приемлемым значением неравномерности звукового поля.

В распределенных системах слуховой и зрительный образы, как правило, не совпадают, особенно при использовании кресельных систем озвучения, когда на спинках кресел укреплены индивидуальные громкоговорители, и уровень звука для слушателя в основном создается своим и двумя соседними (слева и справа) громкоговорителями. В ряде случаев используют комбинированные системы озвучения, например, сосредоточенную и зональную; сосредоточенную и распределенную.

При проектировании систем озвучения громкоговорители должны располагаться так, чтобы прямой звук от них не попадал в зону расположения

микрофонов с целью ослабления обратной акустической связи. Средний коэффициент звукопоглощения поверхностей зала, примыкающих к местам расположения микрофонов, должен быть на 10%-20% выше, чем в целом по залу. Это условие выполняется в залах с выделенным сценическим объемом, в котором практически всегда имеются занавесы, кулисы, декорации. В залах, где зрительская часть и сцена представляют единый объем, целесообразно предусмотреть звукопоглощающую отделку и/или расчленение примыкающих к сцене поверхностей стен и потолка. Для повышения надежности работы системы звукоусиления полезно ослабить «театральное эхо» от задней стены зала, путем изменения конфигурации примыкания к потолку и покрытия ее эффективным ($\alpha > 0,8$) звукопоглотителем. Декоративные решетки прикрывающие отверстие для громкоговорителей, должны иметь перфорацию не менее 70% по площади и толщину не менее 1см.

6. Акустический расчет мощности систем звукоусиления.

При расположении озвучиваемых мест партера в основном за пределами радиуса гулкости уровень звукового давления на озвучиваемой площади определяется общей акустической мощностью громкоговорителей. Величину акустической мощности громкоговорителей $P_{ак}$, Вт, найдем по формуле:

$$P_{ак} = \frac{p^2 \cdot V}{T} \cdot 10^{-4}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где V – объем помещения, м^3 ; T – время реверберации для частот 500-2000 Гц, сек; p^2 – квадрат звукового давления, Па.

Электрическая мощность $P_{эл}$ находится из соотношения:

$$P_{эл} = \frac{P_{ак} \cdot 100\%}{\eta},$$

(6)

где η - к.п.д. громкоговорителя в %; $\eta = 0,5\%$ - для мощных громкоговорителей и $\eta = 0,1\%-0,2\%$ - для громкоговорителей малой мощности.

Радиус гулкости r_r , м находим по формуле:

$$r_r = \sqrt{\bar{\alpha} S_0 \Omega D^2(\Theta) / [50,3(1-\bar{\alpha})]}, \quad (7)$$

где $\bar{\alpha}$ - средний коэффициент поглощения в зале; S_0 - общая площадь внутренних поверхностей, м^2 ; Ω - коэффициент осевой концентрации; $D(\Theta)$ - коэффициент направленности излучения для угла Θ между акустической осью громкоговорителя и направлением на рассматриваемую точку.

При расположении озвучиваемых мест в пределах радиуса гулкости уровень звукового давления определяется электрической мощностью ближайшего громкоговорителя, его средним стандартным звуковым давлением P_1 и диаграммой направленности.

Уровень прямого звука $L_{пр}$, который требуется создать в наиболее удаленной точке слушательских мест на расстоянии r_{max} от громкоговорителя, связан с электрической мощностью $P_{эл}$ и средним стандартным звуковым давлением P_1 соотношением:

$$L_{пр} = 20\lg P_1 + 10\lg P_{эл} - 20\lg r_{max} + 104, \text{ дБ.} \quad (8)$$

Зная табличное значение среднего стандартного звукового давления громкоговорителя - P_1 из формулы (8) определяется электрическая мощность $P_{эл}$, которая озвучивает рассматриваемую зону. Общая электрическая мощность системы громкоговорителей равна сумме электрических мощностей отдельных громкоговорителей.

7. Расчет неравномерности прямого звука при звукоусилении.

Неравномерность поля прямого звука зависит от расположения и типа громкоговорителей, а также их диаграммы направленности. При высоте настенного подвеса h громкоговорителя над озвучиваемой поверхностью (эта поверхность берется на 1,2м выше уровня пола) ширина озвучиваемой площадки b , длина ℓ и неравномерность звукового поля ΔL подчиняются следующим соотношениям:

- для звуковой колонки:

$$\frac{b}{\ell} = 2 \left\{ \frac{1 + \left(\frac{h}{\ell}\right)^2 \left(1 - e_r^2\right)^{1/2}}{1 + \frac{h^2}{\ell^2} \left(1 - e_b^2\right)} \right\}; \quad (9)$$

$$\Delta L = 10\lg \left\{ \left[1 + \frac{1}{\frac{h^2}{\ell^2} (1 - e_b^2)} \right] \cdot \left[1 + \left(1 - e_b^2\right) \left(\frac{\ell}{h}\right)^2 \right] \right\} - m, \text{ дБ;} \quad (10)$$

- для рупорного громкоговорителя:

$$\frac{b}{\ell} = \left\{ \frac{1 + \left(\frac{h}{\ell}\right)^2 \left(1 - e_s^2\right) \left(1 - e_r^2\right)}{1 + \left(\frac{\ell}{h}\right)^2 \left(1 - e_s^2\right)} \right\};$$

(11)

$$\Delta L = 20\lg \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(1 - e_b^2\right) \left(\frac{\ell}{h}\right)^2} \right] \left[1 + \frac{1}{4 \left[1 + \frac{h^2}{\ell^2} \left(1 - e_b^2\right) \right]} \right] \right\}, \text{ дБ;} \quad (12)$$

$m = 0$ – для одиночного громкоговорителя; $m = 3$ – для линейной цепочки громкоговорителей; e_r, e_b - значения эксцентриситетов эллипсоидов, которыми аппроксимируются диаграммы направленности громкоговорителей (по справочнику).

Для распределенной (потолочной) цепочки громкоговорителей (озвучиваемая поверхность аппроксимируется квадратом), неравномерность звукового поля равна:

$$\Delta L = k10 \lg \left\{ 1 + \frac{b^2}{2h^2 \left[\frac{1}{(1-e^2)} \right]} \right\} - 3, \text{ дБ}, \quad (13)$$

где b – сторона квадрата озвучиваемой площадки; $e_r = e_b = e$; $k = 1$ – для диффузорных громкоговорителей; $k = 2$ – для рупорных громкоговорителей.

8. Расчет разборчивости речи при звукоусилении.

Расчет разборчивости речи при звукоусилении в закрытых помещениях зависит от отношения полезной средней плотности звуковой энергии к средней плотности мешающего (маскирующего) звука. Фактор разборчивости речи при звукоусилении определяется через геометрические и акустические параметры помещения и характеристики громкоговорителей следующим образом:

$$Q = \left[T + \frac{13,8 \Omega V}{4 \pi \cdot r^2 \cdot C \cdot N} \right] e^{\frac{0,69}{T}} / T, \quad (14)$$

где N – число громкоговорителей; Ω - коэффициент осевой концентрации; V – объем помещения, m^3 ; c – скорость звука, м/сек; r – высота подвеса колонки до озвучиваемой поверхности, м; T – время реверберации, сек. Далее, по графику на рис. 2 по найденному значению фактора разборчивости речи находится процент слоговой разборчивости.

