

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ В НЕДИФФУЗНОМ ЗВУКОВОМ ПОЛЕ

© 2017 г. Н. Г. Канев

*Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева  
117036 Москва, ул. Швершिका 4*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1*

*e-mail: nikolay.kanev@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2016 г.

Получены законы затухания звука в кубическом помещении, одна стенка которого поглощающая, а другие — рассеивающие. Показано, что при некоторых условиях затухание звука в помещении происходит неэкспоненциально, а форма кривой затухания зависит от коэффициента рассеяния стенок. Это позволяет предложить метод измерения коэффициента рассеяния по изменению кривой затухания при расположении на стенках помещения звуко-рассеивающих материалов и конструкций. Получены выражения для аппроксимации измеренной кривой затухания, определены границы применимости данного метода.

*Ключевые слова:* коэффициент рассеяния, затухание звука, прямоугольное помещение.

**DOI:** 10.7868/S0320791917050069

### ВВЕДЕНИЕ

Количественная характеристика рассеяния звуковых волн при отражении от поверхностей [1–4] имеет большое значение для многих прикладных задач архитектурной акустики. Одной из функций звуко-рассеивающих поверхностей является повышение рандомизирующих свойств помещений, что позволяет сделать звуковое поле более диффузным и обеспечить экспоненциальное затухание звуковой энергии в помещении. В помещениях со слабыми рандомизирующими свойствами закон затухания может существенно отличаться от экспоненциального [5–8], при этом изменение рассеивающих свойств стенок помещения приводит к изменению закона затухания, что дает возможность количественно определить коэффициент рассеяния стенок [9, 10]. В настоящей работе приводятся теоретические основы измерения коэффициента рассеяния в недиффузном звуковом поле.

### СУТЬ МЕТОДА

Предлагаемый метод измерения коэффициента рассеяния имеет сходство с методом измерения коэффициента звукопоглощения в реверберационных камерах [11], согласно которому определяется время реверберации в камере с испытуемым образцом и без него при условии достаточной степени диффузности звукового поля. Последнее требование является наиболее существенным

среди прочих требований [11], поскольку в этом случае затухание звука в камере происходит по экспоненциальному закону, а кривые затухания (зависимость логарифмического уровня звуковой энергии от времени) являются прямыми, которые задаются единственным параметром — углом наклона, однозначно связанным со временем реверберации. Помещение образца в камеру приводит к снижению времени реверберации, по изменению которого вычисляется коэффициент звукопоглощения образца.

Для измерения коэффициента рассеяния, напротив, требуется недиффузное звуковое поле, затухание энергии которого происходит по закону, максимально отличающемуся от экспоненциального. Такое поле может быть создано, например, в помещении, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда, с неравномерным распределением поглощения на стенках. Если только одна стенка поглощает звук, то закон затухания в таком помещении имеет вид  $E \sim 1/\sqrt{t}$ , где  $t$  — время [7]. При покрытии непоглощающих стенок исследуемыми образцами звуко-рассеивающих конструкций затухание звука происходит быстрее, при этом закон затухания отличается от экспоненциального, что позволяет по кривой затухания определить коэффициент рассеяния. Нахождение коэффициента рассеяния по измеренной кривой затухания возможно, если она существенно отличается

