

Измерение коэффициента рассеяния звука в масштабной модели прямоугольного помещения

П.,А. Трушина^{1,*}, Н.Г. Канев^{1,2†}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

²Акустический институт имени акад. Н.Н.Андреева
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

(Статья поступила 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Экспериментально исследован недавно предложенный способ измерения коэффициента рассеяния звука в недиффузном звуковом поле. Такое поле создается в прямоугольном помещении с одной поглощающей стенкой, на остальных стенках располагаются испытуемые звукорассеивающие элементы, коэффициент рассеяния которых определяется по измеренной кривой затухания. Измерения проведены в помещении размером $0.7 \times 0.4 \times 0.4 \text{ м}^3$ на частотах 4–16 кГц. Полученные результаты продемонстрировали возможность измерения коэффициента рассеяния предложенным способом.

PACS: 43.20.Fn

УДК: 534.8.081.7

Ключевые слова: коэффициент рассеяния звука, недиффузное звуковое поле, прямоугольное помещение, масштабное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В помещениях со слабыми рандомизирующими свойствами, например, в прямоугольных помещениях, и неравномерным распределением звукопоглощения на стенках закон затухания звука может сильно отличаться от экспоненциального [1]. При этом увеличение звукорассеивающих свойств непоглощающих поверхностей приводит к увеличению скорости затухания звука, и при достаточном рассеянии затухание звуковой энергии в помещении происходит экспоненциально по закону Сэбина. Коэффициент рассеяния стенок является одним из параметров, определяющих кривую затухания, т. е. зависимость звуковой энергии в помещении от времени. Таким образом, если рассеяние стенок недостаточно, чтобы обеспечить диффузное звуковое поле, то по кривой затухания можно определить значение коэффициента рассеяния звука, усредненного по поверхности рассеивающих стенок. Соответствующая методика измерений и ее теоретическое обоснование предложены сравнительно недавно [2, 3]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальной проверки предложенного метода на физической модели прямоугольного помещения.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ

Суть предлагаемого метода измерения коэффициента рассеяния заключается в следующем. Требуется создать недиффузное звуковое поле, затухание энергии

которого происходит по закону, максимально отличающемуся от экспоненциального, что возможно, 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 [1]. При покрытии непоглощающих стенок исследуемыми образцами звукорассеивающих конструкций затухания звука происходит быстрее, при этом закон затухания отличается от экспоненциального, что позволяет по кривой затухания (зависимость логарифмического уровня звуковой энергии от времени) определить коэффициент рассеяния.

Согласно теории реверберации в прямоугольных помещениях с гладкими и рассеивающими стенками можно найти зависимость звуковой энергии в помещении от времени [1, 3]. Рассмотрим помещение с размерами L, D, H (рис. 1,а) с одной поглощающей стенкой, характеризующейся импедансом Z . Параллельная ей стенка является гладкой и абсолютно жесткой. Остальные стенки характеризуются коэффициентами поглощения α и рассеяния δ , являющимися отношением интенсивности, поглощенной или рассеянной при отражении от стенки помещения звуковой волны, к интенсивности падающей волны. Если эти четыре стенки обладают одинаковыми свойствами и $L > D$, то закон затухания звуковой энергии в таком помещении имеет следующий вид

$$E(t) = \frac{a}{\sqrt{t}} e^{-bt}, \quad t \gg \frac{L}{c}. \quad (1)$$

Параметр b в (1) зависит от коэффициентов α и δ . Поэтому, если измеренная кривая затухания аппроксимирована выражением (1), т. е. подобраны соответствующие коэффициенты a и b (пример подобранной

*E-mail: trushina18@gmail.com

†E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

с помощью коэффициентов a и b функции (1) для измеренной кривой затухания приведен на рис. 1, б), то связь между коэффициентами α и δ может быть найдена следующим образом

$$\alpha + \delta = \frac{\pi L}{4c} b. \quad (2)$$

Отметим, что (1) и (2) справедливы при условии $\alpha \ll 1$ и $\delta \ll 1$. В этом случае коэффициенты α и δ одинаково влияют на изменение кривой затухания, поэтому невозможно определить дополнительное поглощение или рассеяние повлияло на кривую затухания, если ее изменение наблюдается в эксперименте. Для снятия этой неоднозначности необходимо провести отдельное измерение коэффициента звукопоглощения испытуемого образца α , а затем вычесть это значение из значения параметра δ , найденного путем аппроксимации измеренной кривой затухания приближенным выражением (1).

