

## Экспериментальное исследование рассеивателей звука различной формы

М. А. Лаврова<sup>1,\*</sup>, Н. Г. Канев<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

<sup>2</sup>Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева.

Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

(Статья поступила 13.11.2019; подписана в печать 15.01.2020)

Представлены результаты исследования звукорассеивающих свойств трех видов объемных элементов, имеющих пирамидальную, кубическую и полусферическую формы. Проведены сравнительные измерения коэффициента рассеяния при нормальном падении звуковой волны, а также влияние их концентрации, т.е. количества элементов на единицу площади, на эффективность рассеяния. Получены зависимости звукорассеивающих свойств для трех форм рассеивателей при различной их концентрации: от 2 до 121 элементов на тестовой поверхности. Во всех случаях элементы распределены равномерно по поверхности. Установлено, что при малой концентрации (2 – 20 рассеивателей на тестовой стенке) наиболее эффективны кубические рассеиватели, а наименее эффективны — пирамидальные. С ростом концентрации элементов сечение рассеяния пирамидальных элементов увеличивается, а сечение рассеяния кубических и полусферических элементов достигает некоторого предельного значения.

PACS: 43.20.Fn

УДК: 534.8.081.7

Ключевые слова: коэффициент рассеяния звука, звукорассеивающий элемент, недиффузное звуковое поле.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных акустических характеристик поверхностей в архитектурной акустике является коэффициент рассеяния звука, который используется, главным образом, при численном моделировании акустики помещений. Эффект рассеяния может достигаться размещением внутри помещения отдельных элементов и поверхностей с неравномерной структурой. Существует ряд стандартизованных методик для измерений коэффициента рассеяния, но для их применения необходимы определенные условия в реверберационной [1] и безэховой камерах [2] и дополнительные устройства: антенна-гониометр, поворотный стол.

Для упрощения измерения рассеивающих свойств поверхностей был предложен метод измерения коэффициента в недиффузном звуковом поле, затухание энергии которого происходит по экспоненциально-степенному закону [3, 4]. Идея метода заключается в измерении кривой затухания звука и ее аппроксимации известной теоретической зависимостью. Подробное описание метода и его первых экспериментальных проверок приведено в работах [5, 6, 7, 8]. В работе [9] предложенный подход используется для измерения коэффициента рассеяния поверхностей при нормальном падении звуковой волны.

В настоящей работе приводятся результаты измерения нормального коэффициента рассеяния звука поверхностей со звукорассеивающими элементами различной геометрической формой в модельном экспери-

менте. На практике нормальный коэффициент рассеяния используется в случаях, когда в помещении преобладают негативные акустические эффекты, такие как фокусировка звука и порхающее эхо. Для устранения данных дефектов рассеивающие элементы размещаются на поверхностях стен, формирующих негативные звуковые отражения.

### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ

Теоретический закон затухания звуковой энергии в помещении с двумя поглощающими стенками (рис. 1) выведен в [3, 9] и имеет вид:

$$E(t) \approx \frac{a}{t} e^{-bt}, \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $a, b$  — коэффициенты, зависящие от размеров помещения и акустических характеристик его стенок.

Измеренная кривая затухания аппроксимируется зависимостью (1), в результате определяются значения коэффициентов  $a, b$ . На рис. 2 приведен пример аппроксимации измеренной кривой затухания: параметры теоретической кривой (пунктир) подбираются для временного интервала  $t_1 < t < t_2$ , где  $t_1 = 2/b$  — время, при котором становится справедливым закон затухания (1),  $t_2$  — время, при котором начинается влияние фонового шума на кривую затухания.

