

К вопросу объективной оценки акустики связанных помещений

Х. А. Щиржецкий, В. М. Алешкин,* А. О. Субботкин,† В. Н. Сухов‡

*Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, д. 21*

(Статья поступила 14.07.2017; Подписана в печать 18.09.2017)

В работе на основании комплекса натурных измерений показана практическая применимость предложенного метода расчета реверберации связанных помещений. Отмечена особая полезность метода при акустическом проектировании зальных помещений с трансформируемой перегородкой между ними. В качестве подтверждения приводятся результаты экспериментальной проверки предложенных оценок на основе проведенных авторами натурных акустических измерений в помещениях Дворца Искусств «Нефтяник» в г. Сургут.

PACS: 43.55

УДК: 534.843

Ключевые слова: акустика, реверберация, связанные помещения, акустические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме разработки оптимальных методов акустического проектирования связанных помещений в разные годы было уделено достаточное внимание специалистов разных стран [1–3], однако все эти работы носят в основном теоретический характер или вследствие сложных методов расчетов [1, 2], или же необходимости использования специального программного обеспечения [3]. В этом плане заслуживает внимания разработка одного из авторов настоящей работы, результаты которой позволяют при помощи простых расчетов оценить взаимное влияние связанных помещений по основному параметру акустики залов — времени реверберации [4].

1. УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА АКУСТИКИ СВЯЗАННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Главным условием применимости методов данной работы является возможность использования в исследуемом помещении принципов статистической акустики, т.е. формул Сэбина–Эйринга.

При этих условиях расчетными параметрами для оценки процесса реверберации в связанных объемах являются:

1. общие геометрические параметры каждого помещения (общий воздушный объем, общая площадь ограждений);
2. средний коэффициент звукопоглощения (КЗП) в нормируемом диапазоне частот;
3. площадь проема между исследуемыми помещениями.

Такой подход позволяет произвести расчет логарифмического хода экспоненциальной огибающей процесса отзвука по формуле (1), при условии возбуждения звука в помещении V_1 и присоединенном объеме V_2 [4]:

$$L_1(t) = 10 \lg \{ e^{\sigma_1 t} + Q_{1-2} e^{\sigma_2 t} \} \quad (1)$$

где $\sigma_1 = \frac{cS'_1}{4V_1} \ln(1 - \bar{\alpha}_1)$ — постоянная затухания звука в исследуемом помещении V_1 ; $\sigma_2 = \frac{cS'_2}{4V_2} \ln(1 - \bar{\alpha}_2)$ — постоянная затухания звука в присоединенном объеме V_2 .

В свою очередь $S'_1 = S_1 - S_{1-2}$ и $S'_2 = S_2 - S_{1-2}$ — площади ограждений помещений V_1 и V_2 , а S_{1-2} — площадь проема между ними; c — скорость звука в воздухе; $\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$ — средние КЗП помещений V_1 и V_2 в нормируемом диапазоне средних частот.

Особого внимания заслуживает параметр Q_{1-2} — коэффициент связи между помещениями V_1 и V_2 , определяемый по формуле:

$$Q_{1-2} = \frac{S_{1-2}^2}{(\bar{\alpha}_1 S'_1) \cdot (\bar{\alpha}_2 S'_2)} \quad (2)$$

Использование формул (1) и (2) на стадии проектирования для графического анализа хода отзвука в связанных помещениях позволяет с помощью аппроксимации оценить время реверберации в каждом из них, а при неравномерном ходе процесса реверберации определить точки перелома отзвука и сопоставить влияние реверберации на отдельное восприятие звука в каждом из связанных объемов.

Систематизация данных расчетов и измерений времени реверберации в связанных помещениях, проведенная в последние годы, позволила прийти к следующим выводам, дающим возможность на стадии проектирования предварительно оценить влияние одного помещения на другое.

