

## Оценка качества и улучшение акустической среды в учебной аудитории

*С.Д. Горчакова, А.П. Сапожников*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва*

**Аннотация:** Исследование времени реверберации в разных типах учебных аудиторий с использованием теоретических расчетов и программного моделирования, определение способа улучшения акустической среды в аудитории.

**Ключевые слова:** акустика, акустика аудитории, время реверберации, разборчивость речи, коэффициент звукопоглощения, компьютерное моделирование, древесная шерсть.

Благоприятный акустический режим в аудитории позволяет обеспечивать передачу речевой информации от лектора к студентам на должном уровне. Низкий уровень восприятия речевой информации является признаком неудовлетворительной акустики помещения и может привести к эмоциональным срывам среди студентов. Акустика помещений оценивается рядом параметров, которые должны соответствовать требованиям.

К главным факторам, влияющим на акустику, относят артикуляцию и время реверберации. Артикуляция – разборчивость речи, является мерой того, насколько понятна речь в данных условиях. Общий стандарт для измерения качества разборчивости речи является индекс передачи речи (STI). Метод определения разборчивости речи в аудитории изложен в [1]. Время реверберации - это время, когда звук исчезает после прекращения подачи от источника звука. В акустике стандартное время реверберации - это время, необходимое для падения звука на 60 дБ от его начального значения (RT60). Разборчивость речи в помещении увеличивается с уменьшением времени реверберации. Поэтому немаловажно знать, что время реверберации зависит от нескольких факторов, таких как объём помещения, громкость, частота звука и уровень звукопоглощения в помещении. Существует два способа уменьшения времени реверберации: увеличение поглощения звука и

уменьшение объема помещения. [1-2]. Методы определения времени реверберации изложены ниже.

В данном исследовании время реверберации было определено теоретическим расчетом и моделированием. Были отобраны два типа аудиторий: недавно построенная и построенная более 10 лет назад (рис.1).



Рис. 1. – Два типа аудиторий: построенная 10 лет назад (а) и построенная недавно (б)

Теоретический расчет производился с помощью формулы (1), которая требует информацию о размерах, материалах помещения и всех находящихся там предметах.

$$T_{60} = 0,164 \frac{V}{\sum S \cdot \alpha} \quad (1)$$

где  $V$  - объем аудитории,  $S$  - площадь поверхности,  $\alpha$  - коэффициент звукопоглощения. Площадь поверхности с коэффициентом  $\alpha$  поглощает  $\alpha\%$

---

звука, а оставшиеся  $(1-\alpha)\%$  звука отражается обратно в аудиторию [3-4]. Материалы поверхностей, используемые в этих двух помещениях, представлены в таблицах 1 и 2. Для аудитории 1 большинство поверхностей являются отражающими. Наибольший коэффициент звукопоглощения имеет только гипсовый потолок, отражение звука от которого будет невысокое. Аудитория 2 имеет больше поглощающих поверхностей, расположение которых способствует рассеиванию звуковых волн. Ковролин на сцене, виниловое покрытие пола, а также сборная деревянная передняя стенка обладают высокими коэффициентами звукопоглощения. Помимо наличия разных материалов, объем второй аудитории в три раза больше объема первой [5].

Таблица 1

Характеристики материалов поверхностей в первой учебной аудитории

№ п/п	Наименование поверхности	Материал	Площадь, м <sup>2</sup>	Коэффициент звукопоглощения
1	Пол	Керамическая плитка	88,58	0,01-0,02
2	Стены	Окрашенный бетон	152,60	0,01-0,04
3	Дверь	Цельная древесина	3,56	0,05-0,10
4	Потолок	Гипсокартон	88,58	0,04-0,20
5	Окна	Стекло	5,60	0,02-0,06
6	Доска	Древесно-стружечная плита	2,16	0,01-0,14
7	Экран	Пластик	10,00	0,10-0,20
8	Стулья и столы	Древесно-стружечная плита	19,00	0,05-0,14
Объем помещения, м <sup>3</sup>			322,86	

