

ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

А.К. Андрющенко

*ООО «Институт акустических конструкций»,
СПб БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург
E-mail: Ivasishinaa@gmail.com*

Показатель времени реверберации широко применяется для оценки акустических параметров помещений зрительных залов, малых непромышленных помещений и помещений с открытой планировкой. Для этого применяются ряд национальных стандартов, таких как ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013, 3382-3-2013, ГОСТ Р ИСО 3382-3-2013 и проч. В докладе рассматриваются основные вопросы применения показателя времени реверберации в оценке акустических характеристик производственных помещений неправильной формы и большой размерности, существующая нормативная база в данной области, ограничения и перспективы изучения данной характеристики.

Ключевые слова: время реверберации, акустические параметры помещения, коэффициент звукопоглощения, производственные помещения.

ВВЕДЕНИЕ

Время реверберации помещения считается одним из основных показателей его акустических свойств. Наряду с этим существует понимание о необходимости более полной оценки акустического качества помещений при помощи таких величин, как относительные уровни звукового давления, отношения энергии раннего и позднего отклика, вторичные (боковые) энергетические составляющие, интерауральные взаимные корреляционные функции (корреляционные функции сигналов правого и левого уха) и уровни фонового шума. Основными помещениями, для которых время реверберации применяется как определяющий показатель, являются зрительные залы, для которых существует ряд действующих нормативных документов. Для производственных же помещений существует лишь общий документ, включающий в себя также все прочие помещения, что вызывает возникновение ряда спорных вопросов.

1. ПОКАЗАТЕЛЬ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ

В соответствии с определением из серии нормативных документов ГОСТ Р ИСО 3382, **время реверберации** (reverberation time) T , с - время, необходимое для спада средней по пространству плотности звуковой энергии в ограниченном объеме на 60 дБ от первоначального уровня после выключения источника звука. Время реверберации можно оценить на меньшем, чем 60 дБ, интервале с последующей экстраполяцией на весь интервал изменения кривой спада. При этом используют специальные обозначения. Так при определении времени реверберации по кривой спада на интервале от 5 до 25 дБ его обозначают T_{20} . Если для определения времени реверберации используют интервал значений кривой спада от 5 до 35 дБ, то его обозначают T_{30} [1]. Реверберация наблюдается всюду, где возможны многократные отражения звука.

Воздушный объем помещения представляет собой колебательную систему с очень большим числом собственных частот. Каждое из собственных колебаний характеризуется своим коэффициентом затухания, зависящим от поглощения звука при его отражении от ограничивающих поверхностей и при его распространении. Поэтому возбужденные источником собственные колебания различных частот затухают неодновременно. Реверберация оказывает значительное влияние на слышимость речи и

прочих звуков в помещении, т.к. слушатели воспринимают прямой звук на фоне ранее возбуждённых колебаний воздушного объёма, спектры которых изменяются во времени в результате постепенного затухания составляющих собственных колебаний. Влияние реверберации тем более значительно, чем медленнее они затухают. В помещениях, размеры которых велики по сравнению с длинами волн, спектр собственных колебаний можно считать непрерывным и представлять реверберацию как результат сложения прямого звука и ряда запаздывающих и убывающих по амплитуде его повторений, обусловленных отражением от ограничивающих поверхностей.

Любой звуковой сигнал создает в замкнутом помещении звуковое поле. Это происходит в результате многократных отражений звуковых волн распространяющихся внутри помещения от граничных поверхностей (потолка, пола и стен).

Если в помещении воспроизвести одиночный звуковой сигнал (включить, а затем выключить источник звука), то звуковое поле от этого сигнала «останется» в помещении, даже после того как источник звука будет выключен. Со временем, такое звуковое поле будет постепенно «затухать», в основном, за счет поглощения звуковой энергии материалами, использованными для отделки граничных поверхностей. Скорость угасания звуковой энергии будет определяться звукопоглощающими характеристиками отделочных материалов и объемом помещения. Упрощенно, время реверберации это время, за которое энергия звукового поля уменьшается в один миллион раз, после выключения источника звука в помещении. Или время, за которое уровень звукового давления в помещении уменьшается на 60 дБ по сравнению со своей исходной величиной.