1. При весьма малых значениях коэффициентов связи между помещениями ($Q_{1-2} \leq 0.1 \div 0.2$), влияние одного помещения на другое незначительно и расчет реверберации в каждом из них

*E-mail: wsjk@mail.ru

†E-mail: subov-an@yandex.ru

‡E-mail: svn36@mail.ru

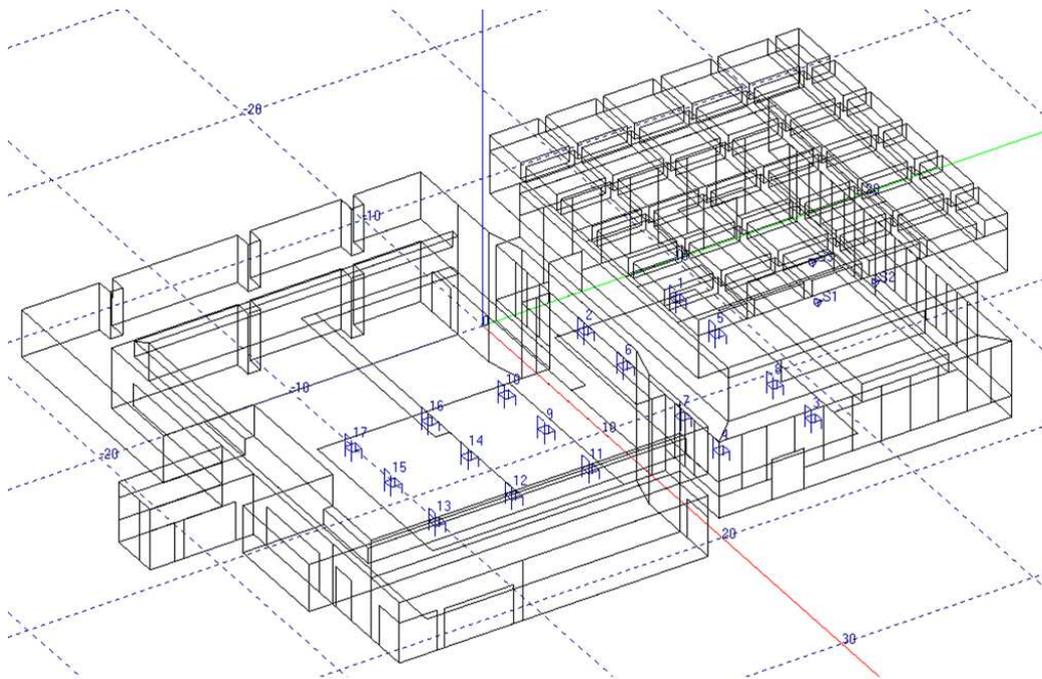


Рис. 1: Изометрия многофункционального зала (справа) и его фойе (слева)

следует проводить изолированно, с введением в процедуру расчетов поглощение проема S_{1-2} с КЗП $\cong 0.3$.

2. При больших значениях коэффициента связи определяющим является соотношение следующих характеристик:

- Соотношение не только геометрических параметров помещений (объемы и площади), но и, главное, их эквивалентной площади звукопоглощения (ЭПЗ), т.е. $A_1 = \bar{\alpha}_1 S_1$ и $A_2 = \bar{\alpha}_2 S_2$;

- Место размещения основного источника звука, назначение помещений и характеристики звукоизлучения.

3. Кроме двух указанных случаев соотношения реверберации связанных объемов, существует еще и третий, наиболее показательный случай, когда одна из постоянных затухания намного больше другой, например $\sigma_1 \gg \sigma_2$. Тогда, даже при весьма малых коэффициентах связи ($Q_{1-2} \leq 0.1$), на характер отзвука в основном влияет более гулкое помещение, и возникает перелом реверберации в самом начале отзвука, формально определяющий некоторое увеличение реверберационного процесса.

2. ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ С ПОМОЩЬЮ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки правильности приведенных выводов ниже будут представлены результаты натуральных измерений в двух смежных помещениях недавно введенного в эксплуатацию Дворца Искусств «Нефтяник» в г. Сургут. Объектами исследований были следующие залы (рис. 1):

1. многофункциональный зал (МФЗ) с объемом $\sim 2640 \text{ м}^3$ и площадью ограждений $\sim 1054 \text{ м}^2$;
2. зал фойе, с объемом $\sim 3400 \text{ м}^3$ и площадью ограждений $\sim 1500 \text{ м}^2$

Жесткая трансформируемая перегородка (проем) между залами имеет площадь $\sim 40 \text{ м}^2$ и раздвигается во время больших представлений для увеличения количества зрителей.