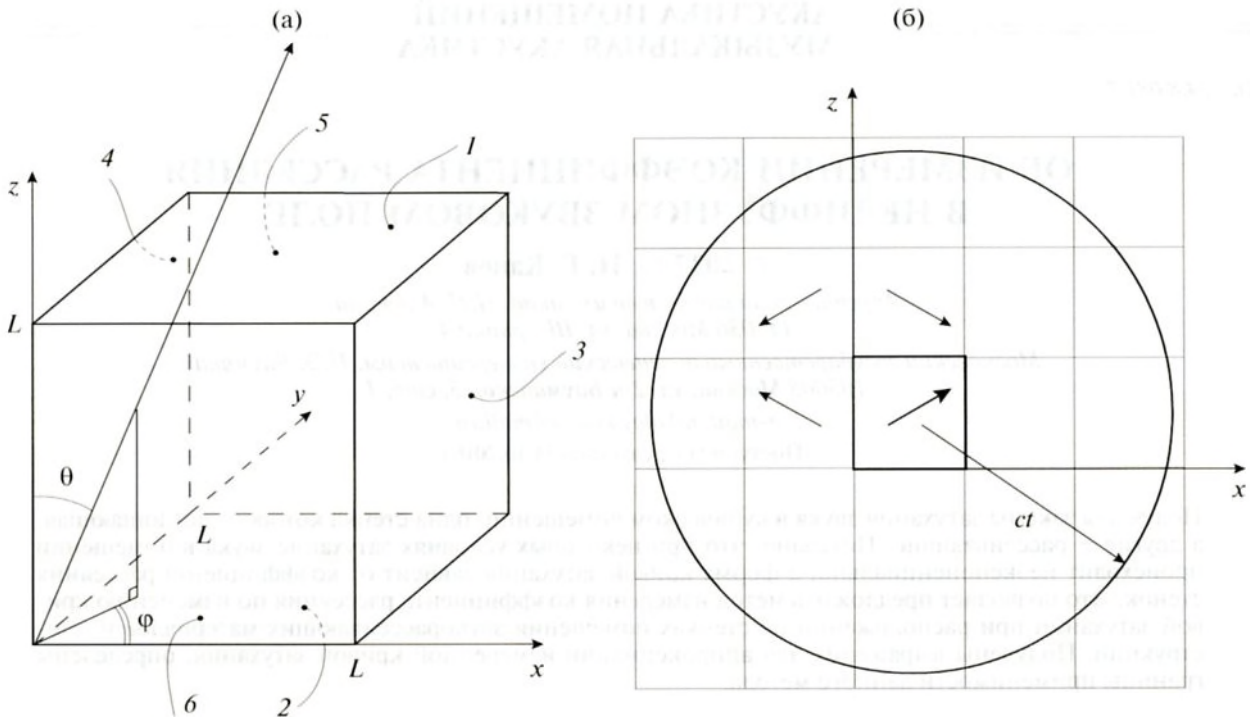


Рис. 1. Кубическое помещение (а) и построение отражений (б).

от прямой, т.е. пока затухание остается неэкспоненциальным.

### ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА В КУБИЧЕСКОМ ПОМЕЩЕНИИ

Для интерпретации изменения кривой затухания при увеличении рассеивающих свойств стенок необходимо знать, как закон затухания зависит от коэффициента рассеяния. Закон затухания может быть найден в приближении геометрической акустики, часто используемом для решения задач в области архитектурной акустики [12, 13]. Для прямоугольных помещений данный подход был использован в работах [9, 14]. Применим его для кубического помещения.

Рассмотрим кубическое помещение с длиной ребра  $L$ . Начало прямоугольной системы координат поместим в один из углов помещения, а ее оси направим вдоль ребер (рис. 1а). Стороны помещения пронумеруем следующим образом: стороне, лежащей в плоскости  $z = L$ , присвоим номер 1; стороне, лежащей в плоскости  $z = 0$ , номер 2; сторонам, лежащим в плоскостях  $x = L$  и  $x = 0$ , номера 3 и 4 соответственно; сторонам, лежащим в плоскостях  $y = L$  и  $y = 0$ , номера 5 и 6 соответственно. Будем характеризовать акустические свойства стенок коэффициентом зеркального отражения  $\gamma_i$  ( $i$  – номер стенки) – отношением энергии плоской волны, отраженной в зеркальном направлении, к энергии падающей плоской

волны. Уточним, что энергией волны в данном случае называется величина, пропорциональная квадрату амплитуды волны. Если при отражении от стенки энергия волны не уменьшается, то  $\gamma_i = 1$ , а если волна поглощается полностью, то  $\gamma_i = 0$ .