Таблица 2

Характеристики материалов поверхностей во второй учебной аудитории

№ п/п	Наименование поверхности	Материал	Площадь, м <sup>2</sup>	Коэффициент звукопоглощения
1	Пол	Винил	202,40	0,02-0,05
2	Стены	Окрашенный бетон	161,29	0,01-0,04
2	Фронтальная стена	Дерево	44,10	0,05-0,20
3	Дверь	Цельная древесина	3,86	0,05-0,10
4	Потолок	Гипсокартон	202,40	0,04-0,20
5	Окна	Пластик	19,32	0,10-0,25
6	Доска	Древесно-стружечная плита	3,21	0,01-0,14
7	Экран	Пластик	12,00	0,10-0,20
8	Стулья и столы	Клееная фанера	115,60	0,07-0,16
9	Сцена	Ковролин	116,54	0,08-0,37
Объем помещения, м <sup>3</sup>			813,11	

Следующим шагом являлось вычисление времени реверберации с использованием программного обеспечения для моделирования акустики Computer Aided Room Acoustics (CARA) [6]. Модели двух типов аудиторий в CARA показаны на рис.2.

В таблице 3 приведено сравнение времени реверберации для двух аудиторий, полученное путём ручного расчета и с использованием моделирования CARA. Результаты показывают, что оба помещения имеют время реверберации более 2,0 секунд для частот от 500 до 4000 Гц, что превышает допустимые значения для помещений данного назначения. Программное обеспечение CARA позволяет рассчитывать и оценивать акустическую среду помещения, рекомендовать изменения для улучшения

качества звука и сравнить акустическую среду оригинального и измененного помещения аудитории [7].

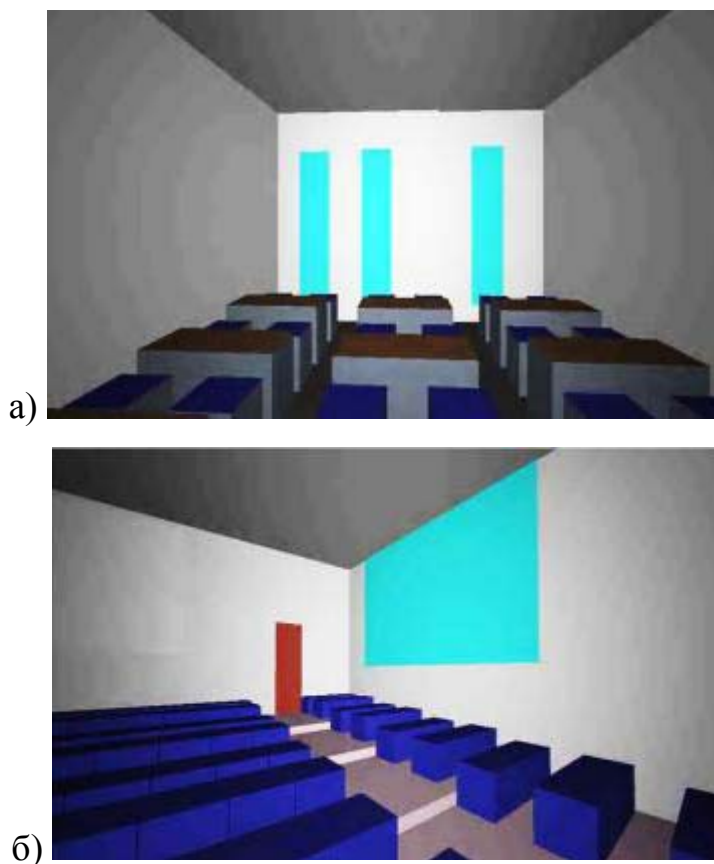


Рис. 2. – Две CARA модели аудиторий: построенная 20 лет назад (а) и построенная недавно (б)

