

Уже более века классическим параметром, определяющим акустическое качество помещения по примерному субъективному восприятию, является время реверберации T_p , которое по У.Сэбину устанавливает простую связь между объемом V помещения и имеющимся в нем эквивалентным звукопоглощением A_{Σ} . Последнее, в свою очередь, определяет величину $T_p(f)$ и зависимость от частоты f за счет некоторой фиктивной величины $\bar{\alpha}(f)$ — среднего стационарного коэффициента звукопоглощения. Усреднение $\bar{\alpha}(f)$ по всей площади S ограничивающих поверхностей помещения выполняется с учетом действительных $\alpha_i(f)$ коэффициентов звукопоглощения (КЗП) на отдельных участках поверхности с площадями S_i , количеством n_3 и КЗП слушателей $\alpha_3(f)$, а также других объемных или плоских элементов n_3 , обладающих соответствующими $\alpha_3(f)$, то есть:

$$A_{\Sigma}(f) = \bar{\alpha}(f)S \approx \sum \alpha_i(f)S_i + \sum \alpha_3(f)n_3 + \sum \alpha_3(f)n_3. \quad (1)$$

В (1) величина и частотная зависимость $\bar{\alpha}(f)$ являются наиболее неопределенными при расчете оптимальных значений $T_{po}(f)$ для заданных объемов и назначений помещений. Во времена У. Сэбина считалось вполне допустимым иметь $\bar{\alpha}(f) \leq 0,2$, что более или менее соответствовало статистической теории архитектурной акустики, где звуковое поле в помещении, без учета поля «прямого» звука источников малой акустической мощности, характеризовалось как диффузное, т.е. однородное и изотропное.

С появлением формулы Эйринга для T_p , где появился $\bar{\alpha} = \ln(1 - \bar{\alpha})$ — средний ревербационный коэффициент звукопоглощения при величине $\bar{\alpha}(f) > 0,2$, энергетического фактора формирования диффузного поля (ДП) оказалось уже недостаточно. Так появились дополнительные ограничения в линейных (пространственных) размерах помещений — их соразмерность и превышение длины волны звуковых сигналов на низких частотах; во времени — возникновение ДП только после $\Delta t \geq 2 \cdot 10^3 \sqrt{V}$; по нижней граничной частоте $f_n \geq 2 \cdot 10^3 (T_p/V)^{1/2}$ и ряде других [1-5].

В научных работах НИИСФ и ряде работ зарубежных акустиков, посвященных сравнительному анализу соответствия данных расчета T_p по формулам Сэбина и Эйринга, результатам акустических измерений, показано, что основными причинами их расхождения является влияние значительно фонда звукопоглощения за счет слушателей и заметное изменение КЗП звукопоглощающих материалов и конструкций (ЗПМК) при их размещении на различных поверхностях. Наибольшее зву-

копоглощение (большая площадь и наименьшее расстояние до слушателей), как правило, обеспечивает акустическая обработка потолков, что в совокупности со звукопоглощением слушателей приводит к существенной неоднородности звуковых полей, особенно в помещениях малого объема (до 200...300 м³).

Для определенной нейтрализации этого эффекта на практике во второй половине прошлого века Фитцроем [6] была предложена формула для T_p , учитывающая местоположение ЗПМК на поверхностях помещения, параллельных осям x, y, z трехмерной системы координат.

$$T = \left(\frac{x}{S}\right) \left(\frac{0,163V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)}\right) + \left(\frac{y}{S}\right) \left(\frac{0,163V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)}\right) + \left(\frac{z}{S}\right) \left(\frac{0,163V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)}\right), \quad (2)$$

где x, y, z — площадь пары поверхностей, параллельных, соответственно, осям x, y, z ; $\bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y, \bar{\alpha}_z$ — среднеарифметическое значение КЗП соответствующей пары стен.

Фитцрой рассматривает затухание звукового поля как совокупность трех одновременных затуханий между парами параллельных стен помещения, что приводит к зависимости частных слагаемых в (2) от доли этих поверхностей в общей площади помещения. Как отмечено в работе [7], эта зависимость часто приводит к ложным результатам в практике измерений на моделях помещений.

Меньшее расхождение результатов расчета и измерений T_p обеспечивает мультипликативная формула Арау-Гичадеса [8], использованная кафедрой акустики СПбГУКиТ при измерениях по И.Иордану [9] и переоборудовании трех помещений, правда, большого объема (2-3)10³ м³: Юсуповского дворца и двух зрительных залов кинотеатров «Колизей» и «Паризиане» в г. С.-Петербурге [10].