Пусть в начальный момент времени  $t = 0$  звуковое поле в помещении диффузно. В соответствии с принятым понятием диффузного поля [12, 13] представим начальное поле в помещении в виде суперпозиции плоских волн равной амплитуды и случайной фазы, равномерно распределенных по углам  $\varphi$  и  $\theta$ . Звуковая энергия в помещении – это сумма энергий всех плоских волн.

Воспользуемся способом, сходным с подходом, предложенным в [12], и сходным с методом мнимых источников. Начальное поле, состоящее из плоских волн, дополним полем волн, отраженных от стенок помещения. На рис. 1б приведен пример отражения одной плоской волны, распространяющейся в плоскости  $xz$ : поле в помещении можно представить в виде суммы четырех плоских волн, распространяющихся во всем пространстве. В трехмерном случае таких волн будет восемь. Построенное звуковое поле является также суперпозицией плоских волн с равномерным угловым распределением и определено во всем пространстве, а не только в объеме помещения. Для учета потерь энергии волн при отражениях воспользуемся изображениями стенок помещения, представляющими параллельные плоскости

на расстоянии  $L$  друг от друга (сетка на рис. 1б) – назовем их мнимыми стенками. Пересечение волной мнимой стенки соответствует отражению от реальной стенки в помещении, часть энергии волны теряется, а оставшаяся доля составляет  $\gamma$ . Таким образом, мы заменили рассмотрение плоских волн с зеркальными отражениями плоскими волнами, распространяющимися прямолинейно во всем пространстве и теряющими энергию вдоль пути распространения.

Для определения остаточной энергии волны достаточно пересчитать количество пересечений с мнимыми стенками. За время  $t$  волна пробегает расстояние  $ct$ , где  $c$  – скорость звука. Если направление волны задается углами  $\varphi$  и  $\theta$ , то она за время  $t$  пробегает расстояние  $|ct \sin \theta|$  вдоль оси  $z$ ,  $|ct \cos \theta \sin \varphi|$  вдоль оси  $y$  и  $|ct \cos \theta \cos \varphi|$  вдоль оси  $x$ . Число отражений от  $i$ -й стенки за время  $t$  составляет

$$N_{1,2}(t, \theta, \varphi) = \frac{ct}{2L} |\sin \theta|, \quad N_{3,4}(t, \theta, \varphi) = \frac{ct}{2L} |\cos \theta \cos \varphi|, \quad N_{5,6}(t, \theta, \varphi) = \frac{ct}{2L} |\cos \theta \sin \varphi|. \quad (1)$$

С учетом отражений от всех стенок остаточная энергия волны составляет  $\prod_{i=1}^6 \gamma_i^{N_i(t, \theta, \varphi)} = \exp \sum_{i=1}^6 N_i(t, \theta, \varphi) \ln \gamma_i$ . Полную энергию звукового поля в помещении найдем интегрированием по углам  $\varphi$  и  $\theta$ :

$$E_s(\tau) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\sum_{i=1}^6 n_i \ln \gamma_i} \cos \theta d\theta d\varphi, \quad (2)$$

где  $\tau = ct/L$  – безразмерный параметр времени,  $n_{1,2} = |\sin \theta|$ ,  $n_{3,4} = |\cos \theta \cos \varphi|$ ,  $n_{5,6} = |\cos \theta \sin \varphi|$ .

Выражение (2) определяет зависимость энергии зеркальных отражений в помещении от времени. Если стенки являются абсолютно отражающими, т.е.  $\gamma_i = 1$ , то энергия в помещении остается постоянной,  $E_s(\tau) = 1$ .