Найденный в результате аппроксимации коэффициент  $b$  позволяет найти сумму коэффициентов нормального поглощения и рассеяния

$$\Delta = \alpha_0 + \alpha_{\perp} + \Delta_{\perp} = \frac{2L}{c} b, \quad (2)$$

\*E-mail: marinalavro@mail.ru

†E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

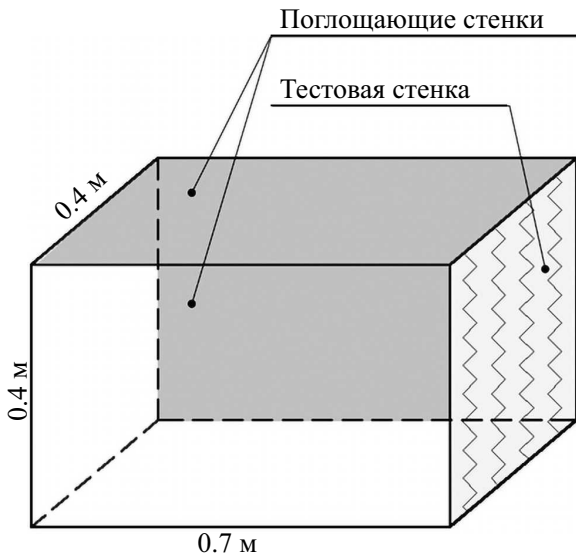


Рис. 1: Модель помещения

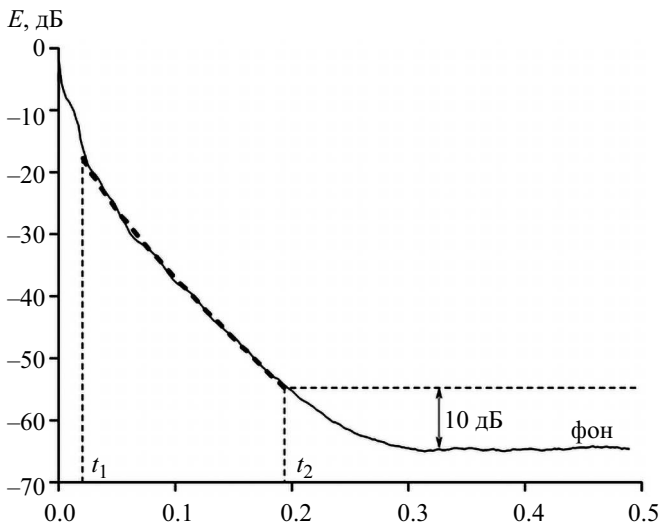


Рис. 2: Пример аппроксимации измеренной кривой затухания теоретической зависимостью (1), обозначенной пунктиром

где  $\alpha_{\perp}$ ,  $\Delta_{\perp}$  — нормальные коэффициенты поглощения и рассеяния тестовой стенки;  $\alpha_0$  — нормальный коэффициент поглощения стенки, параллельной тестовой;  $L$  — длина наибольшей стенки, м;  $A$  — скорость звука в воздухе, м/с.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕИВАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

### 2.1. Описание экспериментальной установки и тестовых элементов

Предложенный способ измерения коэффициента рассеяния звука при нормальном падении звуковой волны

проверен в модельном эксперименте (рис. 1). Две непараллельные длинные стенки покрыты звукопоглощающим материалом. Стенка  $0.4 \times 0.4$  м предназначена для размещения тестируемых рассеивателей звука.

В одном из углов помещения располагался ненаправленный источник звука для создания изотропного звукового поля в начальный момент времени. Измерения кривой затухания производилось микрофоном, расположенным возле тестовой стенки. При этом кривые затухания, измеренные в разных точках помещения, практически не отличаются, поэтому усреднение измерений по пространству не производилось.

В качестве рассеивающих элементов в эксперименте использовались деревянные кубы, пирамиды и полусферы с характерным размером 3.5 см (рис. 3). Количество элементов последовательно увеличивалось от 0 до 121 шт.; 121 элемент полностью покрывает поверхность тестовой стенки. При этом элементы равномерно распределялись на поверхности стенки.

### 2.2. Рассеивающие поверхности

На рис. 4 приведены результаты измерения суммарного коэффициента поглощения и рассеяния  $\Delta'$  тестовой стенки для частот 4 кГц и 8 кГц в зависимости от количества рассеивающих элементов  $n$  на стенке.

На 4 кГц в диапазоне 0 – 60 элементов и на 8 кГц — 0 – 30 элементов лучшими рассеивающими свойствами обладают кубические рассеиватели. Также с ростом числа элементов пирамиды и полусферы проявляют себя одинаково: начиная с 60, значение коэффициента резко растет, достигая значения 0.55 при полном покрытии тестируемой стенки.