Арау, так же как и Фитцрой, полагал, что неравномерность звуковых полей в помещениях с заметным звукопоглощением ($\bar{\alpha}(f) > 0,2$) обусловлена влиянием направленных потоков звуковой энергии с различной скоростью затухания в последовательных отрезках времени реверберации после прекращения действия источника звука. Для помещений нормального типа в виде параллелепипеда он выделил три таких потока по соответствующим осям x, y, z . В этом случае затухание плотности средней энергии в помещении обусловлено процессом трех одновременных затуханий энергии $E_x(t), E_y(t), E_z(t)$ между тремя парами взаимно параллельных стен, то есть $E(t) = E_x(t) + E_y(t) + E_z(t)$.

Здесь каждая составляющая всей средней энер-

гии затухания $E(t)$ определяется суммой «одномерных» затуханий энергии по соответствующим координатам и описываются выражениями вида

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_{x,0} \exp(-V_x \bar{\alpha}_x t), \\ E_y(t) &= E_{y,0} \exp(-V_y \bar{\alpha}_y t), \\ E_z(t) &= E_{z,0} \exp(-V_z \bar{\alpha}_z t), \end{aligned} \quad (3)$$

где соответственно средние ревербационные КЗП на поверхностях x, y, z ; V_x, V_y, V_z — соответственно средние числа отражений от пар параллельных поверхностей по осям x, y, z .

Нормализация средней энергии $E(t)$ по всем направлениям осуществляется с помощью нормально-логарифмического распределения с заменой в экспонентах $\bar{\alpha}_i$ на $\lg \bar{\alpha}_i$ и связью среднего ревербационного КЗП для анизотропных и однородных полей в помещениях со взвешенными по относительным площадям $x/S, y/S, z/S$ частных КЗП по трем осям при логарифмическом распределении

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_x^{x/S} \cdot \bar{\alpha}_y^{y/S} \cdot \bar{\alpha}_z^{z/S}. \quad (4)$$

Окончательно, используя обычные преобразования вида $\ln[E(t)/E_0] = v \cdot \bar{\alpha}$, где v — среднее число всех отражений в единицу времени, учитывая (3) и (4), можно получить формулу Арау для времени стандартных ревербераций, когда $E(T_p)/E_0 = 10^{-6}$, т.е.

$$\begin{aligned} T_p^A &= \left(\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_x)} \right)^{x/S} \times \\ &\times \left(\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_y)} \right)^{y/S} \times \\ &\times \left(\frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right)^{z/S}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно, по существу (5) выражает переход от формально произвольного распределения ЗПМК на поверхностях помещений нормальных объемов и формы при расчете по стандартизированной формуле Эйринга [11] к более определенному их размещению по крайней мере на трех парах взаимно параллельных плоскостей.

Возможность использования формулы Арау для расчета реверберации T_p^A для помещений малого объема в области низких частот была выполнена нами в двух групповых аудиториях 3530 (20 мест) и 3548 (30 мест) третьего корпуса СПбГУКиТ путем сравнения с T_p^{Φ} (по Фитцрою), $T_p^{\text{Э}}$ (по Эйрингу) и результатами типовых акустических измерений [12].

Аудитория 3530 имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами: $L = 5,8$ м, $B = 5,5$ м, $H = 3,17$ м. Объем помещения $V = 101,1$ м³, а

площадь ограничивающих поверхностей равна $S = 135,4$ м². Имеется дверь площадью 2,3 м² и два окна площадью 7,7 м². Аудитория 3548 имеет аналогичную форму размерами: $L = 8,7$ м, $B = 5,6$ м, $H = 3,2$ м. Объем помещения $V = 155,9$ м³, площадь поверхностей $S = 188,9$ м², дверь площадью 2,645 м² и три окна площадью 11,55 м².

На основании строительных данных аудиторий без акустической обработки, кроме линолеума на полах, с наличием двухместных парт, без заполнения слушателями, рассчитывалось эквивалентное звукопоглощение по (1), где было учтено дополнительно эквивалентное звукопоглощение $A_b = 4\mu V$ за счет затуханий звука в воздухе на частотах 2 кГц и выше и низкочастотное звукопоглощение в щелях и вентиляционных отверстиях, проявляющееся на частотах 250 Гц и ниже. Тогда, соответственно, найдутся: средний стационарных КЗП $\bar{\alpha} = A_s / S$, средний ревербационных КЗП $\bar{\alpha} = \ln(1 - \bar{\alpha})$ и время стандартной реверберации по Эйрингу

$$T_p^{\text{Э}} = 0,16V / (-S \bar{\alpha}) = 0,16V / (-S \ln(1 - \bar{\alpha})). \quad (6)$$

Результаты вычислений $T_p(f)$ и составляющих по (2), (5) и (6) для двух аудиторий представлены в таблицах 1 и 2, а соответствующие графики показаны на рис. 1 (а,б).