Если акустические свойства стенок помещения описываются импедансом  $Z$ , то необходимо учесть зависимость коэффициента отражения  $\gamma$  от угла падения волны  $\psi$ , которая имеет вид [15]

$$\gamma = \left| \frac{Z \sin \psi - 1}{Z \sin \psi + 1} \right|^2, \quad (3)$$

при этом нормальное падение соответствует углу  $\psi = \pi/2$ .

Выражение (2) описывает реверберационный процесс только в случае гладких ограждающих поверхностей, в то время как на практике поверхности помещения часто являются неровными. Это приводит к тому, что при отражении часть

звука рассеивается, поэтому общая энергия в помещении является суммой энергии зеркальных отражений и рассеянной энергии. Тогда при малом рассеянии рассеянную энергию можно считать малой добавкой к энергии зеркальных отражений.

В архитектурной акустике обычно вводится коэффициент рассеяния, т.е. отношение энергии, рассеянной при отражении звуковой волны, к энергии падающей волны. Будем считать, что при каждом отражении звука от стенки помещения часть звуковой энергии отражается зеркально, часть энергии рассеивается, а оставшаяся часть энергии поглощается. Зеркальное отражение характеризуется коэффициентом  $\gamma$ , введенным выше. Долю рассеянной и поглощенной энергии обозначим  $\delta$  и  $\alpha$  соответственно. Эти коэффициенты связаны простым отношением

$$\alpha + \delta + \gamma = 1. \quad (4)$$

Будем считать рассеяние звука изотропным. В этом случае при каждом отражении от рассеивающей стенки формируется звуковое поле с такими же свойствами, как и начальное звуковое поле в помещении, которое затухает в соответствии с найденным законом (2). Поэтому, зная рассеянную энергию, можно легко найти ее изменение во времени. Далее ограничимся учетом только однократного рассеяния на стенках, т.е. рассеянием рассеянного поля на стенках мы пренебрежем.

Каждая стенка характеризуется коэффициентом рассеяния  $\delta_i$ , где  $i$  – номер стенки. К моменту времени  $t_0$  волна, направление которой характеризуется углами  $\varphi$  и  $\theta$ , испытывает  $N(t_0) = \sum_{i=1}^6 N_i(t_0, \theta, \varphi)$  зеркальных отражений. Энергия зеркальных отражений перед последним отражением определяется первыми  $N - 1$  отражениями. Если  $N$ -е отражение происходит от стенки  $i'$ , то энергия, рассеянная при этом отражении, составляет

$$\delta_{i'} \gamma_i^{n_i(t_0, \theta, \varphi) - 1} \prod_{i \neq i'} \gamma_i^{n_i(t_0, \theta, \varphi)} = \frac{\delta_{i'}}{\gamma_{i'}} e^{\sum n_i(t_0, \theta, \varphi) \ln \gamma_i}. \quad (5)$$

За временной интервал от  $t_0$  до  $t_0 + dt_0$  происходит  $\bar{N}_i dt_0$  отражений от каждой стенки, где  $\bar{N}_i = dN_i/dt$  – число отражений от  $i$ -й стенки в единицу времени. Для получения всей рассеянной энергии за этот интервал просуммируем отражения от всех стенок и проинтегрируем по углу:

$$dE_d = \frac{dt_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\sum_{i=1}^6 \bar{N}_i(\theta, \varphi) \ln \gamma_i} \times \sum_i \left( \bar{N}_i(\theta, \varphi) \frac{\delta_i}{\gamma_i} \right) \cos \theta d\theta d\varphi \quad (6)$$