Программа эксперимента состояла в сравнительном анализе результатов измерений стандартного времени реверберации при закрытой и открытой перегородке, с данными графо-аналитических построений, произведенных по формуле (1), со значениями КЗП ($\bar{\alpha}$) в диапазоне частот $500 \div 2000 \text{ Гц}$, полученными из результатов измерений.

Сама процедура измерений проводилась в соответствии с методикой [5]. В качестве источника звука применен ненаправленный акустический излучатель. В качестве тестового сигнала применялась псевдослучайная последовательность (MLS). Импульсный отклик помещения записывался с помощью микрофона, откуда далее поступал через внешнюю звуковую карту

на ноутбук с установленным программным комплексом EASERA. Необходимо отметить, что результаты измерений представляются в данной программе в табличной и графической формах, без возможности проводить вручную процесс аппроксимации отзвуков. Всего в помещениях МФЗ и фойе было выбрано 19 точек измерений (R01-R19), в которых располагался микрофон, и три положения источника (S1-S3), схема которых приводится на рис. 2. На рис. 3 приводится иллюстрация процесса измерений (вид из точки S3 в сторону фойе).

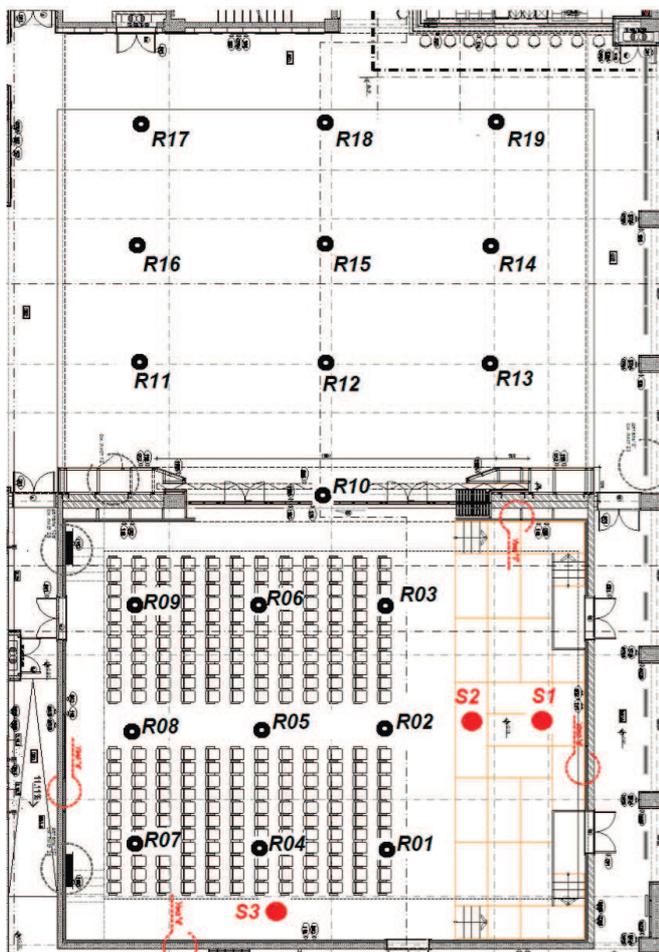


Рис. 2: Схема акустических измерений в многофункциональном зале и его фойе

Ниже, в табл. 1, представлены данные натурных измерений частотных характеристик времени реверберации указанных помещений и их средних значений в диапазоне 500 ÷ 2000 Гц, использованных для получения значений $\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$, для введения их в расчеты по формулам (1) и (2).

В результате таких расчетов для связанных помещений МФЗ и фойе, при условии восприятия реверберации в помещении МФЗ, была получена следующая формула процесса отзвука:

$$L_{\text{МФЗ}}(t) = 10 \lg \{ e^{-11,6t} + 0,04e^{-4t} \} \quad (3)$$



Рис. 3: Вид из МФЗ на проем между залом и фойе (ненаправленный источник в положении S3)

Построение графика отзвука, проведенное по методике [4], позволило прийти к следующим выводам:

1. в спаде отзвука наблюдается заметный перелом, начиная с 250-300 мс после прихода прямого звука;
2. аппроксимация всего хода отзвука при этих условиях приводит к показанию времени реверберации, близкому к 1.7 с.

