



УДК 534.2

**А. И. АНТОНОВ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.; **В. П. ГУСЕВ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.<sup>1</sup>; **В. И. ЛЕДЕНЕВ**, д-р техн. наук, проф. кафедры городского строительства и автомобильных дорог<sup>2</sup>, вед. науч. сотр.<sup>1</sup>; **И. В. МАТВЕЕВА<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доц. кафедры городского строительства и автомобильных дорог

### **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ КАМЕРЕ**

<sup>1</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН».

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21.

Тел.: (495) 482-40-16.

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е.

Тел.: (4752) 63-09-20, (4752) 63-03-72; эл. почта: gsiad\_tambov@mail.ru

*Ключевые слова:* реверберация звука, коэффициент звукопоглощения; реверберационная камера; компьютерное моделирование реверберации.

---

*Приведены предложения по уточнению методики определения коэффициента звукопоглощения образцов материалов в реверберационной камере по ГОСТ 31704-2011. Методами компьютерного моделирования выполнен анализ структуры звуковых полей реверберационных камер, исследовано влияние различных факторов на диффузность звукового поля и точность определения коэффициентов звукопоглощения материалов.*

---

Оценка звукопоглощающих характеристик материалов производится путем их измерения в условиях реверберационной камеры. Методика определения звукопоглощающих характеристик материалов подробно рассмотрена в ГОСТ 31704-2011 [1]. Анализ документа показывает, что его авторы допускают получение при измерениях величины коэффициента звукопоглощения материалов больше единицы. В примечании 2 пункта 3.9 ГОСТ [1] указывается, что «коэффициент звукопоглощения  $\alpha_s$ , полученный в результате измерения времени реверберации, может иметь значения, превышающие единицу (например, вследствие влияния дифракционных эффектов)». Исследованию дифракционного эффекта звукопоглощающих образцов конечных размеров было посвящено большое количество работ. В частности, в работе [2] приведены основные принципы расчета влияния дифракционного (краевого) эффекта на звукопоглощающие свойства материалов. В ней также даны ссылки на исследования и других зарубежных авторов. Можно согласиться с ростом звукопоглощения образцов за счет краевого эффекта, однако получаемая в этом случае величина коэффициента звукопоглощения (КЗП) образца больше единицы противоречит здравому смыслу и закону сохранения энергии. По-видимому, при определении величины КЗП образца кроме диффузно падающей на образец из объема камеры энергии должна учитываться также и энергия, приходящая на образец в процессе дифракции. Данное обстоятельство должно быть подтверждено не только путем теоретических размышлений, но и проведением



экспериментальных исследований с применением специальной аппаратуры, например, интенсиметров.

Кроме этого, на величину КЗП, определяемого в реверберационной камере, значительное влияние оказывает также несовершенство математического аппарата, используемого при обработке результатов эксперимента. Принятый при обработке математический аппарат может отличаться по своей сути от реальных процессов, происходящих в реверберационной камере. Ниже в статье даны некоторые предложения по совершенствованию методики определения КЗП образцов реверберационным методом.

Результаты анализа используемой в ГОСТ 31704-2011 [1] методики обработки результатов измерений в реверберационной камере дают основание для ряда существенных на наш взгляд замечаний.

*Замечание 1.* В ГОСТ содержится ошибка в определении эквивалентного звукопоглощения образца и, соответственно, в последующем расчете значений КЗП исследуемого материала.

Определение эквивалентного звукопоглощения  $A_T$  образца на основе результатов измерений в реверберационной камере производится по формуле (8) ГОСТ 31704-2011 [1], которая имеет вид:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1), \quad (1)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – скорость звука в воздухе соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$  во время измерений в реверберационной камере при отсутствии и наличии испытуемого образца в ней;  $m_1$  и  $m_2$  – постоянные затухания звуковой энергии в воздухе при измерениях в камере без образца и при его наличии;  $V$  – объем камеры;  $A_1$  – эквивалентная площадь звукопоглощения камеры без образца, определяемая по формуле:

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_1 T_1} - 4V m_1; \quad (2)$$

$T_1$  – время реверберации в камере без образца;  $A_2$  – эквивалентная площадь звукопоглощения в камере при наличии образца, определяемая по формуле:

$$A_2 = \frac{55,3V}{c_2 T_2} - 4V m_2; \quad (3)$$

$T_2$  – время реверберации в камере с образцом.