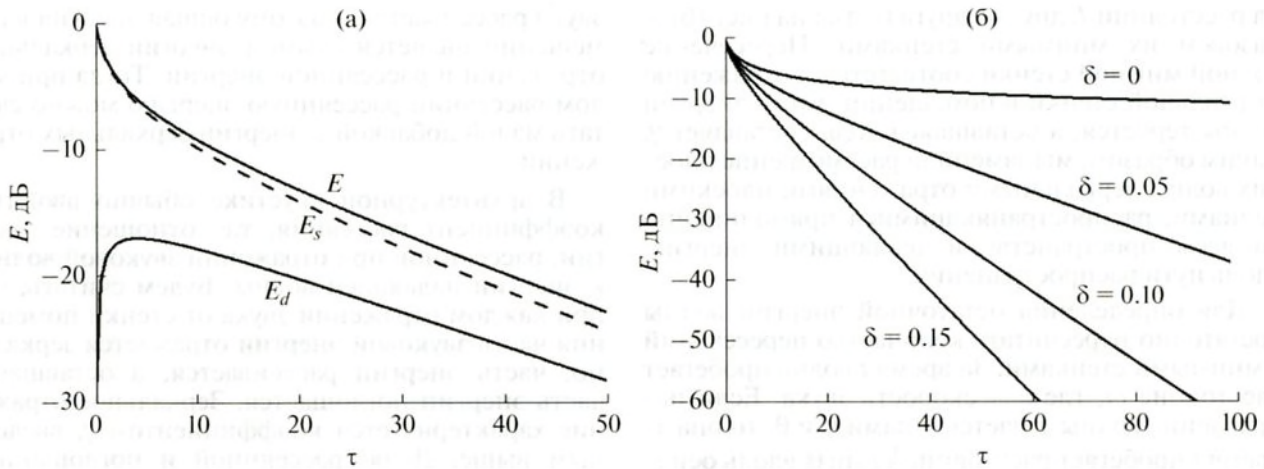


Рис. 2. (а) Затухание энергии зеркальных отражений  $E_s$ , энергии рассеянного поля  $E_d$  и полной энергии  $E = E_s + E_d$  в кубическом помещении с одной поглощающей стенкой при коэффициенте рассеяния  $\delta = 0.05$  непоглощающих стенок. (б) Затухание полной энергии в таком же помещении при различных коэффициентах рассеяния.

За временной интервал от  $t_0$  до  $t_0 + dt_0$  рассеянная энергия равна  $dE_d$ , далее эта энергия затухает по закону (2), поэтому к моменту времени  $t$  она составляет  $E_s(t - t_0)dE_d$ . Для получения рассеянной энергии в помещении к моменту времени  $t$  проинтегрируем последнее выражение по времени от начала реверберационного процесса:

$$E_d = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\tau} d\tau_0 E_s(\tau - \tau_0) \times \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{\tau_0}{2} \sum_i n_i \ln \gamma_i} \sum_i \left( n_i \frac{\delta_i}{\gamma_i} \right) \cos \theta d\theta d\varphi, \quad (7)$$

где  $\tau_0 = ct_0/L$ .

Полная звуковая энергия в помещении является суммой энергии зеркальных отражений и энергии рассеянного поля:

$$E = E_s + E_d. \quad (8)$$

Рассмотрим помещение, в котором только одна стенка поглощающая. Пусть стенка с номером  $l$  характеризуется импедансом  $Z = 1$ , тогда коэффициент зеркального отражения  $\gamma_l$  определяется (3). Полагаем, что ее поверхность гладкая, т.е.  $\delta_l = 0$ . Параллельная стенка является абсолютно жесткой, т.е.  $\gamma_2 = 1$ . Остальные четыре стенки являются рассеивающими, для них  $\delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 = \delta$  и  $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$ . При этом коэффициент рассеяния  $\delta$  полагается независимым от угла падения волны.

На рис. 2а приведен расчет временной зависимости полной энергии  $E$  для коэффициента рассеяния  $\delta = 0.05$ , а также ее составляющих – энер-

гии зеркальных отражений  $E_s$  согласно (2) и энергии рассеянного поля  $E_d$  согласно (7). В течение всего времени на приведенном графике  $E_s$  значительно больше  $E_d$ , энергия в помещении определяется зеркальными отражениями и описывается (2), влияние энергии рассеянного поля незначительно. На рис. 2б приведен расчет затухания полной энергии (8) в помещении при различных значениях коэффициента рассеяния  $\delta$ . С увеличением коэффициента рассеяния энергия затухает в помещении быстрее. При малых значениях коэффициента рассеяния наклон кривой затухания меняется довольно значительно, что позволяет по закону затухания находить коэффициент рассеяния.