Следует отметить, что исследуемый случай соответствует варианту 3 из вышеуказанных соотношений реверберации в связанных объемах ($\sigma_1 \gg \sigma_2$).

Измеренные в помещениях уровни звукового давления в дБ (dB SPL) извлекались с помощью программы EASERA из графиков огибающих в двух режимах — из кривой спада, сглаженной по методу Шредера и из огибающей звуковой энергии в логарифмическом представлении — ETC (*log-squared*).

Особо интересными оказались значения локальных оценок времени реверберации по Шредеру, которое является показателем субъективного восприятия гулкости звучания в отдельных зонах зала.

На рис. 4,а приводятся теоретически рассчитанные отзвуки в МФЗ и в фойе, согласно формулам (1)–(3), в отдельности, а также в связанном режиме. Спустя 250-300 мс после начала отсчета можно увидеть перелом, начиная с которого характер отзвука в МФЗ приближается к виду отзвука в фойе. На рис. 4,б показаны логарифмические ходы отзвуков для тех же помещений, полученные экспериментальным способом и приведенные к тому же масштабу, что и на рис. 4,а. Вид отзвуков и положение перелома хорошо совпадают с данными теоретических расчетов (на рис. 4,б видно, как изначально отзвук в связанном режиме идет параллельно отзвуку в МФЗ, а затем отклоняется и идет параллельно отзвуку в фойе).

Таблица I:

Вариант	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц						Среднее RT, с для диапазона 500÷2000Гц
	125	250	500	1000	2000	4000	
МФЗ (перегородка закрыта)	1.09	0.99	0.86	0.90	0.91	0.74	0.89
МФЗ+фойе (перегородка открыта)	1.43	1.32	1.65	1.83	1.81	1.47	1.76
Фойе (перегородка закрыта)	1.86	1.85	2.68	2.97	2.93	2.41	2.83

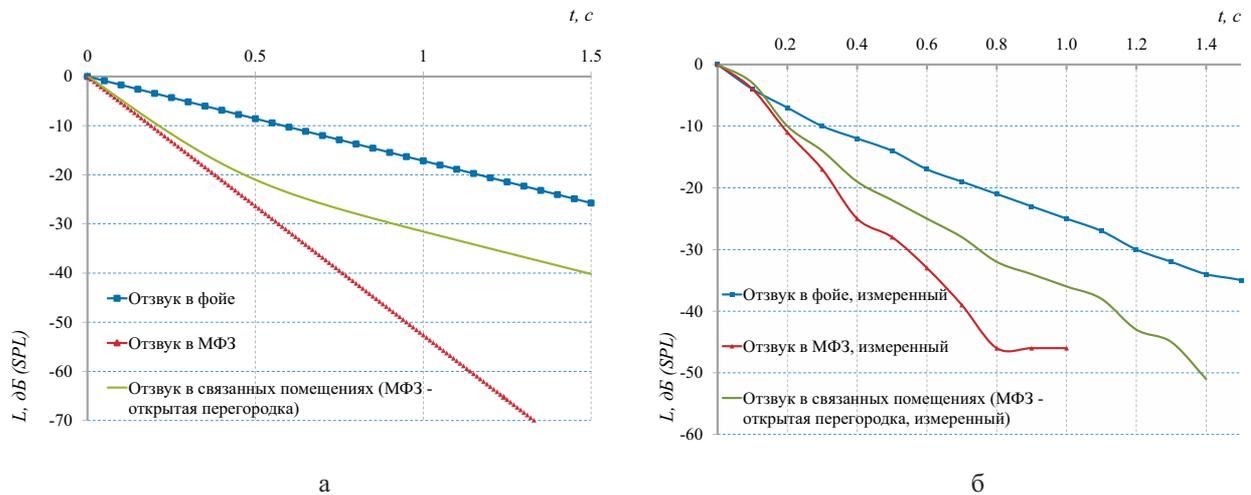


Рис. 4: а — Теоретически построенный отклик в исследованных помещениях в соответствии с формулами (1)–(3). Красная линия (нижняя) — отклик в МФЗ, синяя (верхняя) — отклик в фойе, зеленая (в центре) — отклик в МФЗ, связанном с фойе открытым проемом. б — Экспериментально полученные отклики в исследованных помещениях