Таблица 3

Значения времени реверберации при ручном расчёте и CARA-моделировании

Частота (Гц)	Аудитория №1			Аудитория №2		
	Ручной расчёт	CARA-моделирование	Моделирование после модернизации	Ручной расчёт	CARA-моделирование	Моделирование после модернизации
250	1.30	1.10	0.58	1.74	1.58	0.97

Окончание таблицы 3

500	2.44	2.20	0.55	2.78	2.41	0.91
1000	2.86	2.40	0.45	2.63	2.23	0.81
2000	2.56	2.00	0.46	2.38	2.01	0.81
4000	2.20	1.80	0.47	1.98	1.79	0.82

Важным шагом для уменьшения времени реверберации является использование звукопоглощающих материалов и конструкций. Расчёты, сделанные для двух аудиторий, продемонстрировали необходимость замены большей части поверхности звукопоглощающим материалом.

Звукопоглощающие материалы используются для уменьшая отражения звука. Звуковые волны, попадающие на поверхность, отражаются, передаются или поглощаются; количество энергии, идущей в отражение, передачу или поглощение, зависит от акустических свойств поверхности. При поглощении звука происходит преобразование энергии звуковой в тепловую в результате трения в порах (пеностекло, газобетон и другие пористые материалы с жестким скелетом), либо помимо трения возникает деформация гибкого скелета (минеральная, базальтовая вата, древесное волокно). Звукопоглощающие материалы по структуре разделяют на пористо-зернистые, пористо-волокнистые и пористо-губчатые. Изготавливаются такие материалы в виде плит, рулонов и сыпучих материалов; также их можно использовать в виде штукатурки [8].

Моделирование CARA показывает, что боковые стенки идеально подходят для звукопоглощающего материала с коэффициентами поглощения 0,4 и 0,8 (таблица 4) для частот от 200 Гц до 4000 Гц. Использовались панели из древесной шерсти для покрытия только определённых участков внутренних стен (рис. 3). Древесная шерсть является одним из натуральных

волокон, которое можно использовать в качестве строительного акустического материала вместо синтетического волокна.

Таблица 4

Коэффициенты звукопоглощения для панелей из древесной шерсти

Частота	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
$\alpha$	0.48	0.74	0.91	0.86	0.83

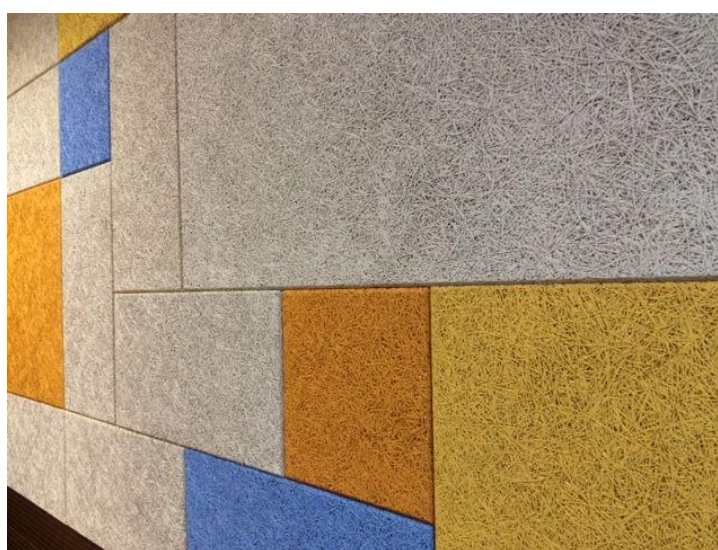


Рис. 3. – Плиты из древесной шерсти

На рис.4 представлено сравнение времени реверберации двух аудиторий до и после модернизации. Исходя из результатов первичных расчётов, оба класса не создавали благоприятный акустический режим (некоторая потеря артикуляции), как это видно с частотой 1000 Гц и временем реверберации выше RT60. Кроме того, небольшое пространство имеет короткое время реверберации, в то время как большое пространство имеет длительное время реверберации [9]. Однако результаты этого исследования указывают на обратное для частот выше 1000 Гц.