Выражение (1), используемое в ГОСТ [1], имеет неточность. Правильной в этом случае является формула:

$$A_T = A_2 - A_1 \left( 1 - \frac{S_{об}}{S} \right), \quad (4)$$

где  $S_{об}$  – площадь испытуемого образца;  $S$  – площадь ограждений камеры.

Выражение (1) предлагается скорректировать следующим образом:

$$A_T = 55,3V \left[ \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \left( 1 - \frac{S_{об}}{S} \right) \right] - 4V(m_2 - m_1). \quad (5)$$

Устранение данной ошибки приводит к увеличению КЗП образца на величину среднего КЗП пустой камеры. Следует отметить, что погрешность ошибки незначительна. Требования к реверберационным камерам ограничивают



эквивалентное звукопоглощение камер и, соответственно, КЗП ее ограждений. Как правило, средний КЗП пустой реверберационной камеры  $\alpha_k$  меньше 0,05.

*Замечание 2.* При обработке экспериментальных данных в ГОСТ [1] используется формула определения времени реверберации по Сэбину. Практика показывает, что более точные результаты при определении времени реверберации дает формула Эйринга. Это связано с тем, что формулы Сэбина и Эйринга отличаются между собой способами учета звукопоглощающих свойств ограждений. Время реверберации по формуле Сэбина определяется как:

$$T_C = \frac{13.8l}{c(\alpha + ml)}, \quad (6)$$

а по формуле Эйринга как:

$$T_Э = \frac{13.8l}{c(-\ln(1-\alpha) + ml)}, \quad (7)$$

где  $l$  – длина среднего свободного пробега звука в помещении.

Средние значения КЗП в камере определяются, соответственно, по формулам:

$$\alpha_C = \frac{13.8l}{cT_C} - ml, \quad (8)$$

$$\alpha_Э = 1 - e^{\frac{-13.8l}{cT_Э} + ml}. \quad (9)$$

Получаемая величина  $\alpha_C$  всегда больше величины  $\alpha_Э$ .

Согласно условиям проведения эксперимента, указанным в ГОСТ [1], средний КЗП камеры с образцом не должен превышать величины  $\alpha = 0,10$ . При такой величине КЗП различия в определяемых по формулам Сэбина и Эйринга его значениях могут достигать 5 %. Как видно, использование формулы Сэбина при обработке результатов вместо формулы Эйринга будет давать для образца с  $\alpha_{об} = 1,0$  значение  $\alpha'_{об} = 1,05$ . Следует отметить, что величина  $\alpha'_{об}$  получена для стандартных размеров испытательной реверберационной камеры при внесении в нее эффективного звукопоглощающего образца с рекомендуемой ГОСТ площадью.

На наш взгляд, по указанным выше причинам в нормативном документе [1] необходимо использовать методику обработки экспериментальных данных на основе выражения Эйринга. Последовательность определения величины  $\alpha_{об}$  может быть следующей:

– по измеренным значениям времени реверберации определяется средний КЗП ограждений камеры без образца:

$$\alpha_1 = 1 - e^{\frac{-13.8l}{c_1 T_1} + m_1 l}; \quad (10)$$

– затем также рассчитывается средний КЗП ограждений реверберационной камеры с образцом:

$$\alpha_2 = 1 - e^{\frac{-13.8l}{c_2 T_2} + m_2 l}; \quad (11)$$

– в завершение определяется КЗП образца по формуле:

$$\alpha_{об} = \frac{\alpha_2 S - \alpha_1 (S - S_{об})}{S_{об}}. \quad (12)$$



Использование выражения Эйринга в этом случае будет снижать вероятность появления события, при котором  $\alpha_{об} > 1$ .

*Замечание 3.* При обработке результатов измерения реверберации следует учитывать влияние внесения звукопоглощающего образца в камеру на изменение структуры ее звукового поля.