9. Проверка расчета на отсутствие эха в помещении.

Проверка на отсутствие эха для распределенных и зональных систем озвучения осуществляется следующим образом:

- определяются уровни звукового давления, создаваемые в выбранной точке озвучиваемой поверхности ближайшим громкоговорителем и соседними с ним;

- вычисляется разность этих уровней ΔL и время запаздывания звука соседнего громкоговорителя Δt по отношению к ближайшему громкоговорителю.

- для полученного времени запаздывания Δt разность уровней ΔL не должна лежать выше пороговой кривой на рис. 3.

При равномерном расположении громкоговорителей системы достаточно провести проверку отсутствия эха для одной точки озвучиваемой поверхности, а при неравномерном расположении – необходимо проанализировать несколько точек, охватывающих всю озвучиваемую поверхность. Кривая оценки эхообразования может быть также использована для оценки опасности возникновения эха и в тех случаях, когда запаздывающим сигналом является не прямой звук громкоговорителя, а звуковые отражения от поверхностей зала (особенно от задней стены).

Уровень звукового давления, создаваемый отдельным рассматриваемым громкоговорителем в любой точке озвучиваемой поверхности определяется по формуле:

$$L = 20 \lg P_1 + 10 \lg P_{эл} - 20 \lg r + 20 \lg D(\Theta) + 104, \text{ дБ}, \quad (15)$$

где P_1 – среднее стандартное звуковое давление (Па); $P_{эл}$ – электрическая мощность громкоговорителя (Вт); $D(\Theta)$ – коэффициент направленности для угла Θ между акустической осью громкоговорителя и направлением на выбранную точку; r – расстояние от громкоговорителя до выбранной точки, м.

запаздывание звука Δt по определению вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \Delta r \frac{1000}{c}, \text{ мс}, \quad (16)$$

где Δr – разность расстояний от двух рассматриваемых громкоговорителей, м; c – скорость звука в воздухе, м/с.

II. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗВУКОУСИЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ **АУДИТОРИИ НА 400 ЧЕЛОВЕК**

10. Определение акустических и геометрических параметров зала.

Задание. Необходимо провести проектирование звукоусилительной установки для аудитории на 400 чел. Расстояние между первым рядом на горизонтальном полу и передней стеной равно 3 м. Микрофонов 2 шт. – один стационарный на кафедре, второй – у доски, переносной. Пол паркетный, столы и стулья деревянные, потолок и стены покрыты гипсовой штукатуркой. Разрез трехкратно структурирован (плоские передний и задний отражающие козырьки и горизонтальная средняя часть); план имеет трапециевидную форму с углом раскрытия боковых стен 6° и задние боковые отражающие поверхности с углами закрытия примерно 12° ; пол наклонный – с углом подъема $7-8^\circ$. Принимаем, что расчетный объем сформированного зала равен 2000 м^3 , а с учетом наличия деревянных столов, удельный объем на одного зрителя равен $V_1 = 5 \text{ м}^3$.

Оптимальные средние геометрические пропорции зала составят – $H:B:L = 3:5:8$ и для расчетного объема $V_p = 2000 \text{ м}^3$ средние значения будут равны:

$$\bar{H} = 0,6082 \cdot V_p^{1/3} = 7,66 \text{ м}; \quad (17)$$

$$\bar{B} = 1,0135 \cdot V_p^{1/3} = 12,77 \text{ м}; \quad (18)$$

$$\bar{L} = 1,6216 \cdot V_p^{1/3} = 20,43 \text{ м}. \quad (19)$$

С учетом двух продольных проходов шириной 1,2 м каждый, в каждом ряду будет

$$N_{\text{ст}} = \frac{12,77 - 2,4}{1,25} = 8 \text{ столов}, \quad (20)$$

где 1,25 – средняя длина стола.

Среднее число слушателей в одном ряду есть:

$$N_c = 3 \cdot 8 = 24 \text{ чел}, \quad (21)$$

а соответствующее ему среднее число рядов в аудитории равно:

$$N_p = 400 : 24 = 17 \text{ рядов}. \quad (22)$$

Тогда общая длина зала, формирующая озвучиваемую поверхность равна:

$$L_z = 3 + (N_p - 1) \cdot 1 \text{ м} + 1,2 = 20,2 \text{ м}, \quad (23)$$

что согласуется с полученной ранее длиной зала равной 20,43 м.

Поскольку облицовочные материалы в интерьере зала традиционные, то дополнительный вклад в общее звукопоглощение внесут деревянные столы и с учетом этого можно определить приближенное значение времени реверберации:

$$T_p = \frac{0,025 \cdot V_p^{1/3}}{\varphi(\bar{\alpha})} = \frac{0,025 \cdot V_p^{1/3}}{1,87 \cdot V_p^{-0,226}} = 0,01 V_p^{0,56} = 0,01(2000)^{0,56} = 0,917 \text{ сек}. \quad (24)$$

Нормативное значение времени реверберации для речевого зала с расчетным объемом $V_p = 2000 \text{ м}^3$ равно:

$$T_n = 0,29 \ell g V_p = 0,29 \ell g 2000 = 0,9573 \text{ сек}, \quad (25)$$

что с погрешностью $\Delta T = \frac{0,957 - 0,917}{0,957} \cdot 100\% = 4,18\%$ соответствует норматив-

ному значению.

Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ для проектируемой аудитории равен:

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{-\varphi(\bar{\alpha})} = 1 - e^{-1,87(2000)^{-0,226}} = 0,28.$$

Внутренняя площадь ограждающих поверхностей аудитории равна:

$$S = 6,5(2000)^{2/3} = 1031,76 \text{ м}^2.$$

11. Выбор системы озвучения аудитории на 400 чел.

План и поперечный продольный разрез зала представлены на рис. 1. Число слушателей составляет 400 чел. (штатный вариант). В случае преобладающей эксплуатации в нештатном варианте с целью уменьшения времени

реверберации и ослабления эффекта «театрального» эха, заднюю стену зала начиная с 1,5м по высоте, целесообразно покрыть эффективным звукопоглотителем ($\alpha > 0,75$). Средняя высота, ширина и длина зала равны $H = 7,66\text{м}$, $B = 12,77\text{м}$ и $L = 20,43\text{м}$ соответственно. Материалы отделки внутренних поверхностей зала традиционные – гипсовая штукатурка и паркетный пол. Расчетное время реверберации в диапазоне частот 500Гц - 1000Гц составляет $T_p = 0,917\text{сек}$ и практически находится в 10% - допустимой области требуемых значений.

В рассматриваемой аудитории для ее озвучения возможно разместить как сосредоточенную систему так и распределенную систему звукоусиления.