Из таблицы и графиков на рис. 1 по расчетным зависимостям следует, что меньшая по объему аудитория 3530 в большей степени подчеркивает увеличение реверберации в области низких частот.

Процедура акустических измерений T_p , как отмечалось, проводилась в аудиториях по гостированной методике с использованием сигналов в виде октавных полос «розового» шума и выстрелов стартового пистолета. Регистрация процессов затухания звуковой энергии осуществлялась с помощью ненаправленного микрофона с последующим выходом через полосовые фильтры на самописец уровня по четырем точкам измерений. Результаты усредненных значений $T_{p,n}$ по точкам и измерительным сигналам представлены в таблице 3 и на графиках рис.2 (а, б). В целом, обобщенные результаты сравнения расчета по рассмотренным формулам с экспериментальными измерениями представлены в таблицах 4 и 5.

На основании этих данных для исследуемых помещений рассчитана ошибка расхождения времени реверберации по Арау и Фитцрою с временем реверберации по Эйрингу. На диапазоне частот 125...4000 Гц ошибка для формулы Арау для аудитории 3530 составляет 3%, для аудитории 3548 — 3,5%, ошибка для формулы Фитцроя для 3530 — 20%, для 3548 — 25%.

Параметры	Время реверберации T_p и составляющие на центральных частотах $f_{ц}$, Гц октавных полос					
	125	250	500	1000	2000	4000
T_{60}^{\ominus}	1,24	1,44	1,90	1,94	1,79	1,19
\bar{a}_x	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06	0,03
x/s	0,47					
$[T]^{x/s}$	1,13	0,04	1,21	1,17	1,15	1,25
\bar{a}_y	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
y/s	0,27					
$[T]^{y/s}$	0,97	0,98	1	1,13	1,14	1,22
\bar{a}_z	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
z/s	0,26					
$[T]^{z/s}$	1,63	1,35	1,47	1,49	1,36	1,27
T_{60}^A	1,78	1,49	1,95	1,96	1,79	1,93
T_{60}^{ϕ}	1,96	1,56	1,99	2,06	2,05	2,31

Таблица 1. Результаты расчета T_p в аудитории 3530.

Параметры	Время реверберации T_p и составляющие на центральных частотах $f_{ц}$, Гц октавных полос					
	125	250	500	1000	2000	4000
T_{60}^{\ominus}	1,28	1,51	2,04	2,13	1,98	2,03
\bar{a}_x	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05
x/s	0,52					
$[T]^{x/s}$	1,03	1,42	1,6	1,63	1,48	1,35
\bar{a}_y	0,15	0,12	1,08	1,17	1,15	1,25
y/s	0,29					
$[T]^{y/s}$	0,95	1,03	1,14	1,17	1,2	1,27
\bar{a}_z	0,11	0,09	0,06	0,07	0,06	0,03
z/s	0,11					
$[T]^{z/s}$	1,38	1,07	1,14	1,13	1,13	1,19
T_{60}^A	1,35	1,56	2,07	2,16	1,98	2,05
T_{60}^{ϕ}	1,42	1,39	1,96	2,12	2,15	2,89

Таблица 2. Результаты расчета T_p в аудитории 3548.

f , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
3548	1,81	1,40	1,58	1,33	1,43	1,18
3530	1,65	1,60	1,48	1,40	1,42	1,30

Таблица 3. Результаты измерений $T_{p,n}$ (усредненные значения) в аудиториях 3530 и 3548

f , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
Эксперим	1,65	1,6	1,48	1,4	1,42	1,3
Эйринг	1,24	1,44	1,9	1,94	1,79	1,91
Арау	1,78	1,49	1,95	1,96	1,79	1,93
Фитцрой	1,96	1,56	1,99	2,06	2,05	2,31

Таблица 4. Результаты исследований для аудитории 3530.