Использование при обработке теоретических выражений времени реверберации предполагает неизменность структуры звукового поля камеры до и после внесения в нее образца звукопоглощающего материала. Неизменность структуры сопровождается постоянством скорости снижения уровней отраженного звука после отключения источника шума. Постоянная скорость затухания звука при реверберации наблюдается в диффузных звуковых полях, в которых уровни звукового давления во всех точках помещения одинаковы и приход звуковой энергии в расчетную точку одинаков со всех направлений. Обеспечение таких условий в реверберационной камере согласно ГОСТ [1] достигается путем размещения в ней рассеивателей.

Для оценки степени диффузности звукового поля в замкнутых воздушных объемах используют различные способы [3]. К ним относятся: измерения перепадов уровней звукового давления по объему помещения; измерения неравномерности прихода звука с разных направлений при помощи узконаправленного микрофона [4]; использование метода интенсиметрии для анализа угловой пространственной неоднородности [5] и т.д.

Оценка диффузности и стабильности звукового поля во времени может также выполняться по косвенным признакам, а именно, по форме графиков реверберации и по значениям средней длины свободного пробега звука. В любой момент времени скорость затухания звука определяется средней длиной свободного пробега звука в соответствующее время и средним коэффициентом звукопоглощения ограждений, с которыми встречаются звуковые волны. В диффузном поле график затухания уровней отраженного звука представляет прямую линию.

В случае одинаковых звукопоглощающих характеристик ограждений помещения постоянная скорость затухания звука при реверберации указывает на стабильность во времени величины средней длины свободного пробега звука в помещении. При переменной скорости затухания уровней звука можно предположить и переменное во времени значение средней длины свободного пробега.

Исследования параметров звукового поля по косвенным признакам выполнены нами на основе результатов математического моделирования процессов реверберации для двух вариантов помещений (см. рис. 1).

*Исходные данные:* помещение в форме прямоугольного параллелепипеда (вариант 1) с размерами  $10 \times 5 \times 4$  м;  $S = 220$  м<sup>2</sup>;  $V = 200$  м<sup>3</sup>; КЗП помещения  $\alpha = 0,03$ ; образец  $S_{об} = 11$  м<sup>2</sup>; КЗП образца  $\alpha_S = 1$ ; частота 1000 Гц,  $m = 0,0014$  м<sup>-1</sup>. Вариант 2 помещения отличается формой плана и величиной  $S = 225,6$  м<sup>2</sup>. Остальные параметры помещения такие же, как и в варианте 1.

