

Что такое РЕВЕРБЕРАЦИЯ

Инж. А. М. Косцов

Развитие радиовещания и звукового кино дало толчок к многочисленным исследованиям в области пространственной акустики, давшим целый ряд методов и материалов для обеспечения в аудиториях соответствующих акустических условий.

Практический ежедневный опыт дает почувствовать зависимость акустических качеств помещений от количества заполняющих его звукопоглощающих материалов.

Жилая комната с обстановкой лишена той гулкости, которая характеризует пустое, необставленное помещение.

С тех пор, как люди стали пользоваться для собраний закрытыми помещениями, это явление учитывается, но только за последнее время многочисленные работы в области пространственной акустики дали возможность подойти к акустике помещений не только с качественной, но и с расчетной стороны.

При постройке современных зданий вопросы акустики строящихся помещений играют первостепенную роль. Однако, в истории известны многочисленные примеры, когда акустические недостатки портили здания, безупречные в архитектурном и во всех прочих отношениях. Ярким примером, известным в литературе, может служить большой читальный зал в Лос-Анжелосе. Громкий возглас, произнесенный в этом пустом меблированном помещении, оставался слышимым в течение 25 секунд. Этот результат можно было бы предсказать до постройки, проделав десятиминутные вычисления.

Указанный акустический недостаток зала не позволяет, конечно, проводить в нем какую либо беседу или лекцию. Любой шум, произведенный внутри или вблизи этого зала, кажется увеличенным по крайней мере в десять раз.

Приведенный пример наряду с другими, о которых читатель слышал или наблюдал сам, достаточен для того, чтобы показать, что излишняя гулкость помещения является одним из наиболее вредных и неприятных акустических недостатков любой аудитории.

Особое значение имеют описанные явления при проектировании современных кинотеатров и студий для радиовещания и звукозаписи.

РЕВЕРБЕРАЦИЯ

Сила звука в помещении не устанавливается мгновенно в момент возникновения звука. После каждого нового отражения звука от внутренних поверхностей помещения общая звуковая энергия в нем нарастает.

Теперь, если мы выключим источник звуковой энергии, который до этого времени работал в исследуемом помещении, то мы, стоя в этом помещении, будем еще некоторое время слышать постепенно замирающий звук до тех пор, пока его сила (интенсивность) не достигнет определенной величины, лежащей вблизи слухового порога. Тогда мы можем сказать, что звучание практически прекратилось.

Это свободное затухание звуковой энергии в закрытом помещении и названо реверберацией, а соответствующий промежуток времени затухания — длительностью реверберации.

На рис. 1 изображено нарастание силы звука в помещении при включенном источнике звука, начиная от момента включения его и до момента, когда практически наступает акустическое равновесие в помещении (первая кривая). По оси ординат отложена сила звука I в помещении, которая наступает по истечении времени t , а по оси абсцисс отло-

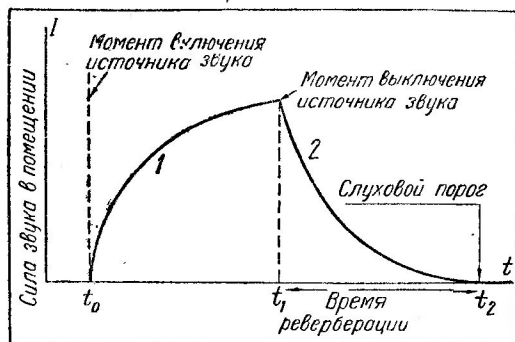


Рис. 1. Кривые изменения силы звучания в помещении при включении и выключении источника звука

жено текущее время t . В некоторый момент t_1 источник звука выключается, или, как говорят, производится „отсечка звука“. Сила остаточного звука в помещении постепенно уменьшается по экспоненциальному закону и, в некоторый момент t_2 достигает уровня порога слышимости (вторая кривая). Для остаточного процесса, изображенного на рис. 1, временем реверберации является время $t_2 - t_1$. Установлено, что время реверберации будет зависеть: 1) от количества отражений оставшегося звука в помещении в секунду, 2) от количества звуковой энергии, поглощаемой при каждом отражении.

