

## АКУСТИКА УЧЕБНЫХ АУДИТОРИЙ КОРПУСА ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

**В.О. Жукова**

*Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва*

*E-mail: [jukover@mail.ru](mailto:jukover@mail.ru)*

В настоящей работе приведены результаты измерений акустических параметров учебных аудиторий корпуса Энергомашиностроение МГТУ им. Баумана. Исследованы одиннадцать аудиторий, различных размеров и вместимости. Все аудитории предназначены для проведения в них как лекций, так и семинаров. В качестве параметров, характеризующих акустику аудиторий, выбраны следующие: время реверберации, индекс передачи речи STI, громкость. Проведен анализ связи полученных данных, с размерами, и внутренней отделкой помещений. Сделаны общие выводы по акустике помещений корпуса, проведено сравнение с рекомендуемыми значениями.

Ключевые слова: акустика помещений, время реверберации, речевая разборчивость, громкость.

### ВВЕДЕНИЕ

Для оценки акустического качества аудиторий на практике используется два типа параметров. Первые описывают субъективное восприятие звука в аудитории, вторые дают объективную оценку акустики аудиторий с помощью измеряемых параметров. Но субъективное восприятие может различаться для многих людей и трудно привязывается к характеристикам самого помещения, поэтому в первую очередь необходимо проводить измерение объективных акустических параметров, а затем соотносить их с субъективными оценками.

Для понимания связи между измеряемыми акустическим параметрами и субъективным восприятием акустики помещений необходим достаточно большой набор данных по аудиториям разной формы, объема и вместимости. Для этой цели в 2015 году начата работа по измерению акустических параметров всех или, по крайней мере, большинства учебных аудиторий МГТУ им. Баумана. По результатам анализа проведенных измерений предполагается разработать критерии для объективной оценки качества акустики учебных аудиторий. Сегодня отечественные нормативные документы [1] формулируют требования только для времени реверберации. Несмотря на то, что это важный параметр, он не всегда адекватно описывает акустику помещений [2]. Вместе с тем мировой опыт предлагает гораздо больший набор акустических параметров [3,4]. В настоящей работе приводятся результаты акустического обследования 11 аудиторий корпуса Энергомашиностроения, описывается выбранная методика измерений.

### 1. ОЦЕНИВАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Вся информация о передаче звуковой информации от источника звука к приемнику содержится в импульсном отклике. По измеренному импульсному отклику можно определить различные акустические параметры. Для характеристики акустики учебных аудиторий выбраны акустические параметры, описанные ниже.

#### 1.1.Время реверберации

Время реверберации, вероятно, самый известный из всех акустических параметров комнат. Когда реверберация в помещении велика, речь теряет

разборчивость, потому что важные детали (согласные) маскируются более громкими, протяжными звуками речи (гласными).

Время реверберации  $T$  определяется как время, необходимое для уменьшения уровня шума в помещении, на 60 дБ после отключения источника звука. На практике, оценка ограничивается меньшим интервалом кривой спада, от -5 дБ до -35 дБ (или -5 дБ до -25 дБ) ниже начального значения.

Из-за маскировки, весь процесс спада воспринимается только во время перерывов в речи. Кроме того, скорость спада часто отличается в начале и далее вниз по кривой спада. Во время воспроизведения речи, более поздняя, слабая часть реверберации будет маскироваться следующим слогом. Следовательно, альтернативная величина, время раннего спада (EDT) окажется лучше коррелированной с реверберацией, воспринимаемой во время восприятия беглой речи. Этот параметр, как и время реверберации  $T$ , также измеряет скорость спада; но теперь оценивается только интервал на начальной части кривой, между 0 и -10 дБ.

Несмотря на то, что EDT является в некоторых случаях лучшей характеристикой реверберации, чем  $T$ ,  $T$  до сих пор считается основным и наиболее важным объективным показателем

### 1.2. Разборчивость речи

В аудиториях, используемых для передачи речевой информации, таких как лекционные залы, влияние акустики на разборчивость является одним из основных вопросов.

В настоящее время наиболее распространенным способом объективно оценить разборчивость речи в помещениях является индекс передачи речи STI.