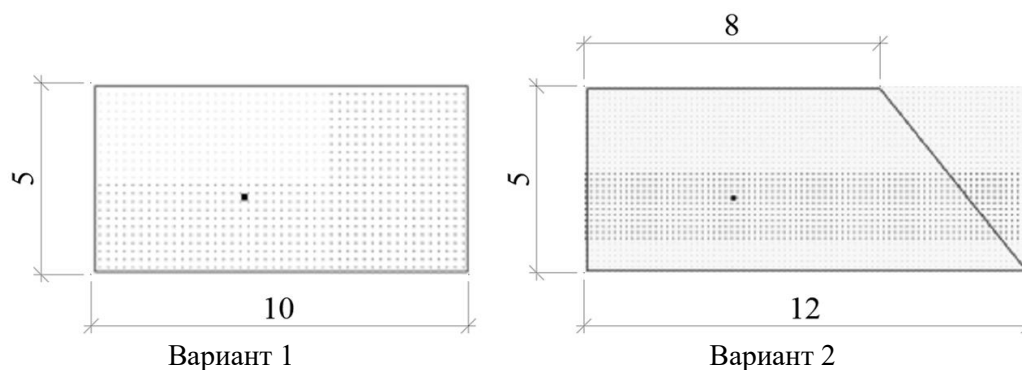


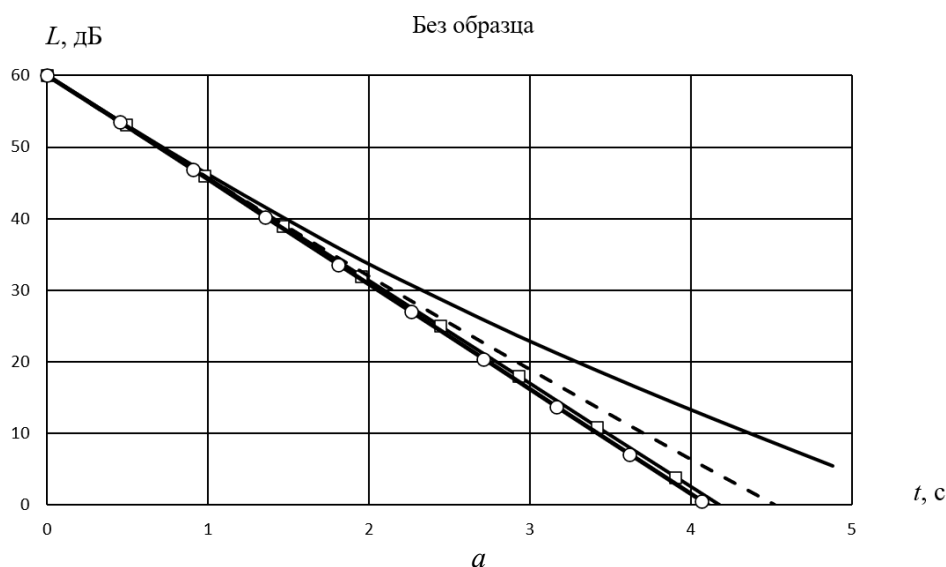
Рис. 1. Планы помещений

Результаты исследований приведены ниже.

*Косвенный признак диффузности поля по форме графиков реверберации*

Расчеты графиков затухания уровней звука при реверберации выполнены для обоих вариантов помещений. Рассматривались ситуации в помещениях без образца и при наличии в них образцов с эффективным звукопоглощением. Расчеты производились при отсутствии и наличии в помещениях рассеивателей, то есть при зеркальной и диффузной моделях отражения звука от ограждений. Для исследовательских целей рассчитывался также график реверберации, когда звукопоглощающие свойства образца равномерно распределялись по всем поверхностям помещений.

Расчеты процессов затухания звука в помещениях выполнены с использованием компьютерной программы, реализующей метод прослеживания лучей. Излучаемая акустическая мощность точечного равнонаправленного источника звука равномерно распределялась на 10 000 лучей. Путь каждого луча прослеживался в течение времени  $\Delta t = 1,5T_C$ , где  $T_C$  – стандартное время реверберации, определяемое по формуле Сэбина. При расчетах определялась средняя по помещению звуковая энергия и средняя длина свободного пробега звука в разные моменты времени после отключения длительно действующего источника звука. Результаты построения графиков затухания звука после отключения источника звука показаны на рис. 2.