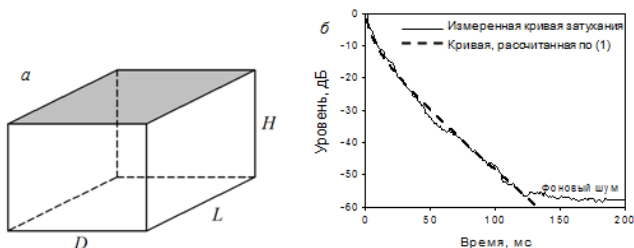


Рис. 1: Помещение для измерения коэффициента рассеяния (а) и пример измеренной в нем кривой затухания с теоретической кривой (б)

В предлагаемом способе измерения коэффициента рассеяния необходимо провести калибровочные измерения в помещении без образца для того, чтобы определить коэффициент звукопоглощения стенок α' без испытуемых образцов. Для этого измеряется кривая затухания в помещении без образцов, по которой при помощи выражения (1) находится α' . При дальнейшем измерении коэффициента рассеяния необходимо учитывать коэффициент поглощения стенок α' , если поверхности стенок покрываются испытуемыми образцами не полностью.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальное исследование описанного выше метода проведено в физической модели прямоугольного помещения размером 0.7x0.4x0.4 м [4]. Одна из стенок размером 0.7x0.4 м покрыта звукопоглощающим материалом, на четырех перпендикулярных ей стен-

ках располагаются звукорассеивающие элементы пирамидообразной формы (высота элемента — 5 см, размер основания 3x7 см²). На рис. 2 приведены схемы расположения звукопоглощающего материала и рассеивающих элементов. Конфигурация Е0 используется для определения коэффициента звукопоглощения стенок помещения α' . Конфигурации А0, А7, А13, А20 отличаются количеством звукорассеивающих элементов: число в обозначении конфигурации обозначает это количество. Конфигурация Е20 используется для определения коэффициента звукопоглощения α испытуемых элементов.

На графиках на рис. 2 представлены кривые затухания в октавных полосах частот 4, 8 и 16 кГц, измеренные в помещении при различных его конфигурациях. Три верхних графика демонстрируют влияние звукопоглощающей стенки на кривую затухания; три средних графика — влияние количества звукорассеивающих на кривую затухания; три нижних графика используются для определения коэффициента звукопоглощения элементов. Для оценки и сопоставления скорости затухания звука в разных конфигурациях в табл. 1 приведены значения времени реверберации. Поскольку во многих случаях затухание звука происходит неэкспоненциально, то используется два определения времени реверберации — T_{20} и T_{30} (определяемые по участку кривой затухания от -5 до -25 дБ и от -5 до -35 дБ соответственно), а также отношение T_{30}/T_{20} для характеристики отличия закона затухания от экспоненциального. Также в табл. 1 приведены значения коэффициента $\alpha + \delta$, найденного при помощи аппроксимации измеренной кривой затухания функцией (1) и вычисленного по формуле (2) для конфигураций.

В табл. 2 приведены результаты измерения и расчета коэффициентов поглощения и рассеяния стенок со звукорассеивающим элементами в конфигурации А20, а также вычислены эквивалентная площадь рассеяния (S_1 — площадь стенок с элементами), сечение и радиус рассеяния одного элемента, совпадающие с характерным его размером.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально продемонстрирована возможность измерения коэффициента рассеяния звука в недиффузном звуковом поле. Изменение количества звукорассеивающих элементов влияет на кривую затухания, что позволяет найти средний коэффициент рассеяния стенок с исследуемыми элементами. Дальнейшее развитие предложенного метода требует учета угловой зависимости коэффициента рассеяния, а также подбора оптимальных характеристик тестового помещения.

Таблица I: Время реверберации и коэффициенты поглощения и рассеяния

Конфигурация	4 кГц			8 кГц			16 кГц		
	T_{20} , с	T_{30} , с	T_{30}/T_{20}	T_{20} , с	T_{30} , с	T_{30}/T_{20}	T_{20} , с	T_{30} , с	T_{30}/T_{20}
E0	0.221	0.232	1.05	0.187	0.186	0.99	0.177	0.179	1.01
A0	0.115	0.160	1.39	0.151	0.162	1.07	0.151	0.154	1.02
A7	0.105	0.118	1.12	0.100	0.106	1.06	0.099	0.098	0.99
A13	0.093	0.108	1.16	0.081	0.084	1.04	0.066	0.075	1.14
A20	0.089	0.088	0.99	0.073	0.073	1.00	0.058	0.061	1.05
E20	0.185	0.189	1.02	0.142	0.145	1.02	0.131	0.130	0.99
Коэффициент поглощения и рассеяния $\alpha + \delta$									
A7	0.12			0.165			0.19		
A13	0.15			0.22			0.26		
A20	0.19			0.27			0.27		

