

УСИК В. В., кандидат технических наук, доцент (Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт")

МЯГКИЙ И. Г., главный инженер (ООО "Musicland")

Использование первых двух этапов акустической экспертизы помещений зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест

Авторами рассмотрены основные результаты применения первых этапов акустической экспертизы помещений на примере драматического театра на 500 мест. Проведен анализ и обоснование основных факторов, влияющих на акустические свойства помещения. Описан алгоритм последовательного применения трех теорий распространения звуковых волн в помещении. Использование статистической теории позволило провести анализ решений по обработке звукопоглощающими материалами ограждающих поверхностей помещения с целью обеспечения оптимальной частотной зависимости времени реверберации. Использование геометрической теории позволило провести анализ существующих архитектурных и строительных решений, разработать рекомендации для третьего этапа экспертизы.

Ключевые слова: акустические свойства помещения, статистическая теория, геометрическая теория распространения звука, время реверберации, реверберационный процесс.

Постановка задачи

Задача создания оптимальных акустических условий в помещении в целом, в зависимости от его назначения, и на каждом зрительском месте подразумевает выполнение рекомендаций, направленных на создание и оптимизацию звукового поля в помещении.

Акустические свойства помещения определяются следующими факторами: объемом и формой помещения; количеством и наличием публики; размерами, формой, конструкциями ограждающих поверхностей; применяемыми материалами отделки поверхности помещения и распределением их на поверхностях помещения.

Все перечисленные акустические свойства, в той или иной степени, взаимосвязаны с объективными и субъективными критериями оценки акустики помещения, такими как: гулкость-жизненность; пространственность; различимость и ясность; разборчивость; громкость; теплота; отсутствие эха.

Таким образом, задачу акустической экспертизы можно разделить на три этапа:

- этап проверки существующих архитектурно-строительных решений внутренних поверхностей помещения с целью выявления фокусирующих звуковые лучи поверхностей (снижающих диффузность поля), а также получение частотной зависимости времени реверберации и сравнения с оптимальным временем реверберации;

- этап выработки рекомендаций с целью повышения диффузности звукового поля и обеспечения оптимальной структуры реверберационного процесса (этап создания технического задания на разработку конструкций ограждающих поверхностей);

- этап акустического моделирования помещения с рекомендуемыми отделочными материалами и рекомендуемыми в техническом задании ограждающими поверхностями.

Статья, предложенная авторами, описывает первые два этапа акустической экспертизы помещения зрительного зала.

Основная часть

Основой для выполнения акустической экспертизы являются чертежи разрезов и планов помещения, предоставленных заказчиком.

Исходные данные драматического театра на 500 мест:

- общий воздушный объем зрительного зала – 4980 м³;

- количество посадочных мест в зрительном зале – 500;

- средняя высота зала над зрительским местом – 10 м;

- присутствует балкон на высоте +6.200 (отметка пола первого ряда балкона):

- высота просвета между зрительскими местами и балконом – 3,3 м;

- высота между верхним рядом зрительских мест на балконе и потолком зрительного зала – 4 м.

Статистическая теория

Одним из основных критериев оценки акустики помещения является частотная зависимость времени реверберации в помещении [1 - 4, 10 - 12]. Полученная частотная зависимость времени реверберации сравнивается с оптимальным временем реверберации T_{500} , а также с допустимыми отклонениями времени реверберации от оптимального значения

Для драматических театров оптимальное время реверберации рассчитывают по формуле

$$T_{500} = 0,37 \cdot \lg(V) - 0,1 = 1,26c,$$

где V – объем помещения, m^3 .

Допустимые пределы отклонения частотной зависимости времени реверберации от оптимального значения представлены на рис. 1.