Эта величина основана на идее, что речь может рассматриваться в качестве амплитудно-модулированного сигнала, в котором степень модуляции несет в себе информацию речи. Если на пути передачи добавляется шум или реверберационный сигнал, степень модуляции сигнала будет уменьшаться, в результате чего снижается разборчивость речи.

Средневзвешенное фактора снижения модуляции затем приводят к числу между 0 и 1, что соответствует очень плохим и отличным условиям соответственно.

### 1.3. Громкость

Влияние комнаты на воспринимаемую громкость, еще один важный аспект акустики помещения. Соответствующее измерение этого свойства просто разница в дБ между уровнем непрерывного, калиброванного источника звука, измеряемого в помещении и уровнем от того же источника, генерируемым на расстоянии 10 м в безэховом окружении. Эта объективная мера, называемая громкостью  $G$ , также может быть получена из импульсного отклика регистрацией соотношения между полной энергией импульсного отклика и энергией прямого звука. В настоящей работе в качестве параметра, характеризующего громкость речи в аудитории, было взято снижение громкости звука относительно уровня звукового давления на расстоянии 1 м перед источником.

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследовании были измерены и обработаны импульсные отклики одиннадцати аудиторий. Замеры проводились в 7-10 точках аудиторий (рис. 1), в зависимости от их размеров. Точки располагались равномерно по объему аудитории, с удалением от источника, в шахматном порядке. Количество положений источника, при которых замерялись значения импульсных откликов во всех точках, два. Источником звука являлся небольшой динамик круглой формы, с диаграммой направленности звука, близкой к диаграмме направленности, характерной для человеческой речи. Положения источника выбирались такими, чтобы имитировать лектора сидящего за столом и стоящего у доски. Излучаемый сигнал представляет собой линейно частотно модулированный сигнал. Прием сигнала осуществлялся микрофоном, расположенным на высоте уха сидящего студента. Запись и обработка импульсного отклика проводилась в программе Dirac 3.0.