В сосредоточенной системе могут быть использованы рупорные громкоговорители или звуковые колонки. Распределенную систему можно применить в виде настенных или потолочных цепочек. Вследствие того, что ширина помещения больше 12м, в настенных цепочках можно использовать как ненаправленные громкоговорители, так и звуковые колонки. Очевидно, что лучшей системой озвучения будет та, которая обеспечивает наименьшее значение максимальной величины акустического отношения, а также дает небольшую неравномерность озвучения. Отметим, что использование распределенной системы озвучения в виде потолочных цепочек дает меньшее значение акустического отношения, так как громкоговорители в потолочных цепочках находятся ближе к слушателям, чем в настенных. Из опыта проектирования систем озвучения известно, что потолочные цепочки из звуковых колонок дают наименьшие величины неравномерности озвучения, а рупорные громкоговорители – наибольшие.

12. Расчет акустической мощности системы озвучения помещения.

При расчете акустической мощности системы озвучения следует принять во внимание следующие требования:

- максимальный уровень звукового давления на озвучиваемой поверхности $L_{\text{гп}}$ должен быть равен 80-86 дБ для воспроизведения речи и 94-96 дБ для воспроизведения музыки.

- неравномерность звукового поля должна быть не более 8-10 дБ для воспроизведения речи и не более 6 дБ для воспроизведения музыки.

- проектируемая система звуковоспроизведения должна обеспечивать достаточную разборчивость речи (слоговая разборчивость не ниже 70%).

- при использовании в системе звуковоспроизведения нескольких громкоговорителей (или групп громкоговорителей), озвучивающих различные зоны, необходимо, чтобы запаздывающие звуковые отражения, попадающие на любое слушательское место от громкоговорителей соседних зон, не создавали помехи типа «порхающего» эха. Радиус гулкости для минимальных значений коэффициента осевой концентрации – $\Omega=4$ для частоты 500Гц и среднего значения коэффициента осевой направленности $D(\Theta)=0,9$ равен:

$$R_r = \sqrt{\frac{\bar{\alpha} \cdot S \cdot \Omega \cdot D(\Theta)^2}{50,3(1-\bar{\alpha})}} = \sqrt{\frac{0,28 \cdot 1021,76 \cdot 0,81 \cdot 4}{50,3(1-0,28)}} = 5,08 \text{ м.}$$

(26)

Радиус гулкости превышает расстояние подвеса настенной распределенной системы озвучения, равной 2м, поэтому расчет акустической мощности излучателей проводится по формуле (8). С учетом того, что расстояние от среднего громкоговорителя настенной цепочки до противоположного крайнего места в последнем ряду равно примерно 13,5м, среднее стандартное звуковое давление громкоговорителя – $P_1=1,7 \div 1,8$ Па, а уровень звукового давления равен примерно 89 дБ, получим:

$$89 = 20 \lg 1,8 + 10 \lg P_{\text{эл}} - 20 \lg 13,5 + 104, \text{ откуда} \quad (27)$$

$P_{\text{эл}} = 10^{0,25} = 1,78$ Вт; выбираем $P_{\text{эл}} = 2$ Вт, что соответствует электрической мощности звуковых колонок 2КЗ-2.

13. Расчет неравномерности озвучения по ширине и длине помещения.

Из практики проектирования систем озвучения и звукоусиления известно, что если помещение имеет объем свыше $V=2000\text{м}^3$ или длину более 20м, то уровень звукового давления, создаваемого голосом, как правило, недостаточен для того, чтобы создать требуемый уровень громкости в удаленных точках помещения, необходимый для удовлетворительной разборчивости передаваемой речи. Кроме того, если уровень шумов в помещении превосходит 60дБ, то даже в небольших по объему ($200\text{-}300\text{м}^3$) помещениях мощности голоса человека также недостаточно для обеспечения требуемой разборчивости.

Следовательно, звукоусилительный тракт должен обеспечивать соответствующие превышения спектральных уровней речи и музыки над спектральными уровнями помех и шумов. В таблице 3 приведены рекомендуемые номинальные уровни звукового давления. Важно также обеспечить возможно наименьшую неравномерность озвучения, т.е. минимизировать изменение уровня звукового давления от одной до другой контрольных точек в партере:

$$\Delta L = L_{\text{max}} - L_{\text{min}}, \text{ где } L_{\text{max}} \text{ и } L_{\text{min}} - \text{максимальный и минимальный} \quad (28)$$

уровни звукового давления прямого звука, создаваемые системой озвучения. Для распределенной системы громкоговорителей (настенной, потолочной) для большинства соразмерных помещений разность времен прихода звукового сигнала о любой пары громкоговорителей в выбранную контрольную точку не превышает 60 мс, поэтому прямой звук от всех громкоговорителей считается полезным.

Минимальное значение уровня звукового давления прямого звука находится на продольной оси помещения:

$$L_{\text{пр мин}} \approx L_1 - 10 \lg \frac{\ell_{\text{ц}} b_{\text{ц}}}{2\pi \cdot n \sqrt{1 - e_r^2}}, \text{ дБ,} \quad (29)$$

где n – число громкоговорителей в цепочках, $\ell_{ц}$ и $b_{ц}$ – длина и ширина цепочки, m , e_r – горизонтальный эксцентриситет эллипсоидов диаграммы направленности громкоговорителей.

При проектировании системы звукоусиления необходимо, чтобы слушатель, находящийся в последних рядах зала, т.е. на местах где акустическое отношение $R = \left(\frac{r}{r_r}\right)^2$ имеет максимальное значение (r_r – радиус гулкости, м; r – расстояние до контрольной точки), имел те же условия достаточной слышимости и разборчивости, что и слушатель в первых рядах зала. Разность между уровнем звукового давления прямого звука в последних рядах и уровнем звукового давления на входе микрофона (индекс передачи звукового тракта) равна:

$$Q_{м.с.} = L_{пр.} - L_{м} = 20 \lg \frac{r_m}{r_c}, \text{ и} \quad (30)$$

выбрав $r_m = 0,3 \div 0,5$ м – расстояние лектора от микрофона, $r_c = 1,5 \div 2$ м – расстояние от слушателя в первом ряду до лектора, получим:

$$Q_{м.с.} = 20 \lg \frac{0,5}{2} = -20 \lg 4 = -12 \text{ дБ.} \quad (31)$$

Поэтому ориентировочный индекс передачи звукового тракта для речи находится в пределах $-10 \div -14$ дБ (низкий уровень шумов).

Для распределенной системы из двух настенных цепочек состоящих из звуковых колонок 2К3-2 ($e_r=0,5$, $e_b=0,95$, $\Omega=5$) высота подвеса одной колонки над озвучиваемой поверхностью слушателей ($1\text{м} < h_c < 1,2\text{м}$) есть:

$$h_{ц} = 0,5B\sqrt{1-e_b^2} = 0,5 \cdot 12,77\sqrt{1-0,95^2} = 2 \text{ м.} \quad (32)$$

При такой высоте подвеса звуковых колонок уровни звука под цепочкой и на середине помещения будут примерно одинаковыми, а максимальный уровень звука находится на расстоянии, равном $1/4B$ (четверть ширины помещения) от боковых стен, и не отличается более чем на 1 дБ от уровня звука на середине зала.