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ

Если в помещении преобладает энергия зеркальных отражений, то кривая затухания, измеренная в кубическом помещении с одной поглощающей стенкой и четырьмя рассеивающими, может быть аппроксимирована выражением (8), которое зависит от одного неизвестного параметра – коэффициента рассеяния  $\delta$ . Следовательно, он может быть найден по измеренной кривой затухания – в этом и заключается суть предлагаемого метода.

Далее найдем упрощенные выражения для энергии звукового поля в помещении, которые могут быть использованы для расчетов. Рассмотрим помещение с одной гладкой поглощающей стенкой, характеризуемой импедансом  $Z = 1$ , и четырьмя рассеивающими стенками, характеризуемыми коэффициентом рассеяния  $\delta$ . Шестая стенка, параллельная поглощающей, является

гладкой и абсолютно жесткой, т.е. для нее  $\gamma = 1$ . Из (2) и (4) получим энергию зеркальных отражений в таком помещении при  $\tau \gg 1$ :

$$E_s \approx \sqrt{\frac{\pi}{8\tau}} e^{-\frac{4\delta\tau}{\pi}}. \quad (9)$$

Выражение (9) определяет зависимость энергии зеркальных отражений от коэффициента рассеяния. Очевидно, что она должна преобладать над энергией рассеянного поля, т.е.  $E_s \gg E_d$ , в противном случае поле будет близко к диффузному, и затухание звука будет происходить по экспоненциальному закону, что не позволит найти коэффициент рассеяния по измеренной кривой затухания.

Подставляя приближенное выражение (9) в (7), найдем энергию рассеянного поля:

$$E_d \approx \frac{\pi^2}{161 - \delta} \delta e^{-\frac{4\delta\tau}{\pi}}. \quad (10)$$

Рассеянное поле затухает экспоненциально, при этом экспоненциальный множитель такой, как и в выражении для энергии зеркальных отражений (9). Но энергия зеркальных отражений затухает быстрее из-за степенного множителя в (9). Из (9) и (10) найдем условие, при котором  $E_s \gg E_d$ :

$$\tau \ll \frac{32(1 - \delta)^2}{\pi^3 \delta^2}. \quad (11)$$

Таким образом, при использовании (9) кривая затухания должна анализироваться по ограниченному участку

$$1 \ll \tau \ll \delta^{-2}. \quad (12)$$

Если  $\delta \ll 1$ , то условие (12) имеет простой вид  $\tau \ll \delta^{-2}$ . Согласно (12) для рассматриваемого кубического помещения диапазон измеряемых значений коэффициента рассеяния можно принять равным  $0 < \delta < 0.1$ .

Диапазон измеряемых значений коэффициента рассеяния может быть несколько увеличен при изменении площади звукоотражающих стенок. Так, например, если звукоотражающими являются только две непараллельные стенки из четырех, перпендикулярных поглощающей стенке, то из (7) следует, что энергия рассеянного поля будет вдвое меньше, поэтому диапазон измеряемых значений коэффициента рассеяния расширяется и становится равным  $0 < \delta < 0.2$ .