Если помещение большое, то в одну секунду произойдет небольшое количество отражений и, если, кроме того, при каждом отражении поглотится небольшое количество звуковой энергии, то для того, чтобы сила звука уменьшилась в результате поглощения до порога слышимости потребуются относительно долгое время. Такое помещение будет слишком реверberирующим.

Наоборот, если помещение маленькое и стены его имеют большой коэффициент поглощения, оно будет иметь малую реверберацию.

Исходя из этого, можно приблизительно подсчитать реверберацию помещения. Пусть, например, в помещении последовательные отражения происходят 20 раз в секунду.

Полагаем, что первоначальный звук в помещении обладает интенсивностью в 1 000 000 единиц интенсивности, т. е. в 10^6 раз больше порога слышимости (громкость нормальной речи) и что при каждом последующем отражении отражается 98% падающей звуковой энергии. Тогда после первого отражения в помещении останется 0,98 от первоначальной звуковой энергии. После второго отражения останется $0,98 \cdot 0,98 = 0,98^2$, после третьего $0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 0,98^3$ и т. д. Сила звука достигнет порогового значения, т. е. 10^{-6} своего начального значения, после n последовательных отражений, т. е.

$$0,98^n = 0,000001,$$

откуда число отражений $n = 684$. Поскольку в каждую секунду в помещении происходит 20 последовательных отражений, то время, необходимое для того, чтобы звук замер в данном помещении до порога слышимости, равно $\frac{684}{20} = 34,2$ sec, т. е. время реверберации данного помещения будет около 34,2 sec.

Полагая, что то же помещение будет заглушено материалом, отражающим только 50% падающей звуковой энергии, можно показать, что в этом случае общее необходимое число отражений уменьшилось бы до 19,9 и время реверберации оказалось бы порядка 1 sec.

Однако, для того, чтобы звук окончательно замер, необходимо, очевидно, чтобы в помещении произошло бесконечно большое число отражений звука. Для этого, конечно, понадобится бесконечно большой промежуток времени.

Таким образом, звук, произнесенный в помещении, теоретически будет звучать в нем в течение бесконечно большого промежутка времени, постепенно уменьшаясь по силе.

Практически же мы перестаем слышать звук через промежуток времени, равный времени реверберации.

СТАНДАРТНАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ

По определению, которое первоначально было установлено, длительность реверберации исчисляется от момента отсечки звука и до порога слышимости, вне зависимости от начальной громкости звука. В связи с этим длительность реверберации (по Сэбину) тем больше, чем громче первоначальный звук (не считается с прочими факторами).

Такое определение из-за своей неконкретности и вследствие настоятельной необходимости в надлежащем контроле реверберации при акустическом проектировании было заменено в практике понятием „стандартная реверберация“.

Термин „стандартная реверберация“ определяет собою промежуток времени свободного затухания звуковой энергии в помещении, за который плотность энергии, а также сила звука внутри помещения уменьшится до 10^{-6} (т. е. до одной миллионной) своей первоначальной величины. Так как плотность звуковой энергии и сила звука пропорциональны квадрату максимального избыточного давления в данной точке пространства, то амплитуда избыточного давления за тот же промежуток времени уменьшается до 10^{-3} (т. е. до одной тысячной) своего первоначального значения.

Остаточный процесс, построенный в логарифмическом масштабе, изображается прямой линией, что следует из закона его изменения (рис. 2). По оси ординат отложены значения интенсивности звука в децибелах, а по оси абсцисс — время. На этом рисунке время T соответствует времени стандартной реверберации. Это время соответствует изменению интенсивности первоначального звука на 60 db или в 10^6 раз).

