

М. Ю. Ланэ

*Московский научно-исследовательский и проектный институт объектов культуры, отдыха, спорта и здравоохранения «ГУП МНИИП Моспроект-4»
123056 Москва, 2-я Брестская ул., 28а, e-mail: mlannie@mail.ru*

Акустика зрительного зала Самарского академического театра оперы и балета

Получена 14.01.2011, опубликована 21.02.2011

Изложены результаты работ по акустическому проектированию оперного театра в Самаре вместимостью в 1100 мест, который был полностью реконструирован с изменением, как формы помещения, так и его внутренней отделки. При проведении работ использовался метод компьютерного акустического моделирования. Приводятся результаты акустических измерений, выполненных в зале после завершения реконструкции. Анализ результатов измерений, а также первоначальные субъективные отзывы свидетельствуют о хорошем качестве звучания в зале.

Ключевые слова: архитектурная акустика, оперный театр, акустические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Здание театра было построено в 1936–1938 гг. по проекту архитекторов Н. Троцкого и Н. Каценеленбогена. Размещенное на центральной площади города оно является важной градостроительной доминантой Самары. Первоначально здание планировалось для размещения Дворца культуры. Позднее в его центральной части расположился театр оперы и балета. Реконструкция здания театра началась в 2006 г. и затронула большинство помещений огромного здания, включая основной зрительский зал со сценической частью, малую сцену и многочисленные репетиционные помещения. Настоящая публикация посвящена вопросам акустического проектирования применительно исключительно к реконструкции основного зрительного зала, которая была завершена в августе 2010 г.

1. АКУСТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ЗАЛА

Выполнить акустические измерения в зрительном зале театра до начала реконструкции в силу ряда организационных причин не удалось. Сотрудники театра отмечали, что имелись нарекания на конструкцию оркестровой ямы, а также наблюдался звуковой «провал» в средней части партера (в области 8-го ряда кресел). Однако в целом качество звучания в зале оценивалось ими как вполне удовлетворительное. Важно подчеркнуть, что реконструкция зала носила глобальный характер. Помещение уменьшилось по длине и для обеспечения заданной вместимости в 1100 мест были запроектированы 3 яруса балконов. Фактически речь шла о создании

совершенно нового зала, лишь ограниченного по ширине контуром продольных стен ранее существовавшего помещения.

Акустическое проектирование зала проводилось методом компьютерного моделирования. Была подготовлена компьютерная модель, на которой анализировались различные варианты планировочных решений и отделки внутренних поверхностей. Работа проводилась в тесном контакте с архитекторами (ПКМ «Русич», г. Самара), выполнявшими проект реконструкции здания. Ниже будет изложено окончательное решение, которое и было реализовано при реконструкции зала.

На рис. 1 показан план зала в уровне партера с расстановкой кресел, а на рис. 2 и 3 изометрия помещения и продольный разрез согласно компьютерной акустической модели. На всех этих рисунках зал показан без сценической коробки. Как видно, зал имеет в плане форму близкую к квадрату. Зрители размещаются в партере, следующим за ним амфитеатре и на трех ярусах. Ширина, ограниченная контуром существующих несущих стен, составляет 24.5 м. Длина помещения уменьшилась до 25 м. Это позволило снизить максимальное удаление зрителей от сцены, что весьма важно для оперного театра. Оркестровая яма была полностью реконструирована. Она была существенно расширена и выполнена с подъемно-опускным полом, отметка которого могла подбираться дирижером в ходе репетиций оперной постановки. Были предусмотрены возможности подъема пола ямы до уровня планшета сцены, а также размещения на площади ямы дополнительных кресел для зрителей (для различных концертных режимов использования зала).