Значение времени реверберации, определяется, прежде всего, звукопоглощающими свойствами отделочных материалов, и может составлять для разных помещений от долей секунды до нескольких секунд. Время реверберации является важным параметром, характеризующим акустические свойства помещения. Например, помещения, имеющие высокие значения для времени реверберации обладают повышенной «гулкостью» и менее комфортны. Рекомендуемые значения времени реверберации для помещений и залов различного назначения приведены в СП 51.13330.2011 (Свод правил, «Защита от шума», актуализированная редакция СНиП 23-03-2003).

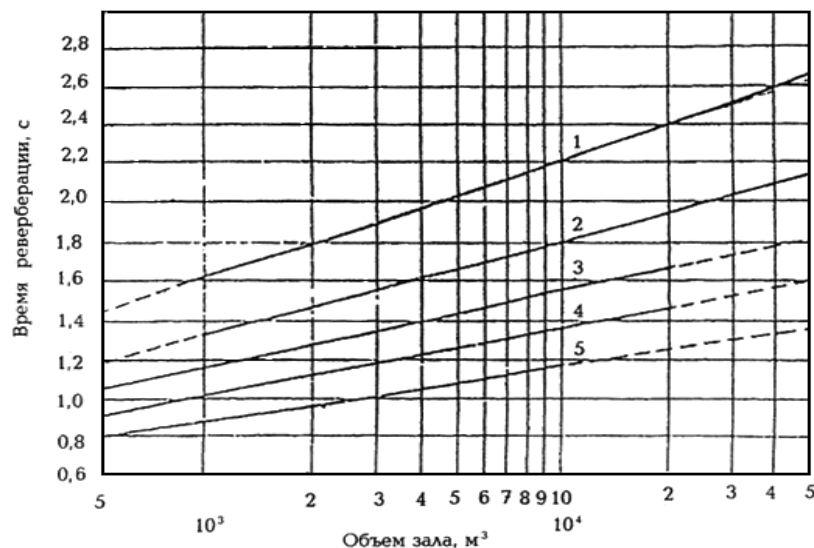


Рис. 1 - Рекомендуемое время реверберации на средних частотах (500-1000 Гц) для залов различного назначения в зависимости от их объема [2]:

1 - залы для ораторий и органной музыки; 2 - залы для симфонической музыки, залы оперных театров; 3 - залы для камерной музыки, залы музыкально-драматических

театров; 4 - залы многоцелевого назначения, залы драматических театров; 5 - лекционные залы, заседаний, концертные залы современной эстрадной музыки, пассажирские залы, залы ожиданий, спортивные залы

Для помещений, обладающих недостатками в акустике (вследствие высоких значений времен реверберации), измерение фактического значения времени реверберации дает возможность рассчитать количество и тип отделочных звукопоглощающих материалов, с помощью которых возможно снизить время реверберации до желаемых (заданных) значений.

Уровень звукового давления спадает со временем по линейному закону. Время реверберации, в течение которого уровень звукового давления после выключения источника звука уменьшается на 60 дБ (w уменьшается в 10^6 раз), определяется по формуле:

$$T = - \frac{0,162V}{S_{\text{огр}} \ln(1 - \alpha)} = \frac{0,162V}{4mV - S_{\text{огр}} \ln(1 - \alpha_0)}, \quad (1)$$

где: V – объем помещения; $S_{\text{огр}}$ – площадь ограждающих конструкций помещения; α_0 – коэффициент звукопоглощения; m – интенсивность звукового луча [3].