Сэбин предложил производить расчет реверберации по формуле

$$T = 0,164 \frac{V}{A},$$

где V — объем помещения в m^3 ,

1) Для того, чтобы подсчитать, на сколько децибел уменьшилась интенсивность звука, необходимо найти значение $10 \lg \frac{I}{I_0}$, где I — первоначальное значение интенсивности, а I_0 — конечное, — после уменьшения. В нашем случае $I = 10^6 I_0$, откуда

$$10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{10^6 I_0}{I_0} = 60 \text{ db.}$$

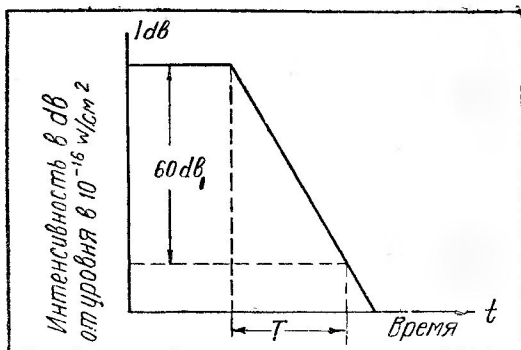


Рис. 2. Остаточный процесс в логарифмическом масштабе для определения стандартной реверберации

A — общее количество единиц поглощения, которое подсчитывается по формуле

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \text{и т. д.},$$

где a_1, a_2, a_3 — коэффициенты звукопоглощения поверхностей помещения.

S_1, S_2, S_3 — соответствующие поверхности в м^2 .

Коэффициенты звукопоглощения наиболее часто встречающихся звукопоглощающих материалов приведены в таблице.

Наименование объектов поглощения	Коэффициент звукопоглощения
Штукатурка	0,034
Кирпичная стена	0,032
Стекло одинарной толщины	0,027
Бетон	0,015
Мрамор	0,010
Войлок	0,55
Ковер	0,25
Шторы	0,23
Рояль	0,6
Кресло, обитое войлоком и кожей	0,28

Из формулы реверберации следует, что время реверберации помещения будет тем больше, чем больше объем этого помещения и чем меньше коэффициент поглощения его границ (поверхностей).

Так как звукопоглощающие свойства акустических материалов зависят от частоты, то и время реверберации будет также меняться с частотой. Кривая изменения времени реверберации данного помещения в зависимости от частоты будет обратной по виду кривой изменения звукопоглощения этого помещения на разных частотах.

Представление о поглощающих свойствах материалов можно получить, сравнивая интенсивность падающего и отраженного лучей звука.

Интересно отметить, что оштукатуренная

стена поглощает всего 0,03 падающей звуковой энергии, т. е. меньше, чем лучшие зеркала для света. Дело в том, что понятия шероховатой и зеркальной поверхности для света и звука не совпадают. Оштукатуренная стена, например, будучи шероховатой, рассеивающей для света, является прекрасным акустическим зеркалом. Мерой гладкости может служить длина волны. Для того, чтобы стена была для звука рассеивающей, надо, чтобы ее неровности были соизмеримы (лучше меньше) с длиной волны.

Остаточные процессы в помещении можно заснять при помощи осциллографа. На рис. 3 показана осциллограмма остаточного процесса в помещении. Как видно из осциллограммы, сила звука после выключения источника уменьшается не сразу, а постепенно, в соответствии с акустическими свойствами помещения.

Под осциллограммой остаточного процесса записаны колебания камертона, имеющего 50 колебаний в секунду. Это служит для отсчета времени. Каждый период нижней кривой длится 0,02 sec.