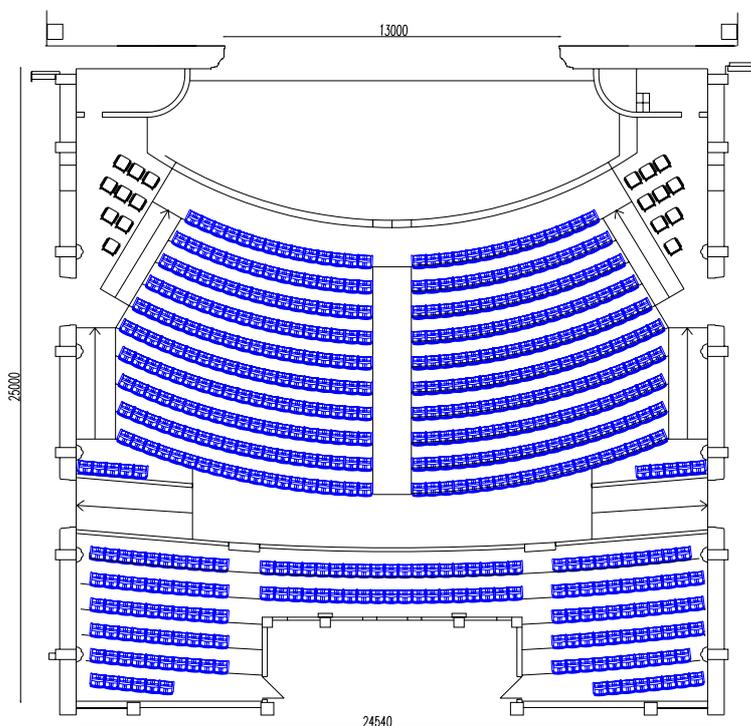


Рис. 1.

План зала в уровне партера

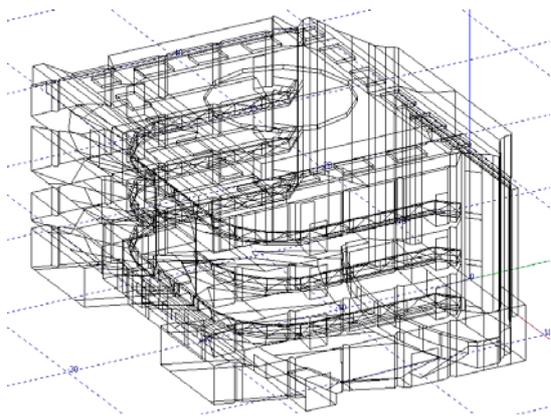


Рис. 2. Изометрия зала. Компьютерная модель

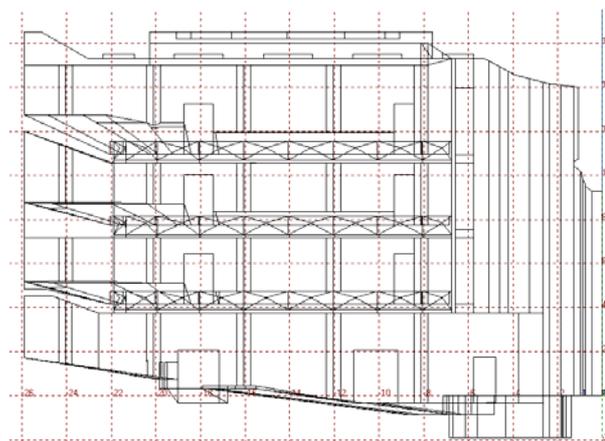


Рис. 3. Продольный разрез. Компьютерная модель

Переход от портала к боковым стенам выполнен с применением коротких выпуклых секций, способствующих улучшению структуры боковых отражений для случая размещения исполнителя в глубине сцены. К боковым стенам в области портала примыкают две симметричные плоские площадки, которые, в частности, могут быть использованы для инвалидов-колясочников (на плане зала на каждой из этих площадок показано размещение 9 зрительских мест). Плоские параллельные боковые стены зала расчленялись системой полуколонн и элементами лепнины. Аналогичный подход использован и на задней стене, как за амфитеатром, так и за всеми ярусами (см. фотографию на рис. 4).



Рис. 4. Фотография фрагмента стены зала на ярусе

По акустическим требованиям ярусы были запроектированы короткими с небольшим отношением их глубины к высоте открытого проема в плоскости над барьерами. При этом во всех ярусах чисто рядов в боковых частях было не более двух, а в области задней стены — не более четырех. Особое внимание было уделено барьерам ярусов. Обращенные в сторону зала поверхности барьеров представляли собой массивные двояковыпуклые гипсовые отливки, поверх которых размещался лепной орнамент. Данная форма барьеров способствовала требуемому распределению боковых звуковых отражений.

Потолок зала включал круглый плафон, выделенный по его периметру небольшим перепадом отметок и обрамленный системой декоративных кессонов. Сама поверхность плафона с крупной люстрой в его центре расчленялась декоративным лепным рельефом в виде «многолистика», показанным на фотографии (рис. 4).