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение данных измерений и графоаналитического расчета времени реверберации и логарифмического хода отзвуков в помещениях МФЗ и его фойе позволило прийти к следующим выводам:

1. Упрощенный метод должен быть необходимым дополнением при расчетах времени реверберации акустически связанных помещений, как условие возможности применения стандартных методов расчета времени реверберации изолированно для

каждого из помещений, с целью оценочного расчета на предварительных стадиях проектирования.

2. Точность упрощенного метода также является вполне достаточной, так как в исследованных залах наблюдались нарушения диффузности звукового поля в виде поздних отзвуков, эхообразований и т.п., однако совпадение результатов теоретических расчетов и их экспериментальной проверки является весьма высоким.

[1] Морз Ф., Болт Р. УФН. 1947. XXXII, вып. 2–4. (Morz F., Bolt R. Sound waves in rooms (translated). UFN. 1947. XXXII, N 2–4.)
 [2] Kuttruff H. Room Acoustics. New-York, 1972. (Kuttruff H. Room Acoustics New-York. 1972)
 [3] Жоголева О.А. Разработка методов расчета шума для проектирования строительно-акустических средств шумозащиты в системах акустически связанных поме-

щений гражданских зданий». Автореферат на соискание уч. степени канд. техн. наук. М.: НИИСФ, 2016. (Zhogoleva O. A. «Razrabotka metodov rascheta shuma dlya proektirovaniya stroitelno-akusticheskikh sredstv shumozaschity v sistemakh akusticheski svyazannykh pomeshcheniy grazhdanskikh zdaniy». Avtoref. na soiskaniye uch.stepeni kand.techn.nauk. М.: NIISF. 2016.)
 [4] Щиржецкий Х.А. «Труды НИИСФ». 1989. С. 38.

(Schirjetsky Kh. A. Uproschennyi metod rascheta reverberatsii svyazannykh pomeshcheniy. «Trudy NIISF». 1989. P. 38.)

- [5] ГОСТ Р ИСО 3382-1- 2013. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Театрально-концертные залы (идентичен международному стандарту ISO 3382-

1:2009 Measurement of room acoustic parameters. Part 1 — Performance spaces). (GOST R ISO 3382-1-2013. Izmereniye akusticheskikh parametrov pomeshcheniy. Chast 1. Teatralno-koncertnyie zaly (identic to ISO 3382-1:2009 Measurement of room acoustic parameters. Part 1).

To the issue of objective evaluation of combined rooms' acoustics

Ch. A. Schirjetsky¹, V. M. Aleshkin^{1,a}, A. O. Subbotkin^{1,b}, V. N. Soukhov^{1,c}

Research institute of building physics of Russian academy of architecture and building science (NIISF RAASN). Moscow, 127238, Russia

E-mail: ^awsjk@mail.ru, ^bsubov-an@yandex.ru, ^csvn36@mail.ru

In the article is shown, according to a complex of acoustic measurements, a practical application of method of combined rooms' reverberation calculation method. Essential usefulness of the method is marked at acoustic designing of combined halls with a transforming barrier between them. Also the results of experimental approval for proposed methods are shown, after acoustic measurements brought by authors in a complex of combined rooms of multifunctional hall and its foyer as a part of the Palace of arts «Neftyanik» in Surgut, Russia.

PACS: 43.55

Keywords: acoustics, reverberation, combined rooms, acoustic measurements

Received 14 July 2017.

Сведения об авторах

1. Щиржецкий Христофор Алексеевич — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 422-02-76.
 2. Алешкин Василий Михайлович — аспирант (соискатель), мл. науч. сотрудник; e-mail: wsjk@mail.ru.
 3. Субботкин Антон Олегович — мл. науч. сотрудник; e-mail: subov-an@yandex.ru.
 4. Сухов Вадим Николаевич — ст. науч. сотрудник; e-mail: svn36@mail.ru.
-