При малом количестве элементов пирамидальные рассеиватели неэффективны по сравнению с остальными, но на 8 кГц, при покрытии 50% стенки, коэффициент резко растет, значительно превышая аналогичные значения коэффициентов для кубической и полусферической форм.

### 2.3. Рассеивающие элементы на жесткой стенке

Рассмотрим подробнее полученные результаты для 0–29 кубических и пирамидальных элементов (рис. 5). При малой концентрации их можно считать отдельными элементами на жесткой поверхности.

По результатам эксперимента явно прослеживается зависимость роста нормального коэффициента рассеяния от количества рассеивателей на тестовой стенке. При этом рост коэффициента  $\Delta'$  пирамидальных рассеивателей происходит без резких скачков. Максимальное значение при 29 элементах на 4 кГц:  $\Delta'_{29} = 0.166$ , на 8 кГц:  $\Delta'_{29} = 0.240$ .

Для кубических рассеивателей на 8 кГц происходит интенсивный рост коэффициента  $\Delta'$  в диапазоне 2 – 8 элементов, затем он меняется слабо. Макси-



Рис. 3: Размещения рассеивателей на тестовой стенке

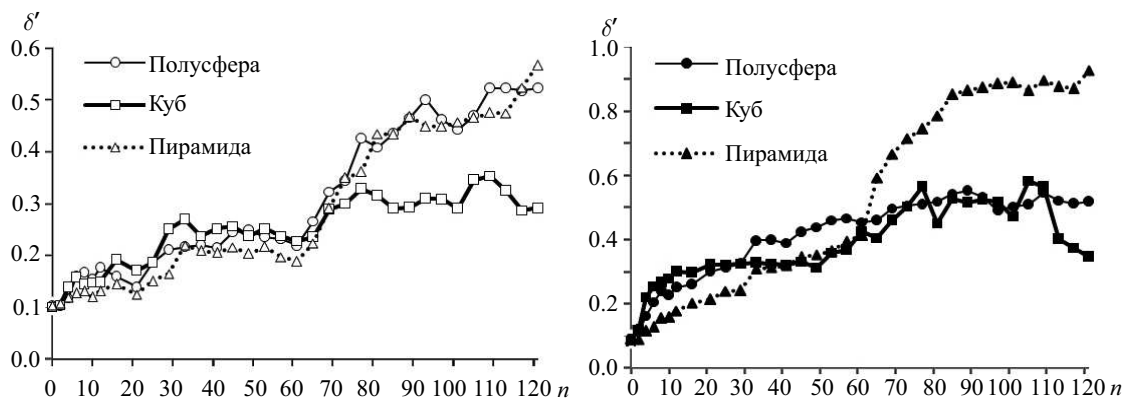


Рис. 4: Зависимость суммарного коэффициента поглощения и рассеяния  $\Delta'$  тестовой стенки на частотах 4 кГц (а) и 8 кГц (б) от количества рассеивателей