### ИЗМЕРЕНИЕ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

В рассмотренном подходе к описанию затухания звуковой энергии в помещении не рассматривается ряд существенных характеристик звукового поля, в частности, частота звука не является параметром задачи. Точное решение может быть получено в рамках волновой модели, которое по-

лучено для прямоугольного помещения с одной поглощающей стенкой в работе [7]. В ней показано, что без учета поглощения в среде с увеличением порядка моды коэффициент ее затухания стремится к нулю, и расчет в лучевом приближении совпадает с волновой моделью при учете всех мод. Однако если частотная полоса, в которой возбуждается звук, ограничена сверху частотой  $\omega'$ , то в пределе  $\tau \rightarrow \infty$  закон затухания звука определяется самой медленно затухающей модой. В кубическом помещении, одна стенка которого имеет импеданс  $Z = 1$ , а остальные зеркально отражающие, затухание звука в пределе  $\tau \rightarrow \infty$  происходит по закону

$$E \sim e^{-\frac{\pi^2}{2\Omega'^2} \tau}, \quad (13)$$

где  $\Omega' = \omega' L/c$  – безразмерная частота.

Поэтому при ограничении частотной полосы приведенный выше расчет справедлив только для начального процесса, длительность которого составляет  $\tau \sim 2\Omega'/\pi^2$ . Данное ограничение может повлиять на временной интервал (12), по которому определяется коэффициент рассеяния. Согласно (12) верхняя граница этого временного интервала  $\tau \ll \delta^{-2}$ , отсюда получим условие для верхней частоты, при которой не происходит сужения временного интервала (12):

$$\Omega' > \frac{\pi^2}{2\delta^2}. \quad (14)$$

Оценка (14) может быть использована для подбора размеров помещения, необходимых для измерения коэффициента рассеяния в заданном частотном диапазоне.

### УЧЕТ ПОГЛОЩЕНИЯ

В рассмотренной модели затухания звука в помещении с рассеивающими стенками коэффициент поглощения этих стенок полагался равным нулю. Учтем поглощающие свойства этих стенок. Пусть  $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha$ , тогда при вычислении интегралов (2) и (7) необходимо использовать выражение  $\gamma = 1 - \alpha - \delta$  для этих стенок. Отсюда очевидно, что при малых значениях  $\alpha$  и  $\delta$  измеренным параметром является не коэффициент рассеяния, а сумма коэффициентов рассеяния и поглощения  $\alpha + \delta$ . При этом коэффициенты  $\alpha$  и  $\delta$  одинаково влияют на изменение кривой затухания, поэтому невозможно определить, дополнительное ли поглощение или рассеяние повлияло на изменение кривой затухания, если такое изменение наблюдается в эксперименте. В связи с этим иногда рассеяние, вносимое теми или иными конструкциями в помещение, называют “кажущимся поглощением” [10]. Для снятия этой неоднозначности необходимо провести отдельное измерение коэффициента звукопоглощения

испытуемого образца  $\alpha$  в реверберационной камере [11], а затем вычесть это значение из значения параметра  $\delta$ , найденного путем аппроксимации измеренной кривой затухания приближенным выражением (9).

Как и при измерении коэффициента поглощения в реверберационной камере, в предлагаемом способе измерения коэффициента рассеяния необходимо провести калибровочные измерения в помещении без образца, чтобы определить коэффициент звукопоглощения стенок  $\alpha'$  без испытываемых образцов. Для этого измеряется кривая затухания в помещении без образцов, по которой при помощи выражения (9) находится параметр  $\delta$ , который в данном случае и есть коэффициент звукопоглощения стенок  $\alpha'$ . При дальнейшем измерении коэффициента рассеяния необходимо учитывать коэффициент поглощения стенок  $\alpha'$ , если поверхности стенок покрываются испытываемыми образцами не полностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение кратко опишем предложенный метод измерения коэффициента рассеяния звука.

1. Измерения проводятся в нерандомизирующем помещении. В общем случае помещение должно иметь форму прямоугольного параллелепипеда, в настоящей работе рассмотрено измерение в кубическом помещении. Размеры помещения выбираются согласно (14) так, чтобы обеспечить возможность измерения коэффициента рассеяния в заданной полосе частот.