Следует, однако, заметить, что в обычном помещении, в котором не принято соответствующих мер акустической коррекции, остаточный процесс в редких случаях следует по экспоненциальному закону. Это объясняется неравномерным распределением поглощающего материала в помещении, неправильной формой помещения (наличие ниш и пр.), наличием фокусирующих звук поверхностей и т. д. Для получения „правильного“ остаточного процесса в помещениях, предназначенных для специальных целей, например, студий для радиовещания и звукозаписи, принимают определенные меры для создания соответствующих акустических условий. Для этого студии равномерно заглушают материей или специальными звукопоглощающими материалами, покрывают пол коврами, устраивают отражающие поверхности и т. д. В результате принятых мер в студии остаточный процесс будет иметь более плавный спад и нужную длительность (рис. 4.)

ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение реверберации занимает видное место среди электроакустических измерений. В первом приближении все существующие

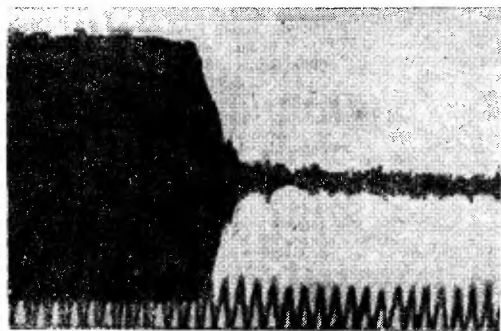


Рис. 3. Осциллограмма остаточного процесса в помещении

методы измерения реверберации можно подразделить на две группы: 1) группа методов субъективного, слухового измерения реверберации и 2) группа методов объективного измерения.

Как известно, человеческое ухо не обладает способностью определения абсолютного уровня произвольной интенсивности звука. Такое определение с помощью слухового аппарата можно сделать, только сравнивая неизвестную интенсивность с некоторой величиной того же порядка, но заранее известной. Однако, на слух возможно установить тот момент, когда

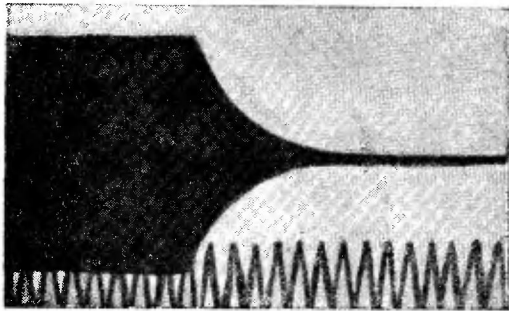


Рис. 4. Осциллограмма остаточного процесса в студии

монотонно убывающий звук перестает быть слышимым благодаря тому, что его интенсивность переходит определенную критическую величину, ниже которой ухо перестает его слышать. Точность определения этого критического момента определяет собою точность субъективных методов измерения. В простейшем случае при измерении устанавливается громкость первоначального звучания в помещении, равная 60 db, и затем источник звука выключается. Время, отмеченное по хронометру от момента выключения источника звука до момента практического исчезновения звука (на слух), и будет временем стандартной реверберации. Обычно измерение производят на частоте 1000 c/sec.

Более точное определение времени стандартной реверберации может быть произведено объективными методами измерения.

Одним из наиболее надежных методов объективного измерения реверберации, несмотря на его сложность, следует признать метод осциллографирования. Получение осциллограмм имеет еще то преимущество, что исследуемый процесс полностью „виден“ на снимке. Это очень важно, так как точное измерение реверберации существующими методами возможно только в том случае, если процесс „правильный“, т. е. происходит по экспоненциальному закону. Заснятую осциллограмму остаточного процесса строят на бумаге в логарифмическом масштабе (аналогично рис. 2) и измеряют время, соответствующее изменению амплитуды до 10^{-3} своего первоначального значения, т. е. на 30 db. Это соответствует уменьшению силы звука в помещении на 60 db, т. е. до 10^{-6} своей первоначальной величины. Измеренное время и будет длительностью стандартной реверберации.

ОПТИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Если сравнить звучание речи и музыки в помещениях при различных значениях реверберации, то можно заметить, что „переглушение“ помещения большим количеством звукопоглощающего материала делает звук безжизненным. Получившаяся малая величина реверберации лишает передачу „воздуха“ и требует от исполнителей повышенной громкости исполнения. Наоборот, слишком большая реверберация служит причиной „наплыва“ одного слога на другой, что понижает разборчивость речи. Наблюдающаяся при этом гулкость неприятно действует на слушателей.

Многочисленными опытами установлено, что существует некоторая наилучшая (оптимальная) величина реверберации, при которой звучание кажется наиболее естественным.

Оптимальное значение времени реверберации в какой-то мере зависит от объема исследуемого помещения. Однако, в настоящее время вопрос зависимости оптимальной реверберации, как функции объема и частоты,

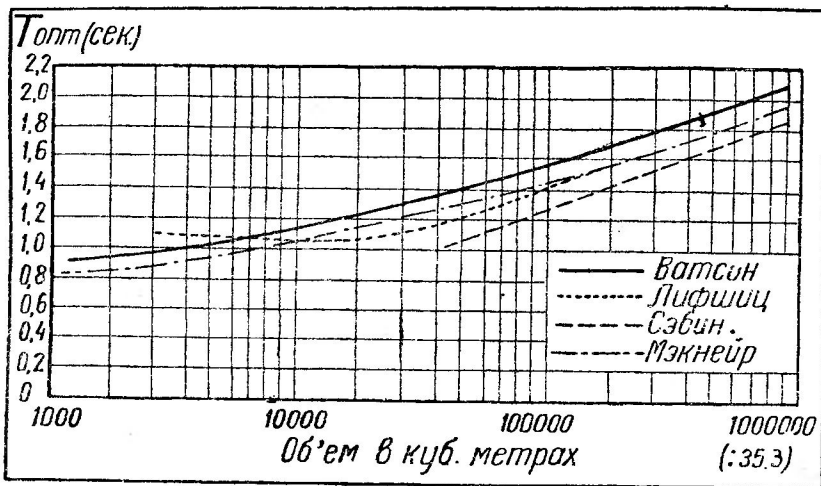


Рис. 5. Оптимальное время реверберации в зависимости от объема помещения для частоты 512 c/sec

не имеет окончательного решения и является, очевидно, предметом дальнейших исследований.

Поэтому существует несколько точек зрения на зависимость между оптимальным значением времени реверберации, объемом помещения и частотой. Рис. 5 показывает зависимость между оптимальным временем реверберации и объемом помещения по Ватсону, Лифшицу, Сэбину и Мэкнейру. По оси ординат отложено оптимальное время реверберации в секундах, а по оси абсцисс — объем помещения (для выражения объема в куб. метрах числа, отложенные по оси абсцисс, следует делить на 35,3).

Как видно из рис. 5, время оптимальной реверберации имеет тенденцию к увеличению с увеличением объема помещения.

Приведенные кривые относятся к аудиториям и помещениям, в которых непосредственно и ведется прослушивание. О значении оптимальной реверберации для студий будет сказано ниже.

СТУДИИ ДЛЯ РАДИОВЕЩАНИЯ И ЗВУКОЗАПИСИ

Благодаря бинауральному характеру слуха, наблюдатель, слушающий двумя ушами, способен сосредоточить свое внимание на прямом луче звука, идущем от источника звука, отвлекаясь от влияния рассеянной звуковой энергии или посторонних шумов в помещении.

Если слушатель закрывает одно ухо, то он потеряет эту способность слуховой ориентировки и сосредоточения. При этом действие реверберации и шумов делается более неприятным и разборчивость передачи уменьшается.

Так как студии для радиовещания и звукозаписи используются при передаче через микрофон, что равносильно моноуральному восприятию, то акустика студий и киноателье отличается от акустики театров, аудиторий и других помещений, предназначенных для непосредственного слушания.

Вследствие вышевыказанных соображений для нормального восприятия передачи из студии возникает необходимость уменьшения реверберации студии и постороннего шума в ней по сравнению с таким же помещением, предназначенным для непосредственного прослушивания.