Переход от портала к плафону был выполнен в виде выпуклого звукоотражающего козырька. Его профиль, хорошо видный на рис. 3, был подобран по критерию обеспечения зрительских мест ранними потолочными звуковыми отражениями.



Рис. 4. Фотография центрального плафона на потолке

Акустические требования к реконструированному залу были типичны для оперных театров, рассчитанных на эксплуатацию без звукоусиления [1, 2]. Акустические излучатели системы звукоусиления, необходимой для создания звуковых театральных эффектов, а также для концертных и речевых режимов эксплуатации зала визуально были размещены скрытно. Излучатели правого и левого фронтальных каналов размещались в нишах по краям портала за акустически прозрачной тканью и декоративной решеткой. Линейный массив центрального канала в концертном режиме подвешивался над порталом на тросах, проходящих через небольшие отверстия в звукоотражающем козырьке, и убирался во время оперно-балетных спектаклей.

Воздушный объем зала на 1 зрителя составлял 8 м^3 , что достаточно для рассматриваемого оперного зала и позволяет не применять в интерьере специальных звукопоглощающих материалов. При проектировании согласно рекомендациям [1, 2] был задан оптимум среднечастотной реверберации $RT_{0,5} = 1.45 \dots 1.60 \text{ с}$. В соответствии с этим требованиям были подобраны кресла и отделка поверхностей зала. Были выбраны полумягкие кресла с размещением мягкой обивки заданной толщины на сидении и на спинке. Задние поверхности спинки и откидного сидения были

деревянные. Кресла имели полные подлокотники, на вертикальных поверхностях которых размещалась тонкая обивка. Пол во всех зонах зала был паркетным без использования коврового покрытия. Отделка стен и потолка была выполнена в виде штукатурного покрытия и гипса. Так весь основной потолок зала был смонтирован из массивных гипсовых отливок. Единственным исключением являлись нижние поверхности перекрытия ярусов. С целью обеспечения требуемого низкочастотного звукопоглощения здесь была использована обшивка из гипсокартонных листов в 2 слоя, смонтированная по специально разработанному частому каркасу.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

После завершения реконструкции в зале были проведены акустические измерения. Они выполнялись в пустом помещении при наличии одежды сцены. По просьбе заказчика измерения были выполнены автором данной статьи и независимыми специалистами акустиком (ООО «Акустические материалы»). В первом случае использовалась программа для проведения акустических измерений EASERA, а во втором случае сходная по назначению программа DIRAC. Проведенный анализ не выявил статистически достоверных различий между полученными двумя группами специалистов результатами. Приведенные ниже результаты измерений выполнены автором.

Измерения проводились по стандартизованной методике [3]. Всего было выбрано 17 точек для размещения измерительного микрофона. С учетом симметрии помещения относительно продольной оси они были выбраны в левой (если смотреть из помещения на сцену) половине зала. Эти точки, показанные на рис. 6, охватывали все зоны зрительский мест: партер, короткий амфитеатра и все три яруса.

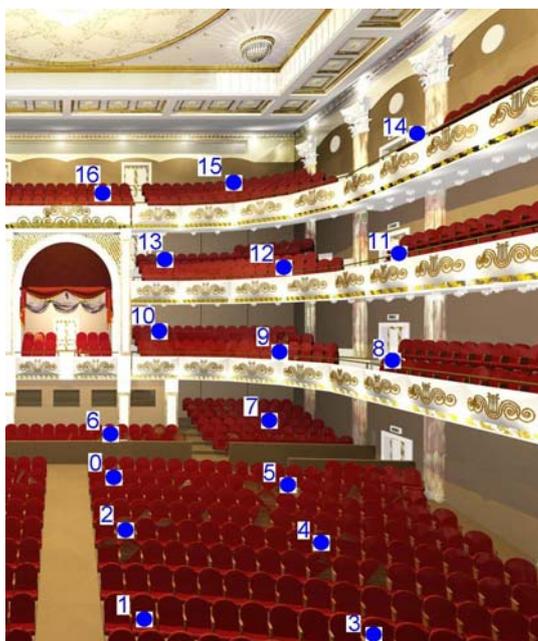


Рис. 6. Точки размещения измерительного микрофона на фрагменте визуализации зала

В качестве источника звука применялся ненаправленный излучатель (додекаэдр), последовательно размещаемый в 3 точках сцены. Точка S_0 находилось на оси зала на авансцене на удалении 1.8 м от края оркестровой ямы. Точка S_H была смещена от нее по оси в глубину сцены на 4.5 м, а точка S_L находилась в боковой части сцены в 3.5 м от оси зала и в 3.8 м от края ямы. Отметим, что подобное размещение измерительных точек для микрофона и источника звука, хотя и не регламентировано какими-либо стандартами, но является традиционным при исследовании акустических свойств оперных