2. Одна из стенок помещения покрывается звукопоглощающим материалом с гладкой поверхностью, противоположная ей стенка остается отражающей. Четыре стенки, перпендикулярные поглощающей, предназначены для размещения испытываемых образцов и называются далее тестовыми.

3. Измеряется кривая затухания, которая аппроксимируется выражением  $E(t) = a e^{-bt} / \sqrt{t}$  при  $t > 2/b$ . Найденный коэффициент  $b$  позволяет определить коэффициент звукопоглощения тестовых стенок  $\alpha' = b\pi L/4c$ .

4. Исследуемые образцы звукоотражающих материалов или конструкций равномерно располагаются на тестовых стенках.

5. Измеряется кривая затухания, которая аппроксимируется выражением  $E(t) = a_1 e^{-b_1 t} / \sqrt{t}$  при  $t > 2/b_1$ . Найденный коэффициент  $b_1$  позволяет определить суммарный коэффициент поглощения  $\alpha$  и рассеяния  $\delta$  тестовых стенок  $\alpha + \delta = b_1\pi L/4c$ .

6. Коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  образца может быть измерен традиционным способом в реверберационной камере [11]; измеренный ко-

эффициент рассеяния звука исследуемого образца равен  $\delta = b_1\pi L/4c - \alpha$ .

7. Диапазон измеряемых значений коэффициента рассеяния составляет  $\alpha' - \alpha < \delta < 0.1 - \alpha$ . Если  $\alpha' < \alpha$ , то диапазон равен  $0 < \delta < 0.1 - \alpha$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vorländer M., Mommertz E.* Definition and measurement of random incidence scattering coefficients // *Appl. Acoust.* 2000. V. 60. P. 187–199.
2. *Hargreaves T.J., Cox T.J., Lam Y.W., D'Antonio P.* Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free field measures // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 108. P. 1710–1720.
3. ГОСТ Р ИСО 17497-1-2011. Акустика. Звукоотражающие свойства поверхностей. Часть 1. Измерение коэффициента рассеяния при случайных углах падения звуковой волны в реверберационной камере. М.: Стандартинформ, 2012.
4. ГОСТ Р ИСО 17497-2-2014. Акустика. Звукоотражающие свойства поверхностей. Часть 2. Измерение коэффициента рассеяния направленной звуковой волны в свободном звуковом поле. М.: Стандартинформ, 2015.
5. *Kuttruff K.H.* Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements // *J. Acoust. Soc. Am.* 1981. V. 69. P. 1716–1723.
6. *Mortessagne F., Legrand O., Sornette D.* Role of the absorption distribution and generalization of exponential reverberation law in chaotic rooms // *J. Acoust. Soc. Am.* 1993. V. 94. P. 154–161.
7. *Kanev H.G.* Затухание звука в прямоугольном помещении с импедансными стенками // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 5. С. 656–662.
8. *Kanev H.G.* Реверберация в трапециевидном помещении // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 5. С. 607–612.
9. *Kanev N.* Sound decay in a rectangular room with specular and diffuse reflecting surfaces // *Proc. of Forum Acusticum*, June 27–July 1, 2011, Aalborg, Denmark. P. 1935–1940.
10. *Hanyu T., Hoshi K., Nakakita T.* Method for measuring sound scattering coefficients of walls and diffusers by using a non-diffuse sound field with unevenly-distributed sound absorption // *Proc. of the 45<sup>th</sup> International Congress INTER-NOISE*, August 21–24, 2016, Hamburg, Germany. P. 1022–1030.
11. ГОСТ 31704-2011. Материалы звукопоглощающие. Метод измерения звукопоглощения в реверберационной камере. М.: Стандартинформ, 2014.
12. *Kuttruff H.* Room Acoustics, 3<sup>rd</sup> ed. Applied Science, New York, 1991.
13. *Pearce A.D.* Acoustics. Acoustical Society of America, New York, 1989.
14. *Hanyu T.* A theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. P. 1140–1148.
15. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 436 с.