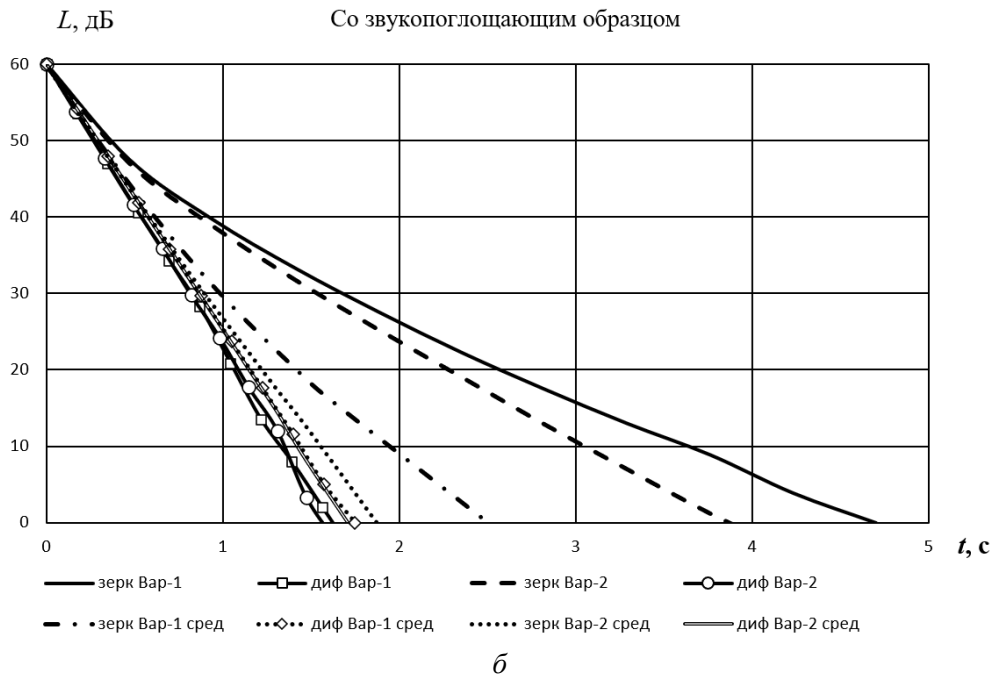


Рис. 2. Графики реверберации звука, полученные для двух вариантов камер при отсутствии образца (а) и при его наличии (б).

Скорость затухания уровней звука определялась величиной стандартного времени реверберации  $T$ , при котором после отключения источника звука уровень звукового давления снижается на 60 дБ. В случае нелинейного графика реверберации скорость затухания определялась на отдельных  $i$ -х участках графика по величине отрезка времени  $\Delta t_i$ , при котором уровни шума затухают на 6 дБ. Для удобства сравнения локальная скорость затухания уровней звука приводилась к условному времени реверберации на участке  $T_i$ , которое рассчитывалось по выражению:

$$T_i = 10\Delta t_i. \quad (13)$$

Результаты расчета скорости затухания звука (реверберации) приведены в табл. 1. В графе 1 таблицы приняты следующие обозначения:  $T_{\text{Э}}$  – время реверберации, рассчитанное по формуле Эйринга;  $T$  – время реверберации, полученное при компьютерном моделировании;  $T_{\text{н}}$  – время реверберации, рассчитанное по формуле (13) для начального участка реверберации, полученного при компьютерном моделировании;  $T_{\text{с}}$  – то же, для среднего участка реверберации;  $T_{\text{к}}$  – то же, для конечного участка реверберации.

Результаты компьютерного моделирования в табл. 1 даны для условий, когда в помещениях отсутствует звукопоглощающий материал (ЗПМ) (графы 2 и 5) и когда в них размещен образец ЗПМ с  $\alpha = 1,0$  (графы 3 и 6). В табл. 1 приведены также результаты расчета, когда звукопоглощающий материал условно распределен по ограждениям таким образом, чтобы средний КЗП ограждений был равен среднему КЗП помещения с образцом (графы 4 и 7).

В таблице цветом выделены ячейки, процесс реверберации в которых соответствует условиям диффузного звукового поля. Как видно, в эту группу попадают все ячейки при диффузном отражении звука от ограждений помещения. Следует также отметить и линейный характер затухания звука в помещении



(вариант 2) при зеркальном отражении от ограждений, когда КЗП всех ограждений одинаков.

Таблица 1

**Значения времени реверберации по результатам компьютерного моделирования**

Обозначение	При зеркальном отражении звука			При диффузном отражении звука		
	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем
1	2	3	4	5	6	7
Помещение в форме прямоугольного параллелепипеда (вариант 1)						
$T_{\Sigma}$	4,09	1,70	1,70	4,09	1,70	1,70
$T$	5,45	4,79	2,47	4,18	1,64	1,75
$T_{\text{н}}$	4,25	2,30	1,74	4,24	1,61	1,77
$T_{\text{с}}$	5,36	5,41	2,56	4,18	1,67	1,74
$T_{\text{к}}$	7,00	7,22	3,25	4,17	1,69	1,72
Помещение в виде трапеции (вариант 2)						
$T_{\Sigma}$	4,06	1,69	1,69	4,06	1,69	1,69
$T$	4,52	3,90	1,86	4,10	1,64	1,73
$T_{\text{н}}$	4,15	2,22	1,72	4,16	1,54	1,77
$T_{\text{с}}$	4,54	4,50	1,88	4,11	1,70	1,72
$T_{\text{к}}$	4,91	5,04	2,09	4,10	1,75	1,72

Результаты моделирования показали, что небольшое изменение формы помещения (варианты 1 и 2) приводит к существенным изменениям параметров звукового поля при зеркальном отражении звука. Вероятно, это связано с перераспределением звуковой энергии между модами.