Формулу (1) называют формулой Эйринга. При малых α можно принять:

$\ln(1-\alpha) \approx -\alpha$, и из (1) вытекает более простая формула Сэбина:

$$T = \frac{0,162V}{A} = \frac{0,162V}{(\alpha S_{\text{огр}})}, \quad (2)$$

где A – эквивалентная площадь звукопоглощения помещения.

Эквивалентная площадь звукопоглощения A , м^2 (equivalent absorption area) - это площадь поверхности с коэффициентом звукопоглощения, равным 1, которая при равномерном распределении звука могла бы поглотить такое же количество звуковой энергии, как вся поверхность помещения и находящиеся в ней предметы. Определяется по формуле:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 \dots = \alpha_{\text{ср}} S, \quad (3)$$

где: α_i – коэффициент звукопоглощения i -ой ограждающей поверхности помещения и отдельных поверхностей помещения (строительных конструкций и облицовок) площадью S_i

S – суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения;

$\alpha_{\text{ср}}$ – средний коэффициент звукопоглощения помещения.

Данные формулы по измеренному T позволяют определить коэффициенты звукопоглощения в помещениях. **Коэффициент звукопоглощения α** (sound absorption coefficient) - доля падающей на поверхность препятствия звуковой энергии, поглощаемая этой поверхностью. Коэффициент звукопоглощения зависит от частоты [4]. Звукопоглощение в помещении – величина, определяющая потери звуковой энергии при падении звука на все поверхности помещения, на находящиеся в помещении предметы и людей, а также потери при распространении в воздухе.

При акустических расчетах звукопоглощение в помещении характеризуется величиной B , называемой постоянной помещения [5].

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

2. НОРМАТИВНАЯ БАЗА В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Есть несколько причин для измерения времени реверберации. Во-первых, уровень звукового давления источников шума, разборчивость речи и условия конфиденциальности в помещении сильно зависят от времени реверберации. Под помещениями можно рассматривать жилые комнаты, лестничные площадки и пролеты, мастерские, производственные цехи, классные комнаты, офисы, рестораны, выставочные центры, спортивные залы, железнодорожные вокзалы и аэропорты. Во-вторых, время реверберации измеряют с целью определения в помещении поправки звукопоглощения, необходимой при различных видах акустических измерений, таких как измерение звукоизоляции по ИСО 140 (все части) и звуковой мощности источников шума по ИСО 3740 и др.

Строительные нормы и правила некоторых стран устанавливают требования ко времени реверберации учебных и других категорий помещений. Однако для большинства типов помещений, в том числе и производственных, установление времени реверберации, соответствующего назначению помещения, и выбор адекватных проектных решений остаются за проектировщиками [6].

Как уже упоминалось выше, наиболее распространенным применением показателя времени реверберации помещений является оценка акустических параметров помещений зрительных залов. Для этих целей используется ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы». В настоящем стандарте рассматриваются методики и средства измерений, необходимое рабочее пространство (зона озвучивания), методы оценки и представления результатов испытаний. Стандарт устанавливает два метода измерения времени реверберации: метод прерываемого шума и метод интегрированной импульсной переходной характеристики. Данные методы используются и для измерений в помещениях остальных типов.

При измерении методом прерываемого шума возбуждение помещения осуществляется при помощи источника звука, которым является громкоговоритель, на который следует подавать широкополосный или псевдослучайный сигнал. При использовании псевдослучайного шума он должен прерываться в случайные моменты времени, но последовательности значений шумового сигнала не должны повторяться. Источник должен создать уровень звукового давления, достаточный для превышения начального уровня кривой спада над фоновым шумом на 35 дБ в соответствующем диапазоне частот. Если измеряют T_{30} , то указанное превышение должно быть не менее 45 дБ. При измерениях в октавных полосах ширина спектра сигнала должна превышать одну октаву. Аналогично при измерениях в 1/3-октавных полосах ширина спектра сигнала должна превышать 1/3 часть октавы. Спектр должен быть достаточно плоским в пределах каждой октавной полосы. Альтернативно может быть сформирован широкополосный шумовой сигнал для создания спектра розового стационарного шума в диапазоне от 88 до 5657 Гц, соответствующего реверберационному звуковому полю в помещении. Такой спектр перекрывает частотный диапазон, определяемый совокупностью 1/3-октавных полос со среднегеометрическими частотами от 100 до 5000 Гц или октавных полос от 125 до 4000 Гц.