Мы видим наибольшую сходимость формул Арау и Эйринга, хотя известно, что формула Эйринга предназначена для расчета времени реверберации в помещении с равномерным распределением поглощающего материала, и предполагает наличие однородного и изотропного звукового поля. Однако условия диффузного звукового поля в реальных помещениях не всегда выполняются. Неоднородная и анизотропная картина звукового поля, установившаяся в помещении, которую невозмож-

но объяснить традиционными статистическими теориями, появляется из-за неравного распределения скорости затухания звука, отраженного от каждой стены помещения после того, как будет выключен источник звука, из-за потери звуковыми лучами неравного количества энергии в равные интервалы времени. Очевидно, в этом случае более правильной является формула Арау, а именно, только усредненное по площади среднее геометрическое коэффициентов звукопоглощения, пропорциональ-

f, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
Эксперим	1,81	1,4	1,58	1,33	1,43	1,18
Эйринг	1,28	1,51	2,04	2,13	1,98	2,03
Арау	1,35	1,56	2,07	2,16	1,98	2,05
Фитцрой	1,42	1,39	1,96	2,12	2,15	2,89

Таблица 5. Результаты исследований для аудитории 3548.

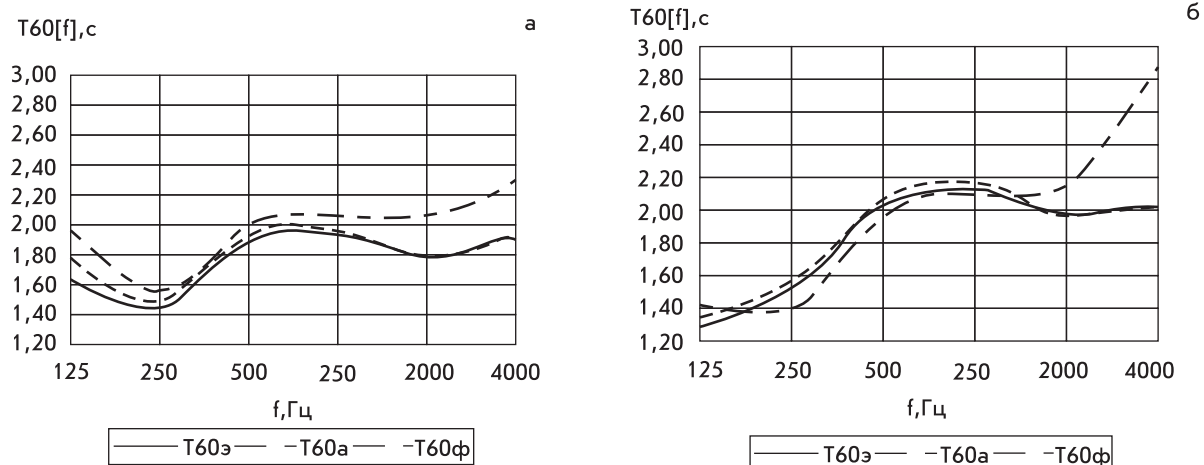


Рисунок 1. Частотные зависимости T_p по формулам Эйринга, Арау и Фитцроя в двух аудиториях: а — аудитория 3530; б — аудитория 3548.

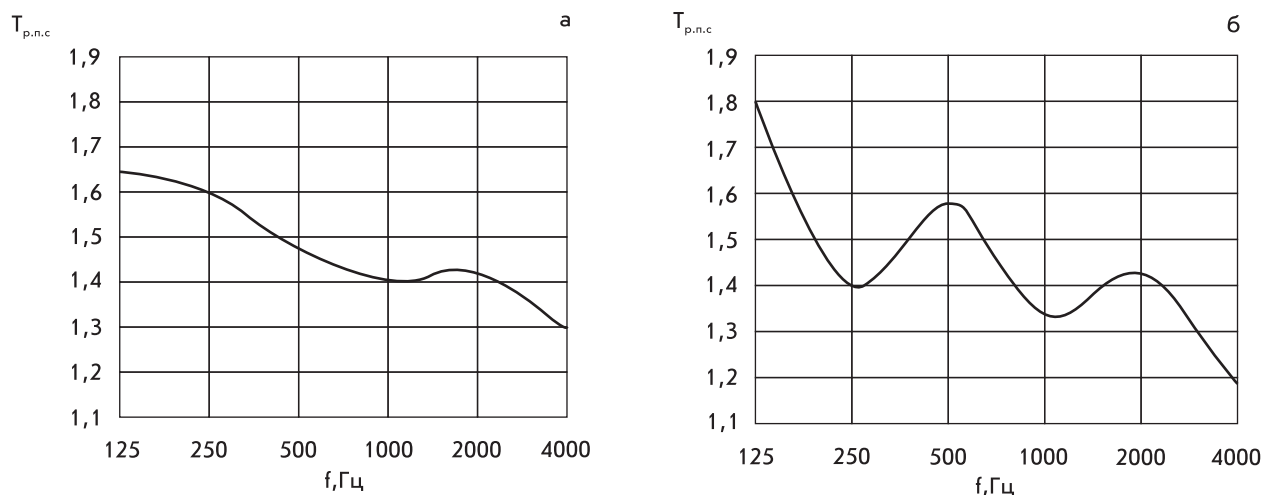


Рисунок 2. Частотные характеристики измеренных $T_{p,n}$ в аудиториях 3548 и 3530: а — аудитория 3530; б — аудитория 3548.