Зная высоту подвеса настенной цепочки, можно найти соответствующий ей шаг цепочки:

$d = 2h_{ц}\sqrt{(1-e_r^2)/(1-e_b^2)} = 2 \cdot 2 \cdot 2,77 \approx 11$ м. С учетом увеличения направленности звука на высоких частотах, эффективное значение шага цепочки надо выбрать вдвое меньшим:

$$d_{эф} = 1/2d = 5,5 \text{ м.} \quad (33)$$

При таком шаге настенной цепочки неравномерность озвучения в продольном направлении не превышает 1 дБ.

Первую звуковую колонку устанавливаем на уровне линии 3 ряда, вторую – на уровне линии 9 ряда, третью – на уровне линии 15 ряда.

При выбранном размещении колонок неравномерность озвучения по ширине помещения есть:

$$\Delta L_B = 10 \lg \left[0,5 \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{b_u}{h_u} \right)^2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_u}{h_u} \right)^2}} \right) \right], \text{ дБ}, \quad (34)$$

$$\text{т.е. } \Delta L_B = 10 \lg \left[0,5 \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{12,77}{2} \right)^2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{12,77}{2} \right)^2}} \right) \right] = 2,85 \text{ дБ}, \quad (35)$$

Для неравномерности озвучения в продольном направлении (по длине помещения) зависимость такая же, как и для одной цепочки, при этом наибольшей неравномерность озвучения будет под цепочкой:

$$\Delta L_L = 20 \lg \text{cth} \left(\frac{\pi h_u}{d} \right) = 20 \lg \left(\frac{e^{\frac{\pi h_u}{d}} + e^{-\frac{\pi h_u}{d}}}{e^{\frac{\pi h_u}{d}} - e^{-\frac{\pi h_u}{d}}} \right), \text{ дБ}, \quad (36)$$

$$\text{т.е. } \Delta L_L = 20 \lg \left(\frac{e^{1,14} + e^{-1,14}}{e^{1,14} - e^{-1,14}} \right) = 20 \lg 1,23 = 0,9 \text{ дБ} \approx 1 \text{ дБ}. \quad (37)$$

Уровень звука в первом ряду будет примерно на 2дБ ниже, чем в последнем ряду. Для того, чтобы на краю первого ряда уровень звука был таким же, как и в конце аудитории, целесообразно первую звуковую колонку на уровне 3-го ряда развернуть в середину 4-го ряда.

Найдем акустическое отношение для двух цепочек из колонок 2КЗ-2: звуковое давление прямого звука на средней линии зала есть:

$$p^2 = \frac{2\pi \cdot p_1^2 \sqrt{1 - e_i^2}}{d \sqrt{0,25b_u^2 + h_u^2}} = \frac{2\pi \cdot 1,8^2 \sqrt{1 - 0,5^2}}{5,5 \sqrt{0,25 \cdot 12,77^2 + 2^2}} = 0,478, \quad (38)$$

т.е. $p = 0,69 \text{ Па}$, где $p_1 = 1,8 \text{ Па}$ – номинальное звуковое давление колонки 2КЗ-2, а $e_i = 0,5$ – эксцентриситет направленности излучения в горизонтальной плоскости.

Полученное звуковое давление соответствует уровню $L_{\Pi} = 20 \lg \frac{0,69}{2 \cdot 10^{-5}} = 90,75 \text{ дБ}$. В точках зала, не лежащих на средней линии, уровень звукового давления будет немного выше.

Уровень диффузного звука находим по формуле:

$$L_{д} = 10 \lg \frac{1 - \bar{\alpha}}{\alpha \cdot \Omega_{г}} + 94,9 \text{ дБ}, \quad (39)$$

где $\bar{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения в зале, $\Omega_{г}$ - коэффициент осевой концентрации громкоговорителя (на частоте $f=500$ Гц для колонки 2КЗ-2 он равен 4), т.е:

$$L_{д} = 10 \lg \frac{1 - 0,28}{0,28 \cdot 4} + 94,9 = 92,98 \text{ дБ}. \quad (40)$$

Тогда акустическое отношение равно:

$\Delta L_{Rm} = 92,98 - 90,75 = 2,03$ и его значение позволяет рассчитывать на приемлемую разборчивость речи в зале.

14. Расчет разборчивости речи.

Разборчивость речи для шести звуковых колонок 2КЗ-2 в проектируемом зале (рис. 1.) найдем по формуле (14), которая определяет фактор Q разборчивости речи.

$$Q = \left[T + \frac{13,8 \Omega V}{4 \pi \cdot r^2 \cdot C \cdot N} \right] e^{\frac{0,69}{T} / T}, \quad \text{где } T - \text{ время реверберации, сек; } V - \text{ объем зала, м}^3; N - \text{ число громкоговорителей; } \Omega - \text{ коэффициент осевой концентрации звука; } r - \text{ высота подвеса колонки до озвучиваемой поверхности, м.}$$

где T – время реверберации, сек; V - объем зала, м³; N – число громкоговорителей; Ω – коэффициент осевой концентрации звука; r – высота подвеса колонки до озвучиваемой поверхности, м.

$$Q = \left[0,917 + \frac{13,8 \cdot 4 \cdot 2000}{12,56 \cdot 2^2 \cdot 340 \cdot 6} \right] e^{\frac{0,69}{0,917} / 0,917} = 4,6, \quad (41)$$

что в соответствии с графиком, представленным на рис. 2 соответствует слоговой разборчивости равной 94%.

15. Проверка на отсутствие эха в помещении.

Проверка на отсутствие эха для выбранной распределенной системы громкоговорителей начинается с определения уровней звукового давления для одного из крайних мест в последнем ряду партера, создаваемых ближайшим громкоговорителем и соседним с ним.

Уровень звукового давления, создаваемый третьим громкоговорителем на расстоянии $r_1=11,37$ м до выбранной контрольной точки согласно формуле (15) есть:

$$L_1 = 20 \lg P_1 + 10 \lg P_{эл} - 20 \lg r + 20 \lg D(\Theta) + 104 = 20 \lg 1,8 + 10 \lg 2 - 20 \lg r + 20 \lg 0,95 + 104 = 90,55 \text{ дБ}. \quad (42)$$

Уровень звукового давления, создаваемый вторым громкоговорителем на расстоянии $r_2=13,5$ м до выбранной контрольной точки равен:

$$L_2 = 20 \lg 1,8 + 10 \lg 2 - 20 \lg 13,5 + 20 \lg 0,95 + 104 = 89,06 \text{ дБ}. \quad (43)$$

Учитывая тот факт, что сигналы от двух соседних громкоговорителей складываются как уровни, значение L_2 надо увеличить на 3дБ: $L_2 = 92,06$ дБ.

Разность звуковых уровней, создаваемых вторым и третьим громкоговорителями в выбранной контрольной точке равны $\Delta L = -1,5\text{дБ}$.

Запаздывание звука от двух соседних громкоговорителей в выбранной контрольной точке равно:

$$\Delta t = \frac{\Delta r \cdot 1000}{c} = \frac{(13,5 - 11,37) \cdot 1000}{c} = 6,3 \text{ мс.} \quad (44)$$

В соответствии с пороговой кривой заметности эха при заданных значениях $\Delta L = -1,5\text{дБ}$ и $\Delta t = 6,3\text{мс}$, расчетная точка лежит ниже нормативной кривой (рис. 3) и, следовательно, звук от двух соседних громкоговорителей не будет создавать осязаемое эхо.