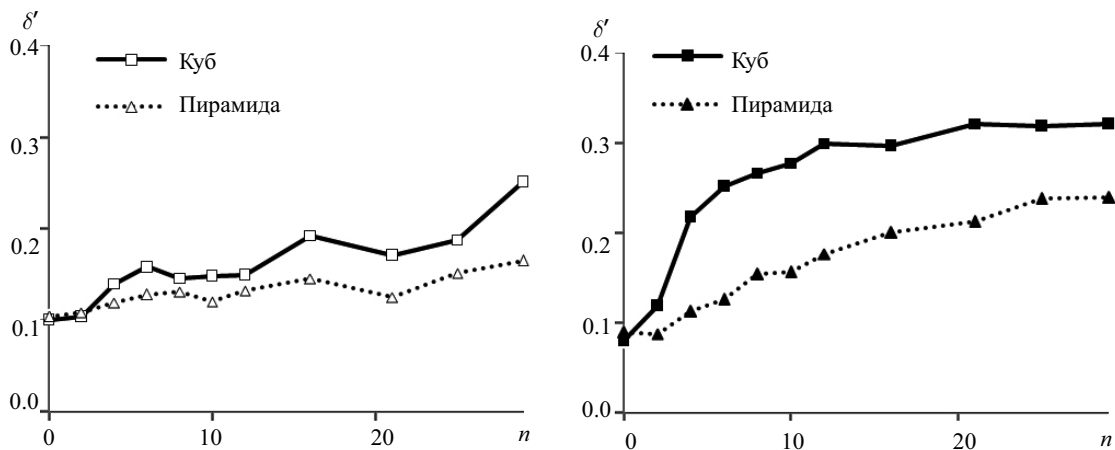


Рис. 5: Зависимость суммарного коэффициента поглощения и рассеяния  $\Delta'$  тестовой стенки на 4 кГц (а) и 8 кГц (б) от количества рассеивателей

мальное значение на 4 кГц:  $\Delta'_{29} = 0.252$ , на 8 кГц:  $\Delta'_{29} = 0.322$ . Качественное теоретическое обоснование полученных экспериментальных результатов представлено в статье [9], где показано, что коэффициент рассеяния пропорционален объему рассеивателя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе недавно предложенного метода измерения коэффициента рассеяния в недиффузном звуковом поле экспериментально исследованы рассеиваю-

шие свойства кубических, пирамидальных и полусферических элементов, расположенных на жесткой поверхности. Установлено, что при малой концентрации (2 – 20 рассеивателей на тестовой стенке) наиболее эффективны кубические рассеиватели, а наименее эф-

фективны — пирамидальные. С ростом концентрации элементов сечение рассеяния пирамидальных элементов увеличивается, а сечение рассеяния кубических и полусферических элементов достигает некоторого предельного значения.

- 
- [1] ГОСТ Р ИСО 17497-1-2011. Акустика. Звукорассеивающие свойства поверхностей. Часть 1. М.: Стандартинформ, 2012.
- [2] ГОСТ Р ИСО 17497-2-2014. Акустика. Звукорассеивающие свойства поверхностей. Часть 2. М.: Стандартинформ, 2015.
- [3] Канев Н. Г. // Акуст. журн. 2012. **58**, № 5. С. 656.
- [4] Embrechts J.-J. // J. Acous. Soc. Am. 2019. **145**, P. 2724.
- [5] Hanyu T., Hoshi K., Nakakita T. Proc. of the 45th International Congress INTER-NOISE, Hamburg, Germany, 2016. P. 1022.
- [6] Канев Н. Г. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 6. С. 679.
- [7] Трушина П. А., Канев Н. Г. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2017. № 5. 1751112.
- [8] Kanev N. Proc. of the 46th International Congress INTER-NOISE, HongKong, China, 2017. P. 2367.
- [9] Лаврова М. А., Канев Н. Г. Акустика среды обитания: сборник трудов Четвертой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания». М., 2019.

---

## Experimental study of sound scatterers with different shapes

M. A. Lavrova<sup>1,a</sup>, N. G. Kanev<sup>1,2,b</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia

<sup>2</sup>Andreyev Acoustic Institute. Moscow 117036, Russia

E-mail: <sup>a</sup>marinalavro@mail.ru, <sup>b</sup>nikolay.kanev@mail.ru

The results of the study of sound scattering properties of three types of sound diffusing elements with pyramidal, cubic and hemispherical shapes are presented. Comparative measurements of the scattering coefficient under the normal incidence of the sound wave, as well as the impact of their concentration (the number of elements per unit area) on the scattering efficiency were carried out. The dependences of sound scattering properties for three forms of scatterers at different concentrations (from 2 to 121 elements on the test surface) are obtained. In all cases, the elements are evenly distributed over the surface. It was found that at low concentrations (2 – 20 scatterers on the test wall) cubic scatterers are the most effective, and pyramidal scatterers are the least effective. As the concentration of elements increases the scattering cross-section of pyramidal elements increases and the scattering cross-section of cubic and hemispherical elements reaches a certain limit value.

PACS: 43.20.Fn

*Keywords:* architectural acoustics, diffusers, scattering coefficient, non-diffuse sound field.

*Received 13 November 2019.*

### Сведения об авторах

1. Лаврова Марина Александровна — магистрант; e-mail: marinalavro@mail.ru.

2. Канев Николай Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, науч. сотрудник; e-mail: nikolay.kanev@mail.