Для технического и точного методов продолжительность возбуждения помещения должна быть достаточной для установления в нем стационарного звукового поля перед выключением источника. Следовательно, шум должен излучаться в течение нескольких секунд, но не менее половины времени реверберации. При ориентировочном методе в качестве альтернативы прерываемому шуму может применяться кратковременное возбуждение или импульсный сигнал.

Импульсная переходная характеристика между позициями источника звука и микрофона в помещении является строго определенной величиной и может быть измерена различными способами (например, с использованием в качестве сигнала возбуждения пистолетного выстрела, импульсов искрового разряда, кратковременных импульсов с шумовым заполнением, сигналов с линейной частотной модуляцией или псевдослучайных последовательностей максимальной длины). Возбуждение помещения может быть непосредственно проведено с помощью выстрела из пистолета или другого импульсного источника, не ревербирующего с самим собой (т.е. при отсутствии одновременного приема прямого и отраженного звука в точке измерения) при условии, что ширина его спектра достаточна для выполнения требований. Импульсный источник должен создавать пиковый уровень звукового давления, при котором начальный уровень кривой спада будет не менее чем на 35 дБ превышать уровень фонового шума в соответствующей полосе частот. При измерении T_{30} данное превышение должно быть не менее 45 дБ [1].

Для измерения акустических параметров помещений с открытой планировкой применяется стандарт ГОСТ Р ИСО 3382-3-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 3. Помещения с открытой планировкой». Термин "помещения с открытой планировкой" в контексте настоящего стандарта относится к офисам и аналогичным помещениям, в которых множество людей могут работать, вести переговоры или присутствовать независимо от наличия постоянных рабочих мест. Деятельность людей в помещениях с открытой планировкой воздействует на находящихся вокруг них других людей. Неудовлетворительные акустические условия вынуждают к громкой речи, препятствуют концентрации внимания и снижают производительность труда, особенно в мыслительных задачах. Громкая речь может мешать присутствующим и не позволяет сохранить конфиденциальность разговоров.

Проектирование помещений с открытой планировкой включает в себя тщательное рассмотрение размещения рабочих мест и взаимного расположения рабочих коллективов и групп. Другими факторами, влияющими на акустические характеристики помещения, являются звукопоглощение, высота перегородок, шкафов и акустических экранов, фоновый шум, степень изолированности рабочего места, расстояние между рабочими местами и размеры помещения. Считалось, что время реверберации помещения является важнейшим показателем его акустических свойств. Настоящий стандарт устанавливает метод измерений, позволяющий представить основные характеристики помещений с открытой планировкой в виде одночисловых величин [7].

С точки зрения измерений акустических параметров помещений производственных типов возможно применение стандарта ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 2. Время реверберации обычных помещений». Рассматриваются методика и средства измерений, необходимое число точек измерения и методы оценки величин и представления результатов испытаний. Результаты измерений могут быть использованы для коррекции результатов других акустических измерений, например уровня звукового давления источников шума или звукоизоляции, а также для сопоставления с нормативными значениями времени реверберации в помещениях.

Для многих помещений число присутствующих в них людей может сильно влиять на время реверберации. Измерения времени реверберации следует выполнять в помещении без людей. Однако помещение не более чем с двумя людьми можно считать незаполненным, если не указано иное. Если результат измерения времени реверберации используют для коррекции измерений уровня звукового давления, то число находящихся в помещении людей должно соответствовать методу измерений уровня звукового

давления.