16. Выбор типа микрофона для системы звукоусиления в аудитории.

Известно, что выбор типа микрофона для звукоусиления в зале производится в зависимости от требуемой частотной характеристики и устойчивости тракта звукоусиления, которые, в свою очередь, характеризуются видом диаграммы направленности микрофона, условиями его размещения в пространстве и индексом звукового выигрыша по диффузному полю.

Предельный индекс усиления системы звукоусиления должен быть не меньше, чем требуемый индекс усиления:

$$Q_{\text{мс}} \leq Q_{\text{мс.пред}} \quad (45)$$

и $Q_{\text{мс.пред}} = -18 - 10 \lg R_{\text{ср}} + q$.

Отсюда определяем требуемое значение индекса звукового выигрыша по диффузному полю:

$$q_{\text{тр.}} = Q_{\text{мс}} + 18 + 10 \lg R_{\text{ср.}} = -16 + 18 + 10 \lg 2,03 = 5 \text{ дБ.} \quad (46)$$

Принимая во внимание, что лектор говорит в сторону микрофона, целесообразно использовать микрофон с кардиоидной характеристикой направленности (т.н. односторонненаправленный микрофон).

Индекс выигрыша по диффузному полю укладывается в рабочий диапазон кардиоидного микрофона:

$$q_{\text{тр.}} = 5 \text{ дБ}; \quad q_{\text{тр.}}^{\text{н}} = 4,8 \div 13 \text{ дБ.} \quad (47)$$

Тип микрофона выбирается по совместимости с частотным диапазоном, который для звуковых колонок 2КЗ-2 составляет 160-7000 Гц, с наименьшей неравномерностью АЧХ и хорошей чувствительностью, например, микрофон МК-19.

17. Выбор аппаратуры звукоусилительного комплекса аудитории.

Для полученного ранее значения мощности одной звуковой колонки 2Вт и выбора штатной звуковой колонки 2КЗ-2 с номинальной мощностью 2Вт общая электрическая мощность системы звукоусиления аудитории составит:

$$P_3 = 6 \cdot 2 = 12 \text{ Вт} \quad (48)$$

Выбираем штатную звуковую аппаратуру звукоусиления – «ЗВУК» 1х25, которая обеспечивает двукратный запас по мощности, что позволяет обеспечить ее безперегрузочную эксплуатацию. Следует отметить тот факт, что использование одной или двух цепочек потолочных громкоговорителей обеспечивает несколько лучшую разборчивость речи, так как расстояния от них до слушателей небольшие, особенно для последних рядов. Это приведет к уменьшению акустического отношения и повышению разборчивости речи, особенно в последних рядах партера.

III. ПРИЛОЖЕНИЯ

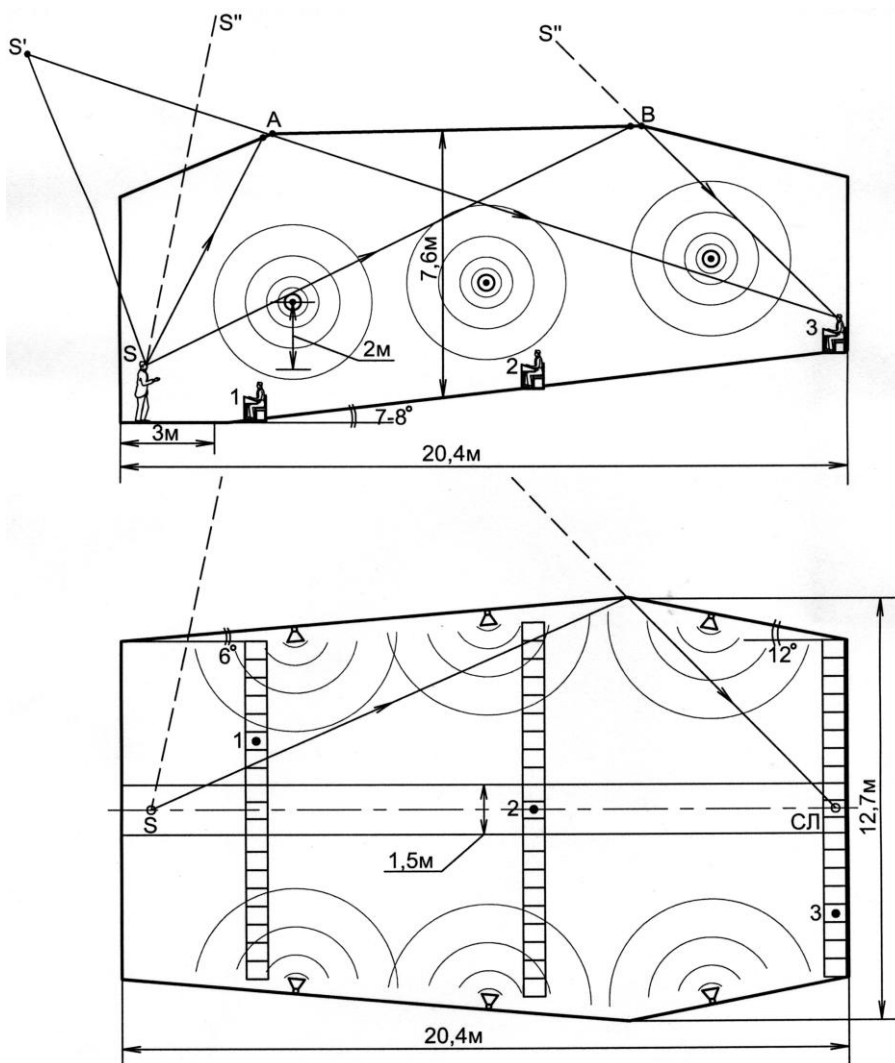


Рис. 1. Разрез и план аудитории М: 1:150.

1 – первый ряд; 2 – N -ый ряд; 3 – последний ряд.

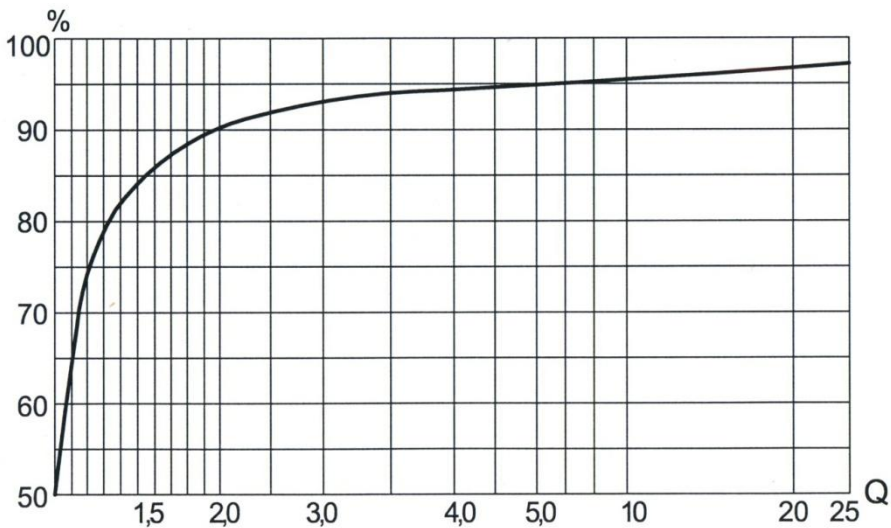


Рис. 2. Зависимость слоговой разборчивости речи от фактора Q.