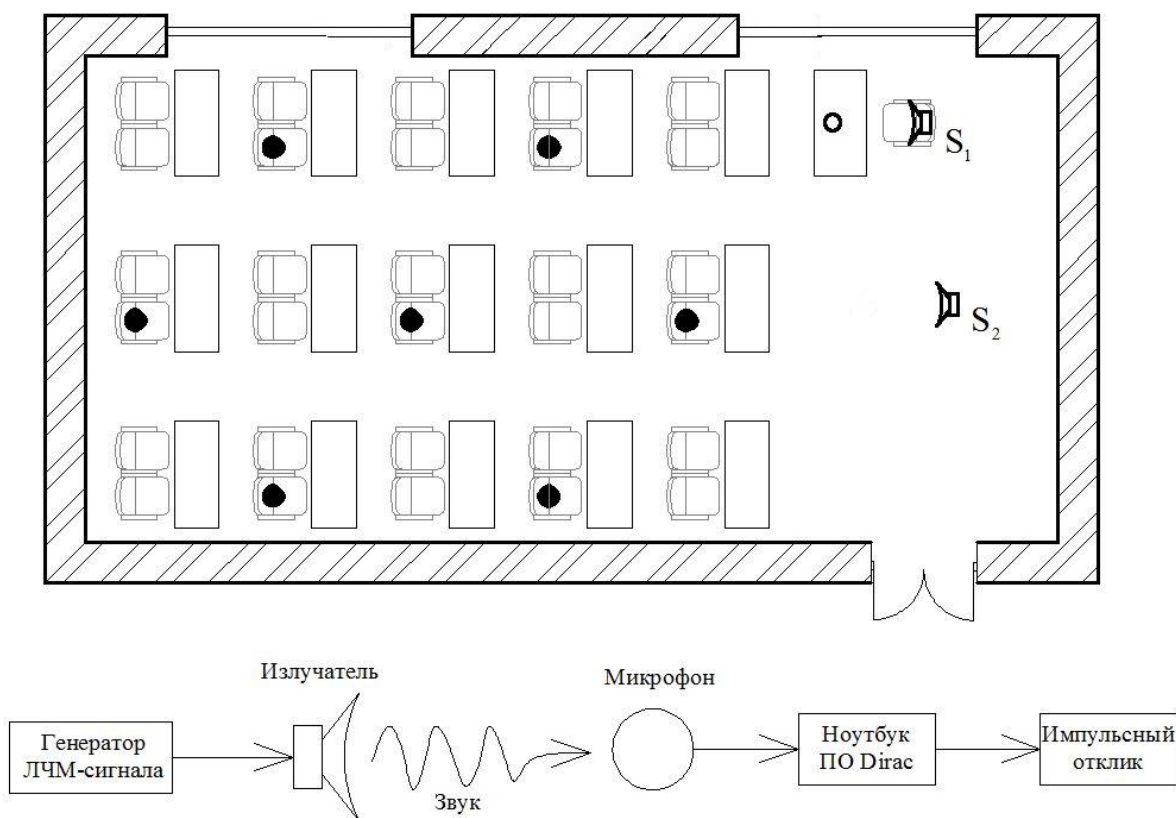


Рис. 1. Схема измерений.

В таблице 1 показаны полученные данные. Время реверберации подсчитано как среднее для частот 500 Гц и 1000 Гц. Снижение громкости подсчитано относительно опорной точки, расположенной на расстоянии 1 м перед источником звука, как снижение уровня звукового давления при удалении от источника. Приведенное значение найдено так же усреднением по частотам 500 Гц и 1000 Гц средних значений по всем точкам для этих частот.

Таблица 1. Результаты обработки экспериментов

№ ауд.	кол. мест	V, м <sup>3</sup>	RT <sub>mid</sub> , с	$\overline{STI}$	$\Delta STI$	$\overline{G}_{mid}$ , дБ
411	30	108	0.7	0.66	0.63...0.75	-
315	32	113	0.75	0.67	0.63...0.75	- 1.8
529	32	117	0.62	0.69	0.65...0.72	- 4.4
321	33	122	0.91	0.66	0.63...0.77	-
311	50	171	0.74	0.63	0.59...0.72	- 4.1
415	54	175	0.64	0.63	0.58...0.75	- 5.1
413	60	177	1.47	0.52	0.47...0.58	- 2.2
331	36	182	0.56	0.75	0.72...0.80	- 6.3
323	50	183	0.93	0.60	0.55...0.72	- 4.5
517	81	314	0.61	0.66	0.62...0.76	- 9.9
525	120	357	0.73	0.63	0.57...0.83	- 9.7

Отдельно приведена таблица 2 по времени реверберации. Время реверберации T<sub>20</sub>, усреднено по всем точкам для четырех частот. Приведено среднее значение для частот 500 Гц и 1000 Гц, которое использовалось для дальнейшего анализа. Так же в таблице приведены значения раннего времени реверберации, обработанные сходным образом.

Таблица 2. Времена реверберации аудиторий

№ ауд	RT <sub>500</sub> , с	RT <sub>1000</sub> , с	RT <sub>2000</sub> , с	RT <sub>4000</sub> , с	RT <sub>mid</sub> , с	EDT <sub>500</sub> , с	EDT <sub>1000</sub> , с	EDT <sub>2000</sub> , с	EDT <sub>4000</sub> , с	EDT <sub>mid</sub> , с
411	0.61	0.79	0.84	0.71	0.70	0.60	0.70	0.73	0.63	0.65
315	0.69	0.80	0.79	0.65	0.75	0.65	0.73	0.72	0.60	0.69
529	0.60	0.63	0.76	0.74	0.62	0.56	0.55	0.67	0.59	0.56
321	0.95	0.86	0.75	0.66	0.91	0.98	0.84	0.73	0.57	0.91
311	0.56	0.92	0.95	0.78	0.74	0.58	0.77	0.77	0.66	0.68
415	0.57	0.79	0.93	0.86	0.64	0.52	0.65	0.70	0.62	0.65
413	1.47	1.47	1.47	1.16	1.47	1.41	1.45	1.46	1.11	1.43
331	0.54	0.58	0.57	0.51	0.56	0.56	0.53	0.48	0.44	0.55
323	0.94	0.92	0.83	0.75	0.93	0.91	0.91	0.78	0.65	0.91
517	0.50	0.71	0.89	0.87	0.61	0.51	0.65	0.77	0.64	0.58
525	0.62	0.83	1.12	0.89	0.73	0.55	0.78	0.98	0.84	0.67