Улучшение характеристик звукопоглощения на боковых стенах является приоритетным для снижения времени реверберации вплоть до подходящего для учебной среды. Таким образом, для аудитории 1, объем

которого меньше 250 м<sup>3</sup>, RT составлял от 0,4 до 0,8 секунды при частоте 500 Гц, 1000 Гц и 2000 Гц. Для аудитории 2, объем которой составлял более 250 м<sup>3</sup>, RT составлял от 0,7 до 1,2 секунды. Результаты показали улучшения в RT60 класса 1 и классе 2, примерно 0,5-1 секунды и 0,7-1 секунды, соответственно. Новый RT позволяет студентам говорить и слышать ясно, а преподавателям разговаривать на более комфортном тоне. Таким образом, и учителя, и ученики не будут испытывать трудности в понимании речи [10].

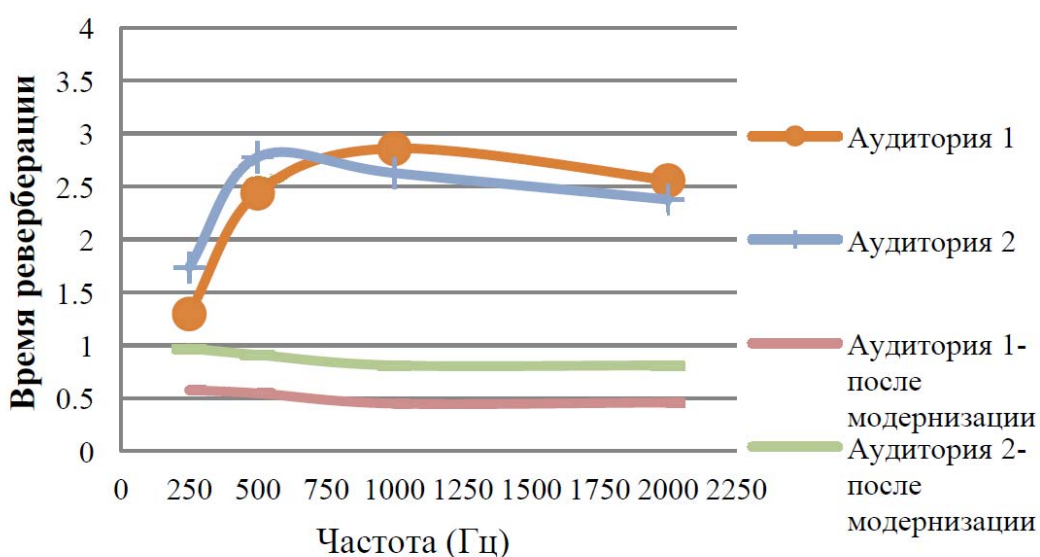


Рис. 4. – Сравнение времени реверберации

Анализируя теоретический и программный метод расчета времени реверберации, можно сказать, что оценка параметра была выполнена в полной мере. Данные расчетов получены одного порядка с небольшим расхождением. Преимуществом CARA моделирования является получение рекомендаций к модернизации помещения и ее быстрое выполнение с целью достижения требуемого времени реверберации. Также программа позволяет быстро выполнить много итераций для подбора оптимальных параметров, учесть воедино много параметров, что сильно ускоряет работу. Однако благодаря ручному счету можно понять, как происходит расчет, что помогает проанализировать данные, полученные в программе.



В заключение, акустические качества, в частности время реверберации, как в новом, так и старом классе, отличалось от оптимальных условий, установленных международными стандартами, примерно на 1,0 секунду. При таких показателях разборчивость речи в аудитории сильно ухудшается, что доставляет немало неудобств как учащимся, так и преподавателям. Благоприятные акустические условия могут быть получены путем покрытия отражающих поверхностей звукопоглощающими панелями, коэффициент звукопоглощения которых выше [11]. Сокращение времени реверберации после применения звукопоглощающих панелей улучшило качество акустики в аудитории.