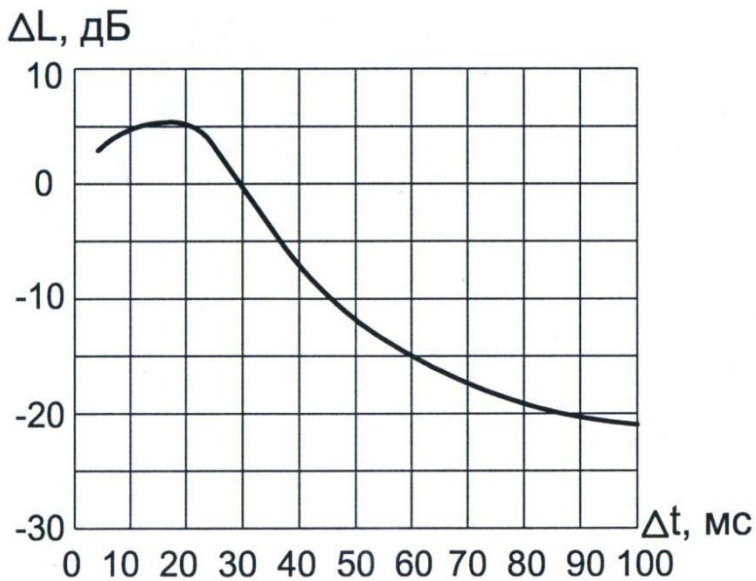


Рис. 3. Порог заметности эха.

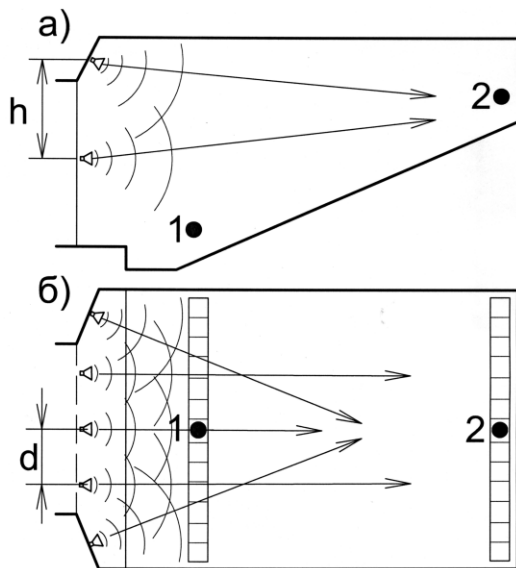


Рис. 4. Сосредоточенная (припортальная) система расположения громкоговорителей. а) – продольный разрез; б) – план; d – шаг размещения, м; h – высота подвеса, м. 1 – начало зала, 2 – конец зала.

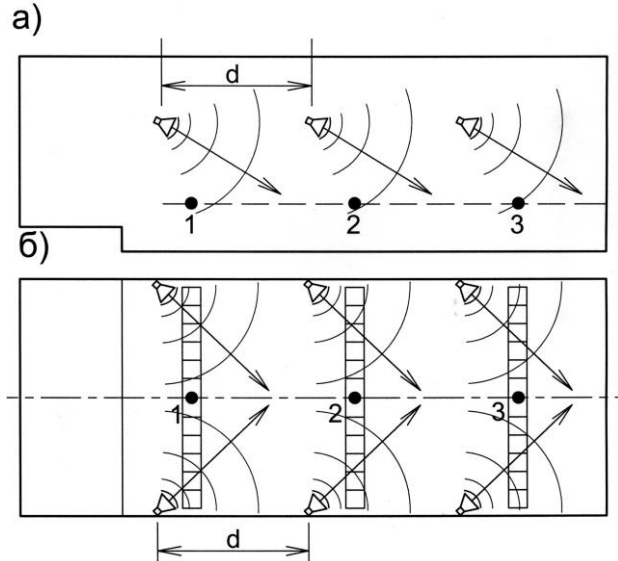


Рис. 5. Распределенная система настенного расположения громкоговорителей в длинном зале. а) – продольный разрез; б) – план; d – шаг размещения, м. 1 – начало зала, 2 – середина зала, 3 – конец зала.

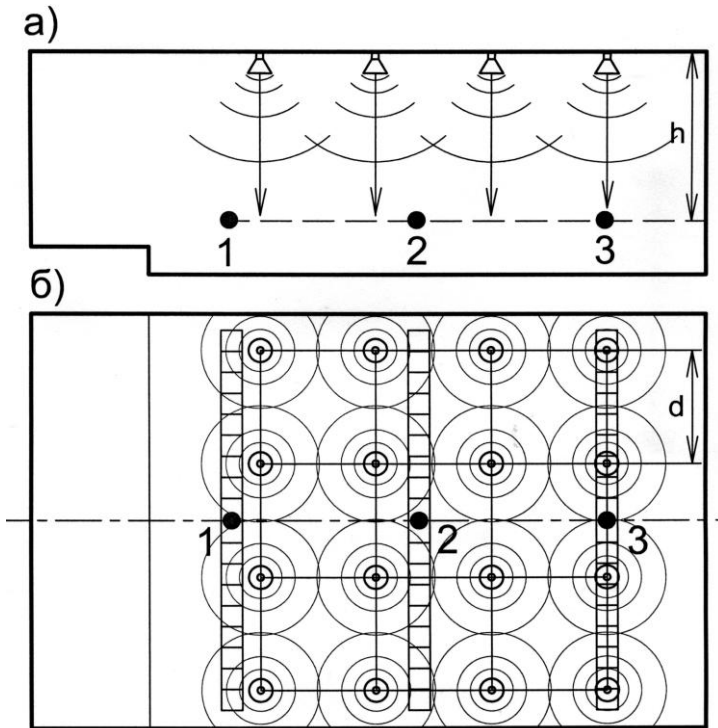


Рис. 6. Распределенная система расположения громкоговорителей в широком зале с низким потолком. а) – продольный разрез; б) – план; d – шаг цепочек, м; h – высота подвеса, м. 1 – начало зала, 2 – середина зала, 3 – конец зала.

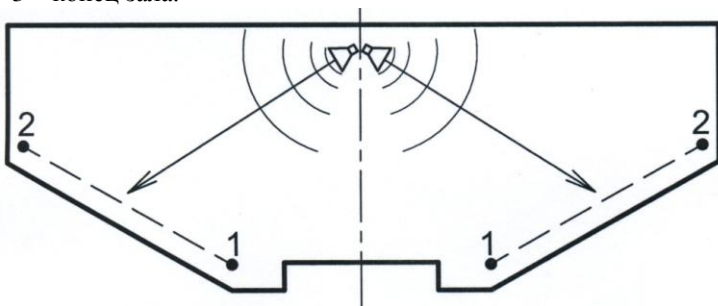


Рис. 7. Расположение в виде звуковой люстры (продольный разрез). 1 – первый ряд, 2 – последний ряд.