Оптимальное значение времени реверберации для двух помещений одинакового объема, из которых одно предназначено для передачи с микрофоном, а другое для непосредственного слушания, будет различным.

Обычно считают, что для радиовещательных студий, студий звукозаписи и киноателье оптимальное значение времени реверберации должно составлять $\frac{2}{3}$ от той величины, которая является оптимальной для данного помещения в условиях бинаурального слушания. Что касается посторонних шумов, то студии строятся с таким расчетом, чтобы уровень шума в них не превышал бы 10 db.

Отсюда ясно, что звукоизоляция студий от всех внешних шумов является вопросом

первостепенной важности. Обычно это достигается рациональным размещением студии в плане общего здания. Кроме того, в современных студиях обычно отсутствуют окна, являющиеся главным проводником внешних шумов. Для звукоизоляции студий используются такие звукоизолирующие материалы, которые одновременно могут служить и внутренней отделкой студии, например, ковры, драпировки и некоторые специальные виды материалов.

Хорошим средством для уменьшения мешающих шумов и реверберации студии является применение направленных микрофонов.

В практических условиях возникает необходимость изменить в некоторых пределах реверберацию студии, так как обычно радиовещательная студия предназначена для разного рода исполнения, причем каждый род и полнения требует своего оптимального реверберации. В простейшем случае сены студии завешиваются драпировками из материи, которые в случае необходимости могут раздвигаться.

Однако, более современный метод изменения поглощения применен в студии московского Дома звукозаписи. Часть стен оборудована рядом поворотных пустотелых колонн, снабженных на одной половине своей поверхности перфорацией. При проектировании этого рода поглочителей было использовано то обстоятельство, что ряд малых отверстий обладает способностью поглощать звук. Регулирование реверберации достигается поворотом соответствующего числа колонн.

Реверберация в студии будет наименьшей в том случае, если все поворотные колонны будут обращены перфорацией внутрь. Вращение колонн осуществляется дистанционным способом посредством электродвигателей, что обеспечивает удобный и гибкий способ акустической регулировки реверберации.

В целях изменения величины реверберации иногда употребляются также поворотные панели с разными звукопоглощающими поверхностями. Действие их аналогично с вышеописанными перфорированными колоннами московского Дома звукозаписи.

Можно также применять систему щитов, части которых закрывать (и открывать) часть поглощающего материала.

В некоторых случаях практикуется также неодинаковое поглощение в двух концах студии: один из концов студии делается „мертвым“, т. е. сильно заглушается, а другой „живым“ с таким расчетом, чтобы все поглощение было сосредоточено в первой части студии. Исполнители располагаются у разглушенной стены студии.

В этом случае исполнители имеют „нормальные“ условия исполнения (т. е. большую реверберацию), в связи с чем пение и игра на музыкальных инструментах облегчается.

В то же время реверберация, воспринимаемая микрофоном, может быть уменьшена до желаемой величины.

Иногда может встретиться необходимость изменения реверберации в процессе исполнения данного музыкального произведения

для создания соответствующего акустического эффекта. Например, для создания впечатления мощи и силы на громких пассажах, вообще говоря, может потребоваться большая реверберация. Наоборот, малая реверберация будет целесообразна для обеспечения четкости быстрых пассажей с частым последованием отдельных звуков.

Для быстрого изменения реверберации акустические способы малопригодны вследствие своей относительно громоздкости. В этом случае можно применять электрический спо-

соб изменения величины реверберации студии при помощи „комнаты эхо“. Для этого в отдельной комнате с большой реверберацией устанавливается репродуктор, на который подается передача, идущая на радиостанцию. Работа репродуктора вместе с большой реверберацией помещения воспринимается микрофоном, находящимся в этой же комнате, и в дальнейшем после соответствующего усиления подмешивается к основной передаче, что приводит к ощущению увеличения реверберации в студии.