ных скорости затухания звукового поля, даст нам возможность симметризации величин распределения затухания неоднородного звукового поля, приближая его к нормальному статистическому распределению. Это усредненное по площади среднее геометрическое дает результаты вычислений, совпадающие с традиционными формулами поглощения, известными для однородного и анизотропного звукового поля, и, следовательно, для равномерного распределения поглощения; чего нельзя сказать о среднем арифметическом (формула Фитцроя), которое дает слишком большие значения.

Еще одно преимущество формулы Арау заключается в том, что она учитывает свойства площади и местоположения поглощающего материала в помещении, а следовательно, возможность определения скорости затухания энергии и скорости звукопоглощения по трем направлениям в помещении.

Обратимся теперь к экспериментальным данным времени реверберации. Между расчетными данными и экспериментальными есть небольшое отличие. Основная причина этого заключается в проблеме определения коэффициентов звукопоглощения всех материалов, находящихся в помещении. На сегодняшний день существует трудность в определении частотной зависимости коэффициентов звукопоглощения от частоты в помещениях малого объема. Вторая не менее важная причина — учет добавочного поглощения на низких частотах. Если в формуле Эйринга добавочное поглощение определяется как $\alpha_{доб} S$, где S — площадь всех поверхностей помещения, то в формуле Арау добавочное поглощение было учтено по трем направлениям пары параллельных стен, т.е. $\alpha_{доб} 2S_{стен}$.

На высоких частотах мы имеем дело с затуханием звука в воздухе, т.е. коэффициентом μ , который связан с длиной свободного пробега $l_{ср} = 4V / S$. В формуле Эйринга присутствует одна средняя длина свободного пробега, Арау упоминает длину свободного пробега для трех направлений в помещении, учитывая тем самым затухание звуковой энергии по осям x , y , z .

Возможно, вышеуказанные причины и дают расхождение расчетных значений времени реверберации в формулах Эйринга и Арау в области низких и высоких частот. Область средних частот (250...2000 Гц) имеет оптимальные значения T_{60} , которые с минимальным расхождением (3%) удовлетворяют

трем методам расчета, использованным в данной работе для анализа реверберационного процесса в помещениях малого объема.

Таким образом, формула Арау применима для расчета времени реверберации в помещениях малого объема для низких частот.

Список литературы

1. Кремер Л. Объем информации, требуемой для акустической характеристики помещения. Сб. «Проблемы современной акустики». — М.: Изд. АН СССР, 1963.
2. Schoeder M.R. Frequency — correlation functions of Frequency Responses of rooms. JASA., Vol.34, 1962.
3. Щиржецкий Х.Л., Макриненко Л.И. Основные направления развития исследований и оценки акустического качества зрительных залов. — М.: Сб. науч. трудов НИИСФ, 1980.
4. Сергеев М.В., Косинова В.Е. Исследование применимости формулы Эйринга к описанию реверберации в несоразмерных помещениях. — М.: Сб. науч. трудов НИИСФ, 1983.
5. Макриненко Л.И., Сергеев М.В., Косинова В.Е. Совершенствование расчета реверберации в закрытых помещениях. — М.: Сб. науч. трудов НИИСФ, 1989.
6. Fitzroy D. Reverberation Formula which seems to be More Accurate with Nonuniform Distribution of Absorption. JASA, 31, вып. 7, 1959.
7. Борисов Л.А., Смирнова Т.И. Оценка формулы реверберации Фитцроя.-М.:Сб. науч. трудов НИИСФ, 1980.
8. Arau — Puchades H. An Improved Reverberation Formula. — Acustica, Vol. 65, вып. 4, 1988.
9. Йордан В.Л. Акустическое проектирование концертных залов и театров (пер. с англ. С.А.Хомутова). Под ред. Л.И.Макриненко. — М.: Стройиздат, 1986.
10. Давыдов В.В., Щевьев Ю.П. Отчет по акустическим измерениям и рекомендации для улучшения качества звукопередачи в Юсуповском дворце. — Л.: Изд. ЛИКИ, 1990.
11. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. — М.: Госстрой России, 2004.
12. ГОСТ 24149-89. Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации. — М.: Изд. стандартов, 1989.