Приложение 1.

Ориентировочная оценка акустической мощности громкоговорителей для залов с совмещенными речевыми и музыкальными программами.

Предположим, что все громкоговорители направленного действия равномерно излучают звуковую энергию по всей поверхности зрительских мест (включая балконы и ложи), которую приближенно можно оценить по формуле:

$$S_{\text{зрит.}} = 2,5 \cdot V^{2/3}, \text{ м}^2, \text{ где } V - \text{объем зала, м}^3.$$

Примем, что среднее значение уровня звукового давления для залов с совмещенными звуковыми программами равно 90 дБ.

Для получения звукового давления в 90дБ необходимо с помощью электроакустических средств создать $10^{-12} \cdot 10^9 = 10^{-3}$ Вт/м² неискаженной звуковой мощности на каждый квадратный метр зрительской поверхности ($90 = 10 \lg(I/I_0)$, откуда $I = I_0 \cdot 10^9$), где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² – предел слышимости звука.

Для всей площади зрительских мест акустическая мощность совмещенных (речевых и музыкальных) программ будет равна:

$$P_{\text{ак}} = 10^{-3} \cdot S_{\text{зрит.}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2/3}, \text{ Вт.} \quad ()$$

Электрическую мощность, необходимую для озвучения зрительских мест, найдем по определению:

$$P_{\text{эл}} = (P_{\text{ак}}/\eta) \cdot 100\%, \text{ где } \eta - \text{коэффициент полезного действия} \quad ()$$

громкоговорителей (3 – 5%).

Окончательно, необходимая электрическая мощность равна:

$$P_{\text{эл}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2/3}}{\eta} \cdot 100\%, \text{ Вт, где } V - \text{объем зала, м}^3.$$

График зависимости электрической мощности громкоговорителей, необходимой для озвучения зрительских мест, от объема помещения представлен на рисунке 8.

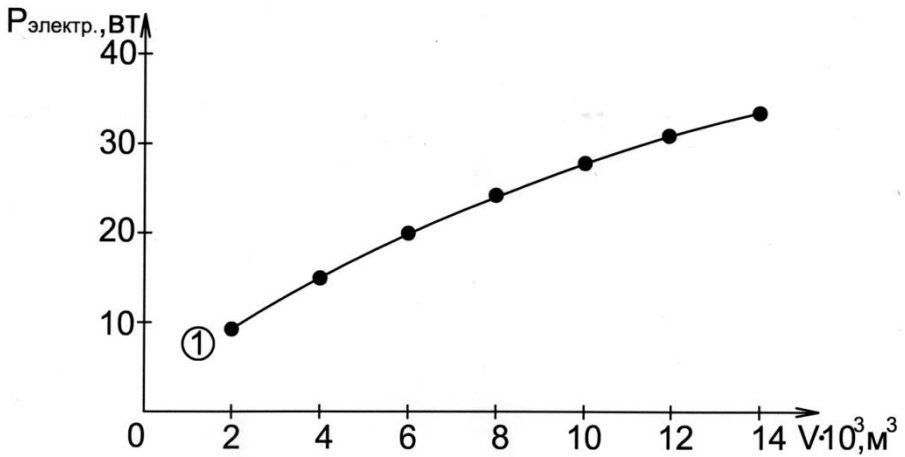


Рис. 8. Зависимость электрической мощности громкоговорителей, необходимой для звукоусиления в помещении от объема ($\eta = 4\%$).

1. $I = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$;

$$P_{\text{эл}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2/3}}{\eta} \cdot 100\%.$$

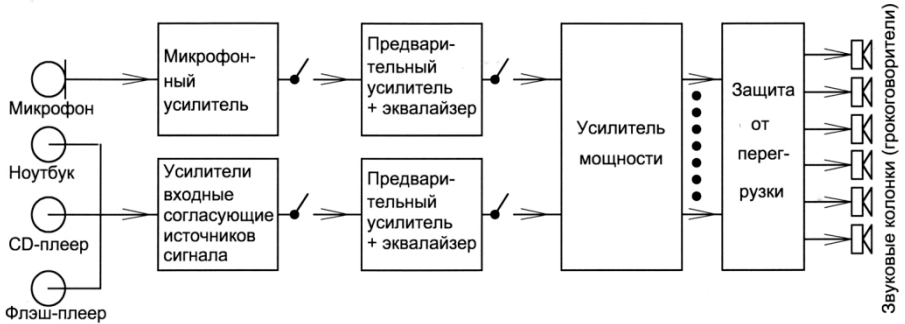


Рис. 9. Упрощенная блок-схема тракта электроакустического звукоусиления.

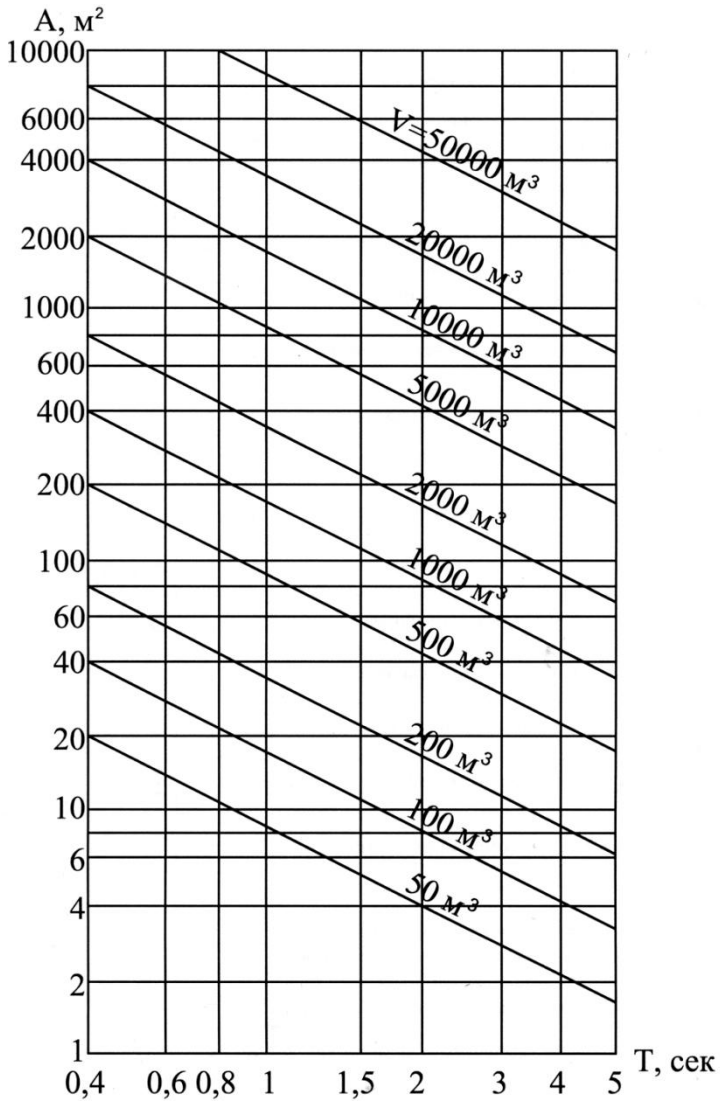


Рис. 10. Зависимость времени реверберации от объема помещения V (m^3) и эквивалентного звукопоглощения A (m^2).