По результатам экспериментов был построен график зависимости времени реверберации в помещении от его объема (рис. 2). На графике прямой показано рекомендованное значение времени реверберации для лекционных залов согласно СП 51.13330.2011 [1]. Штриховыми линиями отмечен коридор  $\pm 10\%$  от рекомендованного значения. Точками отмечены полученные значения для исследуемых аудиторий. Из графика видно, что пять аудиторий точно попадают в рекомендуемый диапазон, три аудитории очень близки к нему, а еще три существенно выпадают, они выделены кружками.

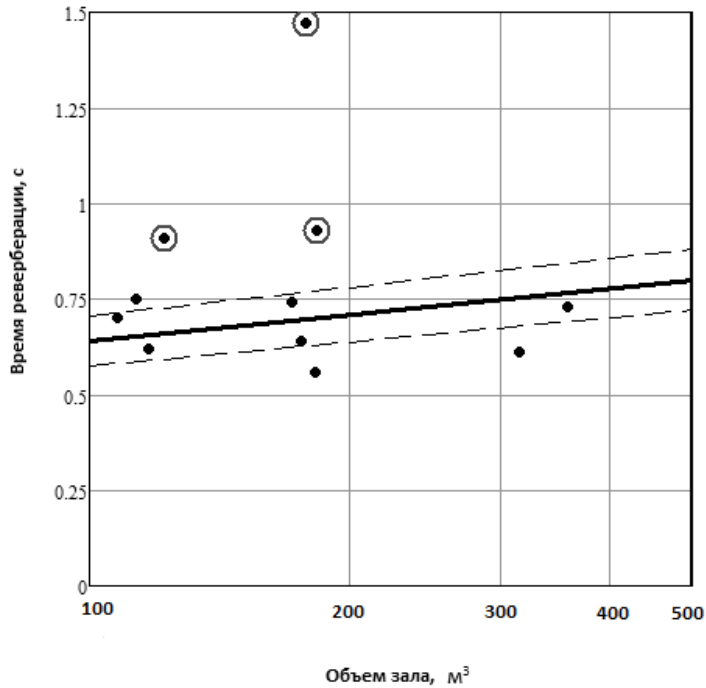


Рис. 2. Зависимость времени реверберации аудиторий от их объема

Для выяснения связи времени реверберации с другими оцениваемыми параметрами были построены так же графики зависимости индекса передачи речи STI в аудитории и снижения громкости при удалении от источника от времени реверберации в аудитории (рис.3, рис 4). На графиках нанесены экспериментальные точки, сильно выпадающие точки с графика на рис. 1 также выделены.

Из графиков видно, что, как и следовало ожидать, аудитории с более высоким временем реверберации имеют худшую разборчивость речи и меньшие значения снижения громкости. Из рис. 4 так же видно, что в аудиториях, длина которых значительно превышает длину других аудиторий (выделены квадратами), снижение громкости при том же диапазоне времен реверберации значительно превышает значения для более коротких аудиторий.