### Литература

1. Жукова В.О. Акустика учебных аудиторий корпуса машиностроение МГТУ им. Н.Э. Баумана // Акустика среды обитания: Сборник трудов Первой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (АСО-2016). М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 66-74.
2. Волченков В.А. Обнаружение пауз в речевых сигналах // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2024/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2024/).
3. Sylvio R. Bistafa, John S. Bradley Reverberation time and maximum background noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics // The Journal of the Acoustical Society of America. 2000. №2. pp. 861-875.
4. Акустика / Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А, Фадеев А.А. и др.; под ред. Ковалгина Ю.А. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 660 с.
5. Кривопалова В.В. Шумо - и звукоизоляция с применением современных строительных материалов и технологий // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова.



Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 4200-4204.

6. Sumit Chawla. CARA CAD and CARA CALC Room Acoustic Software //Product review/ October, 2002 URL: [hometheaterhifi.com/volume\\_9\\_4/cara-software-10-2002.html](http://hometheaterhifi.com/volume_9_4/cara-software-10-2002.html).

7. Vorlaender, Michael Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties // The Journal of the Acoustical Society of America. 2013. №133. pp. 1203-1213.

8. Набокова Я.С. Эффективные строительные материалы и способы возведения зданий // Инженерный вестник Дона, 2008, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96/).

9. Ковригин С.Д., Крышов С.И. Архитектурно-строительная акустика. 2 изд. М.: Высшая школа, 1986. 256 с.

10. Martin A. Gold, Hee Won Lee, Gary W. Siebein. Classroom acoustics II: Acoustical conditions in elementary school classrooms // The Journal of the Acoustical Society of America. 1998. №103. pp. 1203-1213.

11. Кочкин А.А. Шашкова Л.Э. О повышении звукоизоляции ограждающих конструкций// Academia. Архитектура и строительство, 2010, №4 URL: [cyberleninka.ru/article/v/o-povyshenii-zvukoizolyatsii-ograzhdayuschih-konstruktsiy](http://cyberleninka.ru/article/v/o-povyshenii-zvukoizolyatsii-ograzhdayuschih-konstruktsiy).

### References

1. Zhukova V.O. Akustika sredey` obitaniya: Sbornik trudov Pervoy Vserossijskoj konferencii molody`x ucheny`x i specialistov (ASO-2016) [The first all-Russian conference of young scientists and specialists], Moscow, 2016, pp. 66-74.

2. Volchenkov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2024/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2024/).



3. Sylvio R. Bistafa, John S. Bradley. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, №2, pp. 861-875.
4. Vaxitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A, Fadeev A.A., Shhev`ev Yu.P. Akustika (Acoustics), Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2009. 660 p.
5. Krivopalova V.V. Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya molody`x ucheny`x BGTU im. V.G. Shuxova (International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V. G. Shukhov), Belgorod, 2015, pp. 4200-4204.
6. Sumit Chawla. Product review, October 2002. URL: [hometheaterhifi.com/volume\\_9\\_4/cara-software-10-2002.html](http://hometheaterhifi.com/volume_9_4/cara-software-10-2002.html).
7. Vorlaender, Michael The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, №133, pp. 1203-1213.
8. Nabokova YA.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2008, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96/).
9. Kovrigin S. D, Kryshov S.I. Arhitekturno-stroitel'naya akustika, Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 256 p.
10. Martin A. Gold, Hee Won Lee, Gary W. Siebein The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, №103, pp. 1203-1213.
11. Kochkin A.A. Shashkova L.EH. Academia. Arhitektura i stroitel'stvo, 2010, №4. URL: [cyberleninka.ru/article/v/o-povyshenii-zvukoizolyatsii-ograzhdayuschih-konstruktsiy](http://cyberleninka.ru/article/v/o-povyshenii-zvukoizolyatsii-ograzhdayuschih-konstruktsiy).