театров [2]. В качестве испытательного сигнала использовалась цифровые последовательности с узким пиком автокорреляционной функции (так называемые последовательности максимальной длины). Отклики зала на испытательный сигнал были записаны для всех ($17 \times 3 = 51$) комбинаций положений источника звука на сцене и измерительного ненаправленного микрофона в зале. В результате обработки зафиксированных импульсных откликов были получены данные о структурах ранних звуковых отражений и критериях акустического качества, которые в краткой форме будут приведены ниже.

Средние по залу значения RT показаны в строке 1 табл. 1. В строке 2 этой таблицы приведены результаты коррекции измеренных значений на заполнение зала публикой, а в строке 3 заимствованные из акустического проекта расчетные значения, полученные на компьютерной модели зала. Отметим, что в разных зонах зрительских мест измеренные значения RT оказались практически одинаковыми.

Табл. 1. Время реверберации (RT , с). Средние по залу значения, округленные до 0.05 с.

№		Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	RT_{UNOCC} , с. Измерено в пустом зале	2.20	2.00	1.95	1.85	1.70	1.45
2	RT_{OCC} , с. Коррекция результатов измерений в пустом зале на присутствие зрителей	2.05	1.80	1.70	1.55	1.45	1.25
3	RT_{OCC} , с. Расчетные значения для зала с публикой по акустическому проекту	1.80	1.65	1.55	1.50	1.50	1.30

Как видно на средних частотах время реверберации заполненного публикой зала составляет $RT \approx 1.55$, что соответствует заложенному при проектировании оптимуму для оперных театров соответствующего объема. Вытекающий из частотной характеристики времени реверберации критерий BR низкочастотный баланс (Bass Ratio) характеризует степень подъема (или спада) частотной характеристики времени реверберации на низких частотах и определяется выражением $BR = (RT_{125} + RT_{250}) / (RT_{500} + RT_{1000})$. То есть BR представляет собой отношение суммы значений RT в октавных полосах 125 Гц и 250 Гц к сумме значений RT в октавных полосах 500 Гц и 1000 Гц. Если обратиться к средней по залу частотной характеристике времени реверберации (табл. 1), то оказывается, что в пустом зале $BR_{UNOCC} = 1.11$, а в зале с публикой $BR_{OCC} = 1.18$. Это соответствует результатам акустических расчетов и тем значениям, которые должны соблюдаться в оперных театрах [2].

Критерий EDT время раннего затухания (Early Decay Time) измеряется аналогично RT с тем отличием, что аппроксимация кривой реверберационного спада производится на участке от 0 дБ до -10 дБ, где за 0 дБ принят максимальный уровень сигнала в момент начала реверберационного процесса. Он является локальным критерием, т.е. обычно достаточно существенно меняется по площади зрительских мест. Измеренные значения EDT в разных зонах зрительских мест и в среднем по залу показаны в табл. 2.

Полученное в Самарском оперном театре значение EDT на средних частотах вполне соответствует величинам, измеренным в пустых оперных театрах с хорошими условиями слышимости [2].

Табл. 2. EDT, с. Результаты измерений в разных зонах мест и в среднем по залу

№		Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Партер	2.11	2.00	1.96	1.85	1.74	1.50
2	Амфитеатр	1.84	1.75	1.74	1.57	1.43	1.25
3	1-й ярус	1.95	1.75	1.75	1.62	1.46	1.21
3	2-й ярус	2.02	1.76	1.78	1.60	1.43	1.17
3	3-й ярус	2.00	1.74	1.77	1.66	1.52	1.29
4	В среднем по залу	1.98	1.80	1.80	1.66	1.52	1.28

В таблице 3 в аналогичной форме показаны результаты измерений C80 индекса прозрачности звучания (Clarity Factor). Этот локальный критерий представляет собой десятикратный логарифм отношения энергии импульсного отклика в первые 80 мс после прихода прямого звука к энергии от 80 мс до затухания реверберационного процесса. Зафиксированные в Самарском оперном театре на средних частотах величины C80 соответствует тем величинам, которые были получены в оперных театрах с высокой акустической репутацией [2] и близки к результатам расчетов, полученных на компьютерной модели зала.