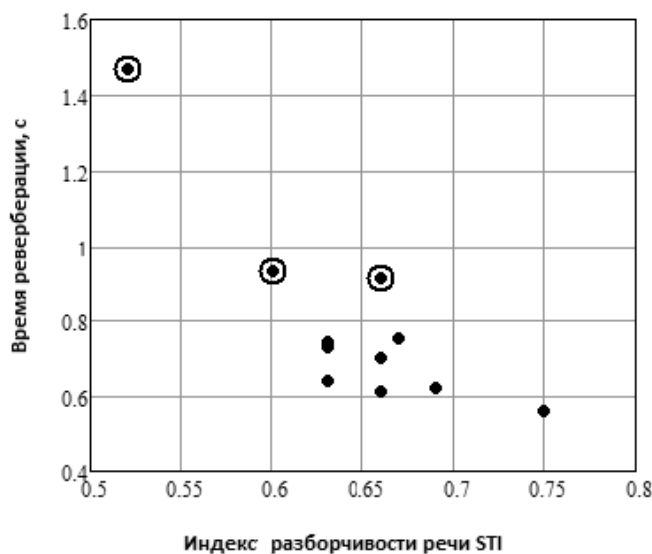


Рис. 3. Зависимость индекса разборчивости речи от времени реверберации

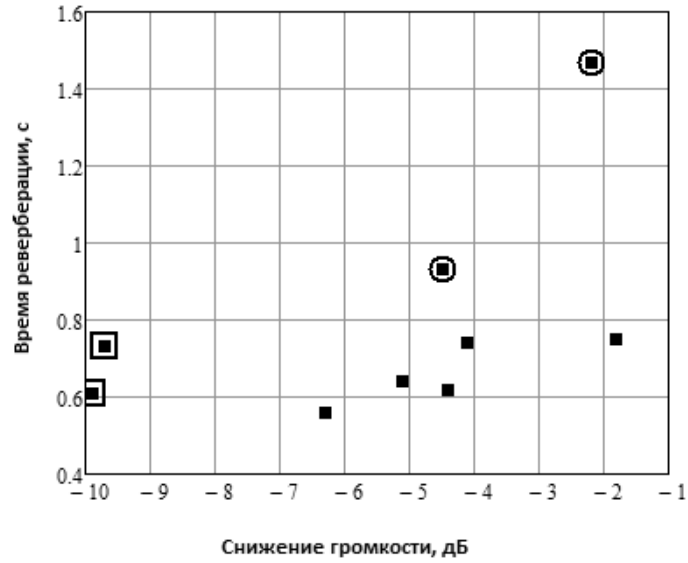


Рис. 4. Зависимость снижения громкости от времени реверберации

Для более детального исследования снижения громкости в аудиториях, средние значения для каждой из частот, посчитанные по всем точкам сведены в табл. 3. Под средним значением для определенной частоты показан диапазон изменения величины снижения уровня звукового давления.

Таблица 3. Снижение громкости в аудиториях

№ ауд.	размеры, м	$\overline{G}_{500}$ , дБ	$\overline{G}_{1000}$ , дБ	$\overline{G}_{2000}$ , дБ	$\overline{G}_{4000}$ , дБ	$\overline{G}$ , дБ	$\overline{G}_{mid}$ , дБ
315	3.4×6×5.6	- 1.6 -0.3..-4.7	-2.0 -0.1..-4.8	-2.8 -0.8..-6.1	-4.7 -2.3..-10.8	-2.8 -0.1..-10.8	- 1.8
529	3.3×6×5.9	- 3.1 -0.9..-5.0	-5.8 -3.9..-10.7	-5.01 -3.3..-6.1	-3.4 -0.7..-5.0	-4.3 -0.7..-10.7	- 4.4
311	3.4×6×8.4	- 3.1 -0.5..-5.6	-5.0 -1.1..-7.2	-5.22 -1.9..-7.2	-5.8 -3.9..-7.7	-4.8 -0.5..-7.7	- 4.1
415	3.4×6×8.7	- 4.5 0..-8.8	-5.7 -1.9..-8.9	-5.84 -0.3..-8.8	-7.0 -5.3..-9.0	-5.2 0..-9.0	- 5.1
413	3.5×6×8.7	- 2.1 -0.7..-4.2	-2.2 -0.8..-4.3	-2.52 -1.2..-4.4	-4.9 -2.6..-6.0	-2.9 -0.7..-6.0	- 2.2
331	3.4×6×9	- 5.5 -0.6..-8.9	-7.1 -3.4..-10.1	-6.85 -3.0..-8.2	-8.0 -4.7..-11.4	-6.9 -0.6..-11.4	- 6.3
323	3.4×6×9	- 4.6 -2.2..-7.3	-4.4 -1.0..-7.1	-6.3 -2.7..-9.0	-7.3 -3.4..-9.1	-5.7 -1.0..-9.1	- 4.5
517	3.4×6×17.7	- 10.4 -2.4..-16.4	-9.4 -3.8..-14.4	-10.61 -5.0..-15.0	-10.7 -7.2..-14.1	-10.3 -2.4..-16.4	- 9.9
525	3.4×6×17.7	- 9.1 -1.5..-14.7	-10.3 -3.0..-14.8	-10.21 -3.2..-14.3	-10.1 -2.9..-14.1	-9.9 -1.5..-14.8	- 9.7