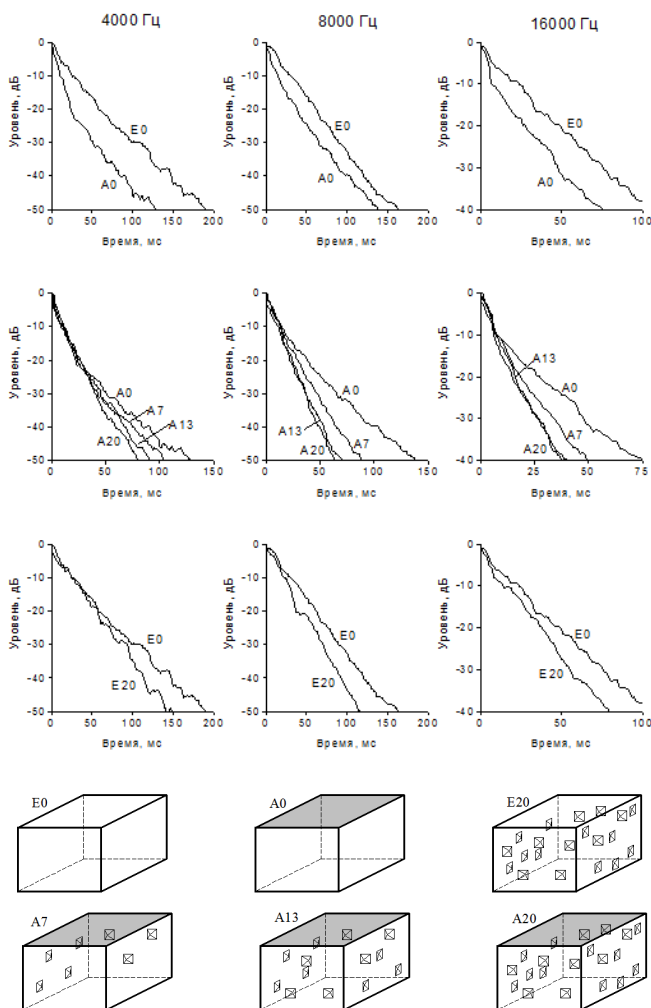


Рис. 2: Схемы расположения звукопоглощающего материала (обозначен серым цветом) и звукорассеивающих элементов в модельном помещении и измеренные кривые затухания

Таблица II: Расчет коэффициента рассеяния и других характеристик рассеяния для 20 элементов, равномерно распределенных на стенках помещения (конфигурация A20)

Величина		4 кГц	8 кГц	16 кГц
Коэффициент звукопоглощения стенок помещения без испытуемых образцов, измерен в конфигурации E0	α'	0.067	0.080	0.085
Коэффициент звукопоглощения стенок с рассеивателями, измерен в конфигурации E20	α	0.092	0.127	0.140
Суммарный коэффициент поглощения и рассеяния, измерен в конфигурации A20	$\alpha + \delta$	0.190	0.270	0.270
Коэффициент рассеяния стенок с рассеивателями	δ	0.098	0.143	0.130
Эквивалентная площадь рассеяния B , м ²	δS_1	0.063	0.092	0.083
Сечение рассеяния одного элемента σ , см ²	$B/20$	31.4	45.8	41.6
Радиус рассеяния, см	$\sqrt{\sigma/\pi}$	3.2	3.8	3.6

- [1] Канев Н. Г. Акуст. журн. 2012. **58**. № 5. С. 656.
 [2] Nanyu T., Hoshi K., Nakakita T. Proc. of the 45th International Congress INTER-NOISE, August 21–24, 2016. Hamburg, Germany. P. 1022.
 [3] Kaney N. Proc. of Forum Acusticum, June 27–July 1, 2011.

- Aalborg, Denmark. P. 1935.
 [4] Трушина П. А. Труды конференции «Акустика среды обитания». Москва, 2016. С. 166.

Measurement of sound scattering coefficients in a scale-model rectangular room

P. A. Trushina^{1,a}, N. G. Kaney^{1,2,b}

¹Bauman State Technical University, Moscow 105005, Russia

²Andreyev Acoustics Institute, Moscow 117036, Russia

E-mail: ^atrushina18@gmail.com, ^bnikolay.kaney@mail.ru

Recently proposed method for measuring of sound scattering coefficients in a non-diffuse field is experimentally investigated. Such field can be created in a rectangular room with one absorbing surface. Other surfaces are covered by tested sound scattering elements, which scattering coefficient can be found by means of measured decay curve. Measurements were carried out in the room with dimensions 0.7x0.4x0.4 m³ at 4–16 kHz. Obtained results have demonstrated the possibility of proposed method for measuring of sound scattering coefficients.

PACS: 43.20.Fn.

Keywords: sound scattering coefficient, non-diffuse sound field, rectangular room, scale model.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Трушина Полина Александровна — студентка; e-mail: trushina18@gmail.com.
2. Канев Николай Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, науч. сотрудник; e-mail: nikolay.kaney@mail.ru.