Согласно данному стандарту, минимально необходимое число точек измерения в помещении приведено в таблице 1. В помещениях с более сложной геометрией должно использоваться большее число точек измерения. Точки измерения следует выбирать в местах, где отсутствуют доминирующие воздействия, вызванные, например, отличиями времени реверберации в разных частях помещения.

Таблица 1 - Минимальное число позиций источника и точек измерений

Параметр	Метод измерений		
	Ориентировочный	Технический*	Точный
Число комбинаций источник-микрофон	2	6	12
Число позиций источника**	≥ 1	≥ 2	≥ 3
Число точек измерений***	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Число измерений спада в каждой конфигурации (метод прерываемого шума)	1	2	3

*При использовании результатов измерений для коррекции результатов других измерений уровня звукового давления техническим методом требуется только одна позиция источника и три точки измерения.

**В методе прерываемого шума одновременно могут применяться некоррелированные источники.

***В методе прерываемого шума при использовании результатов измерений лишь в качестве поправки вместо микрофонов, располагаемых в нескольких позициях, может быть применен один микрофон с поворотным устройством.

По мнению автора доклада, недостатком данного стандарта является неявное предписание выбора точек измерений времени реверберации в производственном помещении. К примеру, в производственных цехах объемом более 1000 м³ с большим количеством оборудования на единицу площади, затруднительно определить точки измерения.

Согласно стандарту, позиции источника звука должны выбираться там же, где обычно размещаются естественные источники в данном помещении. В малых, например бытовых помещениях, или там, где обычно источники звука отсутствуют, должна использоваться одна позиция источника в углу помещения. Точки измерения должны отстоять друг от друга на расстояние не менее половины длины волны, т.е. на расстояние около 2 м для обычного диапазона частот. Расстояние от точки измерения до ограждающих поверхностей, включая пол, должно быть не менее четверти длины волны (обычно 1 м). Следует избегать симметричных относительно поверхностей помещения позиций. В случае применения сканирующего микрофона радиус сканирования должен быть не менее 0,7 м. Плоскость сканирования должна составлять угол не менее 10° с любой ограждающей плоскостью помещения (стена, пол, потолок). Период сканирования должен быть не менее 15 с.

Точки измерения не должны располагаться близко друг к другу. В противном случае число независимых конфигураций будет меньше общего числа точек измерения. Минимальные значения, приведенные в таблице 1, соответствуют числу независимых конфигураций [7].

Как правило, в производственных цехах с большим количеством рабочих мест на всю площадь помещения, присутствует большое количество технологического оборудования различного назначения и с различными уровнями звукового давления в рабочем состоянии. Как следствие, время реверберации в различных частях помещения и будет различным. В данной ситуации встает вопрос – каким образом размещать источник шума для измерений. Производственные помещения, как и в помещениях с открытой планировкой, часто состоят из двух и более зон, в которых материалы потолка, пола, оборудования или мебели значительно отличаются по акустическим свойствам. По мнению автора, необходимо выполнять отдельные измерения для каждой зоны и значения одночисловых величин для каждой зоны необходимо рассчитывать отдельно.

В стандарте ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 описывается 3 метода измерений:

1. Ориентировочный метод

Измерение времени реверберации выполняют по меньшей мере при одном положении источника. Находят среднее значение от результатов измерений по меньшей мере при двух комбинациях положений источник - микрофон (см. таблицу 1).

2. Технический метод

Технический метод измерений пригоден для проверки характеристик помещений при сравнении с нормативными значениями времени реверберации или звукопоглощения помещения. Данный метод следует применять при измерениях в соответствии с ISO 140 (all parts), Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements для измерений времени реверберации. Полагают, что стандартная неопределенность измерений в октавных полосах не хуже 5% и не хуже 10% - в 1/3-октавных полосах частот.

Измерение времени реверберации выполняют по меньшей мере при двух позициях источника. При этом следует использовать не менее шести независимых комбинаций положений источник - микрофон (см. таблицу 1).

3. Точный метод

Измерение времени реверберации выполняют по меньшей мере при двух позициях источника. При этом следует использовать не менее 12 независимых комбинаций положений источник - микрофон (см. таблицу 1).