По табличным данным построены графики снижения громкости звука по удалении от источника звука. Были выделены три типа аудиторий, на первом графике (рис. 5а) показаны значения для аудиторий 525 и 517, длина которых намного больше их ширины и составляет 17.7 метров, так же на этом рисунке (рис. 5б) отражен график снижения индекса передачи речи по длине аудитории, который имеет тот же вид, что и

график снижения громкости. Аудитории второго типа соразмерны, их длина превышает ширину, но намного меньше длины аудиторий 517 и 525. На рис. 6 показаны графики, построенные для аудиторий 413, 323, 311, длины которых составляют соответственно 8.7, 9 и 8.4 метра. В третью группу аудиторий включены аудитории, близкие по форме к квадратным, это аудитории 315 и 529, длины которых 5.6 и 5.9 метров (рис. 7).

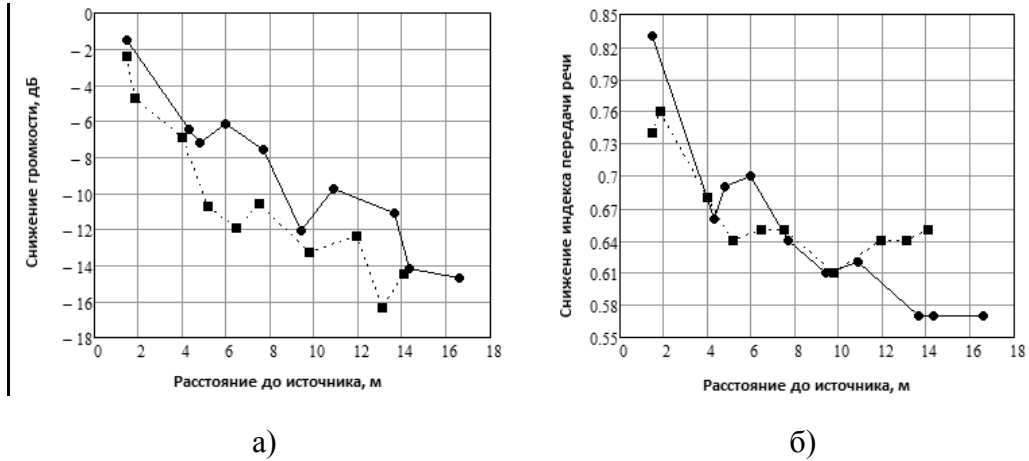


Рис. 5. Снижение громкости (а) и индекса передачи речи (б) при удалении от источника в аудиториях 525, 517