Табл. 3. C80, дБ. Результаты измерений в разных зонах мест и в среднем по залу

№		Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Партер	-3.3	-1,0	-0,1	1.2	1.0	2.1
2	Амфитеатр	-0.4	1.1	1.2	1.9	2.1	2.2
3	1-й ярус	1.2	0.7	0.6	1.8	2.8	3.7
3	2-й ярус	1.1	1.2	1.2	2.6	3.0	4.1
3	3-й ярус	-1.3	1.8	1.6	2.0	2.2	3.2
4	В среднем по залу	-0.5	1.2	1.2	1.9	2.2	3.1

Критерий G сила звука (Strength Factor) является крайне важным в оперных театрах. По определению G представляет собой разность между уровнем звукового давления, измеренным при работе на сцене ненаправленного источника звука, и уровнем звукового давления, который тот же источник звука и на том же уровне звуковой мощности создает на расстоянии в 10 м в условиях свободного звукового поля. Как следует из табл. 4, в среднем по залу (в октавных полосах 500 Гц и 1000 Гц) фиксируются значения $G_{MID}=3.7$ дБ.

Табл. 4. G_{MID} , дБ и STI. Результаты измерений в разных зонах мест и в среднем по залу

Зона мест	Партер	Амфитеатр	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус	В среднем по залу
G_{MID} , дБ	5.2	4.0	3.1	3.2	3.1	3.7
STI	0.51	0.52	0.54	0.55	0.54	0.53

Это несколько выше значений, которые предусматривались в рамках акустического проекта, где задавались пределы $G_{MID}=+(1-3)$ дБ. Однако некоторое повышение значений G_{MID} следует трактовать как положительный фактор, т. к. это способствует увеличению громкости звучания, что особенно важно в достаточно крупных музыкальных залах. Тот факт, что обеспеченные в Самарском оперном театре значения G_{MID} являются вполне приемлемыми, подтверждается сравнением с зарубежными операми с заведомо высокой акустической репутацией. Так в London Opera House значения силы звука составляют $G_{MID}=4.5$ дБ, а в Парижской Opera Garnie $G_{MID}=4.6$ дБ [2]. Известны и другие примеры оперных театров с прекрасной акустикой, у которых значения G_{MID} превышают 3.7 дБ. Следует отметить, что с повышением высоты яруса зрительного зала не наблюдается снижения громкости и значения G_{MID} на всех трех ярусах практически одинаковы.

Критерий ITDG время запаздывания первого интенсивного отражения относительно прямого звука (Initial-Time-Delay Gap) в определяющей степени зависит от геометрии зала и от взаимного расположения источника и приемника звука. Этот критерий определяет субъективную оценку «близкого», «интимного» характера звучания. При размещении микрофона в середине партера (точка 0 на рис. 6), а источника звука в положении S_0 ITDG=30 мс. В других положениях источника и приемника звука ITDG не превышает это значение, и в большинстве случаев составляет 18...25 мс, что характерно для оперных театров с высокой акустической репутацией.

В настоящее время оценка разборчивости в большинстве случаев проводится по критерию STI индекс передачи речи (Speech Transmission Index), представляющим собой безразмерный коэффициент, который может изменяться от 0 до 1 [4]. При этом его значения соотносятся с субъективной оценкой разборчивости речи следующей стандартизованной зависимостью:

Значения STI	0.75-1.00	0.6-0.75	0.45-0.60	0.30-0.45	0.00-0.30
Разборчивость	Отличная	Хорошая	Удовлетворительная	Плохая	Недопустимо плохая

Рассматриваемый зал не является речевым, однако оценка разборчивости речи в оперном театре представляется оправданной применительно к необходимости хорошо понимать текст вокальных выступлений солистов и хора. Поэтому на основании измеренных импульсных откликов зала были вычислены величины STI (табл. 4). Как следует из этих данных, значения STI в зале театра мало меняются по площади зрительских мест и в среднем по залу составляют $STI=0.53$, что соответствует удовлетворительной разборчивости речи. Здесь, однако, следует учесть, что критерий