Настоящий стандарт также устанавливает два метода измерения времени реверберации: метод прерываемого шума и метод интегрированной импульсной переходной характеристики, которые используются для измерений ранее упомянутых типов помещений. В стандарте указывается, что для того, чтобы оценить время реверберации, кривые спада должны быть близки к прямой линии. Если кривые волнистые или изогнутые, то это указывает на наложение мод, имеющих разное время реверберации. В этом случае оценка времени реверберации не может быть получена.

Согласно ГОСТУ, результаты измерений, полученные для некоторой области расположения источника звука и микрофона, для получения пространственно усредненных величин могут быть объединены как для определенных подпространств помещения, так и помещения в целом. Такое пространственное усреднение должно выполняться одним из следующих способов:

а) арифметическим усреднением времен реверберации. Пространственное среднее получают как среднее отдельных времен реверберации для всех независимых измерительных конфигураций. Для оценки точности и пространственной изменчивости времени реверберации может быть оценено стандартное отклонение;

б) усреднением ансамбля кривых спада. Кривые спада накладывают, совмещая их начала.

Отсутствие конкретики в вопросе определения зон самих подпространств как составляющих целого помещения с учетом сложности его обустройства и функционирования, является недочетом данного стандарта.

Эти и прочие неясности в вопросах проведения измерений и обработки данных по времени реверберации в производственных помещениях, являются причиной для детального исследования и проработки данного направления, с последующим созданием нормативной базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производственные помещения, как одни из наиболее распространенных объектов для разработки шумозащитных мероприятий, требуют определения акустических их свойств для дальнейших расчетов. Одним из наиболее информативных свойств является время реверберации. Данный показатель во многом определяет разборчивость речи и условия конфиденциальности, дает понимание характера распространения шума в помещении от источников шума в различных его частях, позволяет определить такой параметр, как коэффициент звукопоглощения в помещении и проч.

Был проведен обзор основных нормативных документов в области определения и измерения времени реверберации как показателя акустических параметров помещений различных типов. Определено, что на существующее положение для измерения времени реверберации производственных помещений возможно использование стандарта ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 2. Время реверберации обычных помещений». Данный стандарт содержит не достаточно полную информацию для проведения измерений и получения данных требуемой точности, в частности:

- Отсутствие конкретики в выборе расположения источника шума и точек измерений в производственных помещениях большой размерности с большим количеством зон различных реверберационных характеристик;
- Отсутствие информации о разделении помещений на подпространственные зоны по реверберационным характеристикам;
- Неопределенность получения и обработки данных о времени реверберации подпространств производственных помещений и помещений в целом с большими площадями и сложным обустройством;
- Отсутствие конкретики в определении результирующего усредненного времени реверберации, относящегося либо к определенным подпространствам помещения, либо к помещению в целом.

Эти и прочие пробелы в вопросах проведения измерений и обработки данных по времени реверберации в производственных помещениях, являются причиной для детального исследования и проработки данного направления, с последующим созданием нормативной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы». Дата введения 2014-12-01.
2. СП 51.13330.2011 «Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003». Дата введения 2011-05-20.

3. Е.Я. Юдин Борьба с шумом на производстве. Справочник. М.: Машиностроение, 1985, 187, 400 с.
4. ГОСТ Р 52797.1-2007 (ИСО 11690-1:1996) «Акустика. Рекомендуемые методы проектирования малозумных рабочих мест производственных помещений. Часть 1. Принципы защиты от шума» Дата введения 2008-07-01
5. Е.Я. Юдин Справочник проектировщика. Защита от шума. М.: Стройиздат, 1974, 7, 136 с.
6. ГОСТ Р ИСО 3382-3-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 3. Помещения с открытой планировкой». Дата введения 2014-12-01.
7. ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 «Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 2. Время реверберации обычных помещений». Дата введения 2014-12-01.