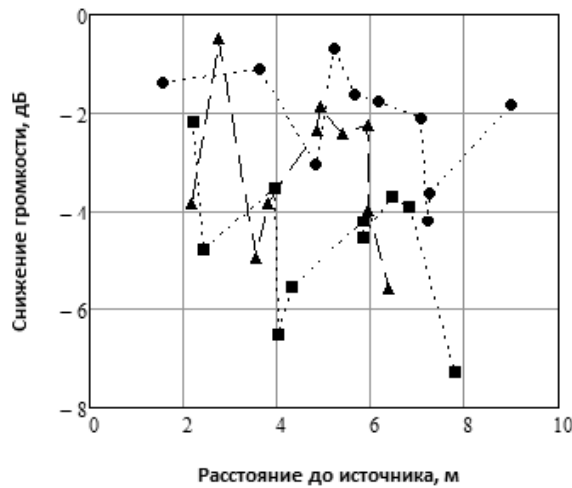


Рис. 6. Снижение громкости при удалении от источника в аудиториях 413, 323, 311

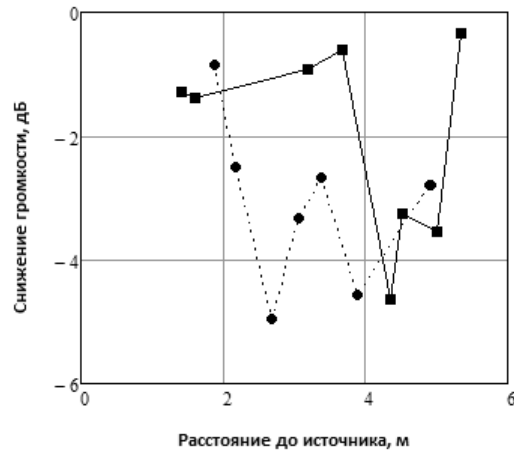


Рис. 7. Снижение громкости при удалении от источника в аудиториях 315, 529

Из рисунков 5, 6, 7 видно, что в длинных аудиториях наблюдается отчетливый спад громкости звука по длине аудитории. В более коротких аудиториях такого тренда не наблюдается, и снижение громкости находится в узком диапазоне значений.

При обработке экспериментальных данных, было обнаружено, что в одной из аудиторий, отнесенных ко второму типу, наблюдается так же спад значений громкости звука, как в длинных аудиториях. На рис. 8 показаны графики снижения звука в этой аудитории (415) и в аудитории такого же объема (413). В то время как снижение громкости в аудитории 413 лежит в узком диапазоне, в аудитории 415 при удалении от источника идет явный спад громкости. Значения времен реверберации для этих аудиторий составляет 0.64 с, для аудитории 413, и 1.47 с (что является одним из трех сильно выпадающих значений) для аудитории 413. При объяснении причины таких различий, необходимо отметить, что потолок в аудитории 415 обшит звукопоглощающим материалом, а в сходной аудитории 413 потолок не обработан таким материалом, что, вероятно, и явилось причиной столь высокого времени реверберации в ней и значительного спада громкости.

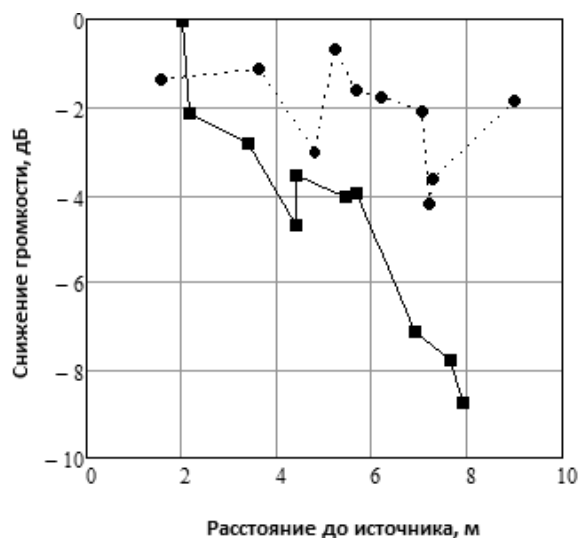


Рис. 8. Снижение громкости при удалении от источника в аудиториях 413 и 415



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных измерений можно сделать следующие выводы:

- 1) В большинстве аудиторий, в которых проводились измерения, время реверберации соответствует рекомендациям отечественных нормативных документов [1].
- 2) Индекс передачи речи STI находится в диапазоне от 0.52(удовлетворительно) до 0.75(отлично). Большинство аудиторий соответствует разборчивости речи, оцениваемой как «хорошо».
- 3) В более длинных аудиториях снижение громкости по длине значительно до 12 дБ, изменение индекса передачи речи от «отличного» в начале аудитории до «удовлетворительного» в конце аудитории.
- 4) Обработка потолка звукопоглощающим материалом значительно улучшает акустику аудитории. При отсутствии звукопоглощающего потолка наблюдается завышенное значение времени реверберации и снижение громкости в аудитории, что мешает восприятию звуковой информации в ней.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. Москва, 2011.
2. Канев Н.Г. Об аномальном времени реверберации некоторых помещений // Материалы Международной акустической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Е.Я. Юдина, 30 ноября 2014 г., под ред. А. И. Комкина. С. 191-201. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
3. Sylvio R. Bistafa and John S. Bradley. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 107, No. 2, February 2000, p. 861-875