Таблица 1.

Коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов и конструкций

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Стена оштукатуренная, окрашена клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Бетон окрашенный	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Штукатурка по сетке рабица с воздушным зазором	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Панель деревянная, 5-10мм с зазором 50-100мм	0,9	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Переплеты оконные застекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Линолеум	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Проем сцены с декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Плиты «Акмигран» вплотную	0,05	0,15	0,5	0,65	0,67	0,7
Плиты «Москва» с зазором 100мм	0,2	0,6	0,8	0,6	0,5	0,35
Штукатурка гипсовая 20мм с зазором 50-150мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
Плиты гипсовые перфорированные с пористым наполнителем	0,05	0,2	0,4	0,75	0,55	0,35
Плиты декорированные с пористым наполнителем	0,05	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2
Плиты «Силакпор» вплотную	0,2	0,5	0,65	0,6	0,6	0,6
Плиты «Силакпор» с зазором 100 мм	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6

Таблица 2.

Параметры характеристик направленности звуковых колонок

Тип звуковой колонки	e_r	e_b	Коэффициенты осевой концентрации Ω_r на частотах, Гц					
			250	500	1000	2000	4000	6000
2КЗ-6	0,50	0,920	2,0	2,5	3,5	4,2	5,2	5,7
2КЗ-2	0,50	0,950	2,5	4,0	5,0	5,6	6,5	6,8
8КЗ-2	0,71	0,971	4,3	6,6	9,0	10,0	10,0	11,0
8КЗ-4	0,65	0,921	2,5	4,0	5,0	5,6	6,5	6,8
10КЗ-2	0,90	0,971	6,8	10,5	14,3	15,8	16,6	16,9
25КЗ-2	0,90	0,974	9,9	11,2	16,7	16,8	16,8	16,8
50КЗ-2	0,90	0,981	10,9	12,2	16,8	17,0	17,0	17,0
50КЗ-2Т	0,90	0,973	9,8	11,0	16,5	16,7	16,7	16,7
100КЗ-2	0,90	0,985	10,1	12,7	17,0	17,0	17,0	17,0
15КЗ-4	0,87	0,968	6,0	9,0	10,6	11,5	12,0	12,0
25КЗ-12	0,89	0,965	7,6	9,8	11,0	12,5	13,7	14,0
15КЗ-6	0,89	0,965	7,6	9,8	11,0	12,5	13,7	14,0
15КЗ-8	0,95	0,980	16,0	19,0	20,1	20,1	20,1	20,1
25КЗ-6	0,90	0,985	9,6	11,8	15,7	16,5	16,7	17,0
50КЗ-6	0,94	0,985	18,0	20,0	21,2	21,2	21,2	21,2
50КЗ-5	0,91	0,984	14,3	15,7	16,9	16,9	16,9	16,9
100КЗ-13	0,91	0,984	14,3	15,7	16,9	16,9	16,9	16,9

Таблица 3.

Оптимальные значения параметров звукового поля, дБ.

Назначение установки	Номинальный уровень	Неравномерность озвучения	Максимальное акустическое отношение
Воспроизведение музыки и театральных эффектов	100	6	8 - 10
Воспроизведение музыкальных программ; подусиление солистов	94 – 96	6	8 – 10
Воспроизведение музыки (танцы), музыки и речи в шумных помещениях	94 – 96	8	4 – 6
Усиление речи при низких уровнях шумов	80 – 86	6	4 – 6
Создание музыкального фона	60 – 70	8	8 - 10

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалгин Ю.А., Борисенко А.В., Гензель Г.С. Акустические основы стереофонии. М., Связь, 1978. – 336с.
2. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустической аппаратуры. М., Искусство, 1982. – 416с.
3. Ковригин С.Д., Крышов С.И. Архитектурно-строительная акустика. М., Высшая школа, 1986. – 256с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова нижняя граница для объема речевого зала, в котором требуется звукоусиление?
2. Основные составные части электроакустических систем звуковоспроизведения.
3. Преимущества и недостатки сосредоточенной и распределенной систем звуковоспроизведения.
4. Влияние амбиофонической системы звуковоспроизведения на акустическое качество помещения.
5. Оптимальные пределы изменения времени реверберации для речи, камерной и симфонической музыки.
6. Каковы комфортные расстояния прослушивания прямого звука от солистов и оркестра?
7. Рекомендуемые времена запаздывания и линейные размеры помещений для речевых и музыкальных программ.
8. Максимальный комфортный уровень звука при звукоусилении музыкальных программ.
9. Максимальный комфортный уровень звука при звукоусилении речевых программ.
10. Разница между максимальным и минимальным уровнями звука, обеспечивающая качественное восприятие речи и музыки.
11. Способы подавления эхообразования в системах звукоусиления и озвучения помещений.
12. Рациональная высота подвеса звуковых колонок для озвучения и звукоусиления (при заглушенной задней стене).
13. В каких проектах звукоусиления речи и музыки целесообразно использовать «акустические люстры»?
14. Какая система озвучения используется для локальной подзвучки ниш, балконов, лож и узких пространственных арок?
15. Какая система озвучения используется в залах с малой высотой и значительной длиной?
16. В чем недостаток кресельной системы озвучения?

17. Что представляют собой комбинированные системы озвучения и звукоусиления?
18. Какие архитектурно-акустические мероприятия приводят к ослаблению обратной акустической связи?
19. Как рассчитывается акустическая и электрическая мощность громкоговорителей?
20. От каких параметров зависит неравномерность озвучения по ширине и длине помещения?
21. Как связаны между собой фактор Q разборчивости речи, геометрические и акустические параметры помещения?
22. Последовательность выполнения проверки на отсутствие эха в помещении.
23. Способ выбора типа микрофона для системы звукоусиления в помещении.
24. Почему аппаратура звукоусилительного комплекса для помещения должна иметь запас по мощности?

Учебное издание

Чебанов Анатолий Дмитриевич, ст. преп.

Обеспечение акустического качества помещения с помощью распределенной системы звукоусиления

Учебно-методические указания

Под редакцией д.арх., проф. Николая Ивановича Щепеткова
и к.т.н., проф. Андрея Александровича Климухина

Издание подготовлено на кафедре
«Архитектурной физики»
(протокол заседания кафедры №10 от 14.05.13)

Подписано в печать 21.05.13
Формат 60x90/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВПО «Московский архитектурный институт
(государственная академия)»
107031, Москва, ул. Рождественка, д.11/4, к.1, стр.4,
Тел.: (495) 625-50-82, (495) 624-79-90.
e-mail: office@markhi.ru
URL: <http://www.marhi.ru>
Кафедра АФ – тел. (495) 625-18-61