В случае рассеянного отражения звука в помещениях с одинаковыми звукопоглощающими свойствами ограждений отмечается незначительное снижение времени реверберации по мере затухания отраженной звуковой энергии. В помещениях с образцами звукопоглощающего материала оно, наоборот, по мере затухания существенно увеличивается. Это обстоятельство свидетельствует о том, что внесение дополнительного локального звукопоглощения влияет на структуру звукового поля и приводит к изменению длин среднего пробега звуковых лучей.

*Косвенный признак диффузности поля по величине средней длины свободного пробега звука*

Средняя длина свободного пробега звука является удобной универсальной характеристикой структуры звукового поля. Стандартное значение средней длины свободного пробега звука, определяемого формулой:

$$l_{\text{ср}} = 4V/S, \quad (14)$$

было получено для условий абсолютно диффузного звукового поля. Поэтому степень отклонения рассчитанного значения  $l_{\text{ср}}$  от этой величины может характеризовать величину отклонения параметров звукового поля от идеального диффузного состояния.

Выполненные нами исследования [6, 7] показали влияние различных факторов на структуру и параметры звукового поля и, соответственно, на величину средней длины свободного пробега и ее изменений в процессе реверберации.



Расчет значений средних длин свободного пробега звука в помещениях выполнен нами на основе компьютерного моделирования методом прослеживания лучей. Диффузный характер отражения звука реализовался посредством вероятностного отражения звука согласно диаграмме распределения отраженного звука по зависимости Ламберта. Расчет средней длины свободного пробега выполнен для условий стационарного звукового поля, когда с учетом энергетических весов суммировались вклады всех лучей до тех пор, пока их энергия не уменьшится в  $10^6$  раз [7]. Полученная таким образом средняя длина  $l_n$  характеризует состояние стационарного звукового поля или поля в начале реверберации. После отключения источника звука из анализа исключались начальные пробеги лучей, присутствующие до момента отключения источника звука. Рассчитанные значения средних длин свободного пробега приведены в табл. 2.

В табл. 2 приняты следующие условные обозначения длин свободного пробега лучей:  $l_{cp}$  – средняя длина пробега по формуле (14);  $l_n$  – длина пробега на начальном этапе реверберации;  $l_c$  – то же, в середине процесса реверберации;  $l_k$  – то же, на завершающем этапе реверберации.

Таблица 2

**Значения средней длины свободного пробега по результатам компьютерного моделирования**

Обозначение	При зеркальном отражении звука, м			При диффузном отражении звука, м		
	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем
1	2	3	4	5	6	7
Помещение в форме прямоугольного параллелепипеда (вариант 1), $l_{cp} = 3,64$ м						
$l_n$	3,71	3,82	3,64	3,66	3,60	3,65
$l_c$	5,32	6,24	5,46	3,63	3,52	3,64
$l_k$	6,52	7,19	7,0	3,61	3,21	3,63
Помещение в виде трапеции (вариант 2), $l_{cp} = 3,55$ м						
$l_n$	3,57	3,68	3,50	3,56	3,48	3,60
$l_c$	3,95	4,69	3,94	3,55	3,44	3,55
$l_k$	4,42	4,85	4,45	3,53	3,41	3,51

В результате моделирования установлено, что в случае зеркального отражения звука средняя длина свободного пробега в процессе реверберации изменяется весьма значительно. Ее рост в помещении в виде прямоугольного параллелепипеда приближается к двукратной величине. Изменение формы помещения (вариант 2) замедлило рост средней длины свободного пробега в процессе реверберации до полутора раз. Размещение образцов материала с высокими звукопоглощающими свойствами в помещениях при зеркальном отражении звука приводит к росту средних длин на 40–50 %.

При диффузном отражении звука от ограждений изменение средних длин свободного пробега при реверберации незначительно. Наблюдается уменьшение длин пробега не более чем на 2 %. Аналогичное уменьшение происходит и при размещении в помещениях звукопоглощающих образцов.

Результаты расчета КЗП ограждений помещения и образцов приведены в табл. 3. Расчет выполнен по выражениям (10)–(12) с использованием времени реверберации и средних длин свободного пробега, полученных на основе компьютерного моделирования.