STI был разработан для оценки разборчивости речи как чисто семантической информации. В оперном театре мы встречаемся с вокализованной речью (пением), которое всегда имеет гораздо более медленный темп, чем обычная разговорная речь. Поэтому значения $STI > 0.50$ хотя формально и соответствуют удовлетворительной разборчивости разговорной речи, но заведомо обеспечивают как минимум хорошую понятность пения. Это подтверждается и субъективной оценкой. Даже в пустом зале Самарского театра пение солистов и хора оказывается хорошо понятным во всех зонах зрительских мест.

Измеренные структуры звуковых отражений носят благоприятный характер с достаточным количеством ранних полезных звуковых отражений, обеспечивающих акустическую поддержку зала. Никаких нежелательных поздних отражений высокого уровня, которые могли бы привести к образованию слышимого эхо, не было выявлено. Субъективно эхо в зале театра также не прослушивается. На рис. 7 и 8 показаны два примера импульсных откликов зала, представленных в форме кривых энергия-время ЕТС в течение первых 250 мс после прихода прямого звука.

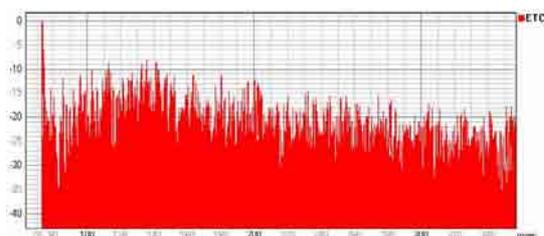


Рис. 7. ЕТС. Источник звука в точке S_H сцены; микрофон в центре партера (точка 0)

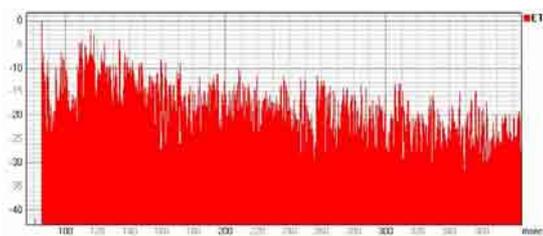


Рис. 8. ЕТС. Источник звука в точке S_0 сцены; микрофон на 2-м ярусе (точка 12)

Субъективная оценка звучания в зале проводилась в ходе многочасовой репетиции, которая состоялась после выполнения в зале акустических измерений. В репетиции участвовал расположившийся в оркестровой яме симфонический оркестр, а также солисты и хор театра. В ходе репетиции звучали сольные и хоровые оперные выступления, и дирижер имел возможность опробовать размещение оркестра на разных положениях подъемно-опускного пола ямы.

В последующих беседах дирижер, солисты оперы, хормейстер и другие сотрудники театра дали очень высокую оценку качеству звучания в зале. Солисты отметили, что петь на сцене легко и никаких мешающих акустических факторов типа слышимого эхо они не заметили. Вокализованная речь была хорошо понятна во всех зонах зала, включая самый верхний 3-й ярус. Сотрудники театра особо отметили хорошую прозрачность звучания и оптимальный музыкальный баланс оркестра в яме и певцов на сцене. Разумеется, окончательный вывод о высокой акустической репутации зала может быть сделан только после накопления опыта проведения в нем музыкальных спектаклей. Отзывы о первых музыкальных постановках, проведенных в зале в присутствии публики, также оказались весьма благоприятными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных измерений позволяют сформулировать следующие выводы, которые подтверждаются первоначальной субъективной оценкой:

- В реконструированном зале обеспечивается рекомендованный для оперных театров оптимум времени реверберации.
- Прозрачность звучания в зале признана хорошей в сочетании с достаточной объемностью звучания, что, как правило, довольно трудно совместить.
- Певческий голос хорошо понятен во всех зонах зрительских мест, громкость его звучания достаточна.
- Достигается оптимальный музыкальный баланс оркестра и вокалистов, что в значительной степени определяется возможностью регулировать отметку пола ямы согласно требованиям дирижера.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2303-03. Защита от шума. М., 2004.
2. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses. Second Edition. Springer. New York. 2004.
3. ISO 3382-1:2009. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1. Performance spaces.
4. IEC 60268-16. Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.