Таблица 3

**Рассчитанные значения коэффициентов звукопоглощения ограждений и образца**

Обозначение	При зеркальном отражении звука			При диффузном отражении звука		
	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем	Без ЗПМ	Образец со ЗПМ	ЗПМ в среднем
1	2	3	4	5	6	7
Помещение в форме прямоугольного параллелепипеда (вариант 1)						
$\alpha_{\text{теор}}$	0,03	0,0785	0,0785	0,03	0,0785	0,0785
$\alpha_{\text{к}}$	0,022	0,027	0,053	0,03	0,079	0,0765
$\alpha_{\text{об}}$			0,500		1,01	0,96
Помещение в виде трапеции (вариант 2)						
$\alpha_{\text{теор}}$	0,03	0,0773	0,0773	0,03	0,0773	0,0773
$\alpha_{\text{к}}$	0,027	0,033	0,0675	0,03	0,077	0,0764
$\alpha_{\text{об}}$			0,830		1,00	0,981
Коэффициенты звукопоглощения: $\alpha_{\text{теор}}$ – теоретическая величина на основе арифметического усреднения исходных КЗП помещения и образца; $\alpha_{\text{к}}$ – средний КЗП ограждений помещения с образцом или без образца; $\alpha_{\text{об}}$ – КЗП образца, рассчитанный по выражению (12)						

Как видно, зеркальная модель отражения не дает возможность получить реальные значения КЗП образца. Поэтому далее анализируются только результаты, полученные при диффузном отражении звука.

Следует отметить полное совпадение полученных значений КЗП образца с исходным значением, равным  $\alpha = 1,0$ . Это объясняется пропорциональным снижением времени реверберации и средней длины свободного пробега звука относительно теоретических значений. Величина КЗП зависит от их соотношения  $\alpha = f(l/T)$ .

Результаты компьютерного моделирования показали, что параметры звукового поля даже при диффузном отражении звука от ограждений отличаются от параметров идеального диффузного поля. Отклонение параметров находится в диапазоне 3 %. Этими отклонениями можно пренебрегать, когда исследуемый образец не обладает высоким звукопоглощением.

Если предположить, что измеренное время реверберации в камере с образцом соответствует математическому моделированию, то есть ниже определяемого по формуле Эйринга примерно на 3 %, а при обработке экспериментов используется стандартная длина свободного пробега как для диффузного поля по выражению (14), то есть больше компьютерного значения примерно на 2 %, величина КЗП образца, определяемая по формулам (10)–(12), может возрасти примерно на 5 %. При высокой эффективности звукопоглощающего образца это может давать величину КЗП больше единицы. В этом случае экспериментальные значения КЗП следует корректировать путем умножения на коэффициент 0,95.

Таким образом, выполненные на основе компьютерного моделирования исследования параметров звуковых полей реверберационных камер указывают на необходимость повышения точности определения акустических параметров эффективных звукопоглощающих материалов, вычисляемых по результатам экспериментальных данных. Это позволит избежать получения значений коэффициентов звукопоглощения образцов больше единицы.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 31705-2011 (EN ISO 11654:1997) Материалы звукопоглощающие, применяемые в зданиях. Оценка звукопоглощения : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. N 1521-ст. : дата введения 2013-07-01 – Москва : Стандартинформ, 2013. – 12 с.
2. Михель, В. П. Звукопоглощающие материалы и их назначение / В. П. Михель // Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г. Л. Осипов, Е. Я. Юдин, Г. Хюбнер [и др.] ; под редакцией Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина. – Москва : Стройиздат, 1987. – С. 316–403.
3. Фурдуев, В. В. Обзор методов оценки и измерения диффузности звукового поля / В.В. Фурдуев // Акустический журнал. – 1955. – Том 1, выпуск 4. – С. 299–314.
4. Фурдуев, В. В. Измерение диффузности звукового поля в помещениях методом направленного микрофона / В. В. Фурдуев, Чен Тун // Акустический журнал. – 1960. – Том V, выпуск 1. – С. 107–115.
5. Холодова, С. В. Метод акустической интенсивности для исследования структуры звуковых полей : 01.04.06 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Холодова Светлана Владимировна. – Москва, 1993. – 111 с.
6. Антонов, А. И. Условия, определяющие процессы формирования шумового режима в замкнутых объемах, и их учет при оценке распределения звуковой энергии в помещениях / А. И. Антонов, А. В. Бацунова, И. Л. Шубин // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2015. – № 3 (35). – С. 89–96.
7. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва : Директмедиа Паблишинг, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-4499-2953-2.

**ANTONOV<sup>1</sup> Aleksandr Ivanovich, doctor of technical sciences, leading researcher; GUSEV Vladimir Petrovich<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, leading researcher; LEDENEV Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the chair of urban planning and roads<sup>2</sup>; leading researcher<sup>1</sup>; MATVEEVA Irina Vladimirovna<sup>2</sup>, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of urban planning and roads**

### **IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENT PROCESSING WHEN DETERMINING THE SOUND ABSORPTION COEFFICIENTS OF MATERIALS IN THE REVERBERATION CHAMBER**

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Tel.: (495) 482-40-16.

<sup>2</sup>Tambov State Technical University.

112-E, Michurinskaya St., Tambov, 392032, Russia.

Tel.: (4752) 63-09-20, (4752) 63-03-72; e-mail: gsiad@mail.tambov.ru

*Key words:* sound reverberation, sound absorption coefficient; reverberation chamber; computer simulation of reverberation.



*Suggestions are given for clarifying the methodology for determining the sound absorption coefficient of material samples in a reverberation chamber according to GOST 31704-2011. The structure of the sound fields of reverberation chambers has been analyzed by computer modeling methods, and the influence of various factors on the sound field diffusivity and the accuracy of determining the sound absorption coefficients of materials has been studied.*

#### REFERENCES

1. GOST 31705-2011 (EN ISO 11654:1997) Materialy zvukopogloshchayushchie, primenyaemye v zdaniyakh. Otsenka zvukopogloshcheniya [Sound-absorbing materials used in buildings. Sound absorption assessment]: Moscow, Standartinform, 2013, 12 p.
2. Mikhel V. P., Osipov G. L., Yudin E. Ya., Hyubner G. [et al.] Zvukopogloshchayushchie materialy i ikh naznachenie: Snizhenie shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh [Sound-absorbing materials and their purpose: Noise reduction in buildings and residential areas]: Stroyizdat, 1987. P. 316–403.
3. Furduev V. V. Obzor metodov otsenki i izmereniya diffuznosti zvukovogo polya [An overview of methods for assessing and measuring the diffusivity of the sound field]. Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Magazine]. 1955, Vol 1, Issue 4, P. 299–314.
4. Furduev V. V., Chen Tun Izmerenie diffuznosti zvukovogo polya v pomeshcheniyakh metodom napravlennogo mikroфона [Measurement of diffusivity of the sound field in rooms by directional microphone method]. Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Magazine]. 1960, Vol. 5, Issue 1, P. 107–115.
5. Holodova S. V. Metod akusticheskoy intensimetrii dlya issledovaniya struktury zvukovykh poley [Acoustic intensification method for studying the structure of sound fields]: dissertatsiya kand. tekhn. nauk: 01.04.06. Moscow, 1993, 111 p.
6. Antonov A. I., Bacunova A. V., Shubin I. L. Usloviya, opredelyayushchie protsessy formirovaniya shumovogo rezhima v zamknutykh obemakh, i ikh uchet pri otsenke raspredeleniya zvukovoy energii v pomeshcheniyakh [Conditions determining the processes of formation of a noise regime in closed volumes, and their consideration in assessing the distribution of sound energy in rooms]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. 2015, № 3 (35), P. 89–96.
7. Antonov A. I., Ledenev V. I., Matveeva I. V., Shubin I. L. Raschety shuma v grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniyakh pri zerkalno-diffuznom otrazhenii zvuka ot ograzhdeniy [Noise calculations in civil and industrial buildings with mirror-diffuse reflection of sound from fences]. Moscow, Direktmedia Publishing, 2022, 192 p.

© А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, 2025

Получено: 17.09.2025 г.