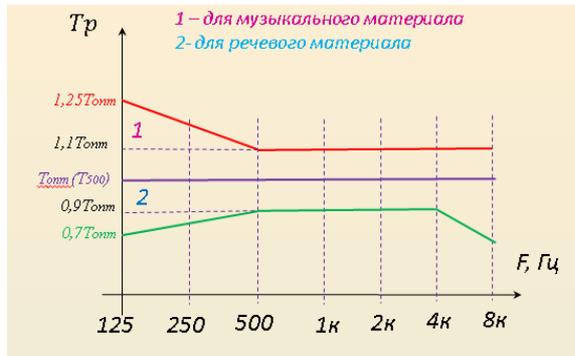


Рис. 1. Границы предельных отклонений от оптимального значения стандартного времени реверберации

Время реверберации определяется как время, по истечении которого плотность звуковой энергии в помещении после выключения источника звука уменьшается в 10^6 раз от установившегося значения (или уровень падает на 60 дБ).

Для расчета стандартного времени реверберации в условиях диффузного поля необходимо:

– для каждой частоты получить среднее значение коэффициента поглощения по формуле

$$\alpha_{cp,f} = \frac{\sum A_f}{\sum S},$$

где $\sum A_f$ – эквивалентный фонд звукопоглощения на соответствующей частоте;

$\sum S$ – суммарная площадь звукопоглощения;

– для каждой частоты рассчитать значение реверберационного коэффициента поглощения

$$\alpha'_{cp,f} = -\ln(1 - \alpha_{cp,f});$$

– получить значение стандартного времени реверберации для частот 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц и 1000 Гц по формуле

$$T_{h,f} = \frac{0,164 \cdot V}{S \cdot \alpha'_{cp,f}}.$$

На частотах 2000 и 4000 Гц учесть звукопоглощение в воздухе и провести расчет по формуле

$$T_{h,f} = \frac{0,164 \cdot V}{S \cdot \alpha'_{cp,f} + 4 \cdot \mu \cdot V},$$

где μ – коэффициент затухания звука в воздухе.

Дополнительный фонд звукопоглощения составляют зрители, сидящие на креслах, свободные зрительские места, мебель и т. д. [5, 6, 7.]

Количество зрительских мест в зале зависит от объема зала и назначения зала, а именно от удельного объема воздушного пространства, приходящегося на одного зрителя в зависимости от назначения зала.

В соответствии с [8,9] удельный воздушный объем на одно зрительское место должен составлять, m^3 :

- в залах драматических театров, аудиториях и в конференц-залах 4 - 5;
- в залах музыкально-драматических театров (оперетта) 5 - 7;
- в залах театров оперы и балета 6 - 8;
- в концертных залах камерной музыки 6 - 8;
- в концертных залах симфонической музыки 8 - 10;
- в залах для хоровых и органнх концертов 10 - 12;
- в многоцелевых залах 4 - 6;
- в концертных залах современной эстрадной музыки, киноконцертных залах 4–6.

Таким образом, удельный воздушный объем на одно зрительское место должен составлять в среднем $6 m^3$. Зная объем зрительского зала, получают рекомендуемое количество зрительских мест в зале $\frac{4980 m^3}{6 m^3} = 830 мест$.

Однако в проектируемом зале предложено 500 мест. Т. е. на каждого слушателя приходится $9,96 m^3$ удельного воздушного объема помещения, что может привести к повышению гулкости восприятия музыкального материала и снижению ясности и разборчивости речевого материала.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Расчет частотной зависимости времени поверхностей, проводят с использованием реверберации, на основе предложенных архитектурно-статистической теории распространения звука в строительных решений отделки ограждающих помещения (рис. 2, 3).

Эквивалентной площади звукопоглощения
Общий фонд звукопоглощения

Таблица 1

№ п/п	Поверхности, материалы	Площадь, м2	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м2 на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S	α	α*S
1	Боковые стены: KNAUF-Acoustic ППГЗ-С2-12/25 Перфорированные гипсокартонные звукопоглощающие плиты KNAUF-Акустика с квадратной перфорацией в 2 слоя - окраска водоземulsionной краской за 2 раза цвет - RAL 6013	201,76	0,25	50,25	0,60	120,60	1,00	201,00	0,90	180,90	0,60	121,06	0,60	121,06
2	Боковые стены: DECOR ACOUSTIC акустические панели из шпонированного MDF · EСORNON - дуб красный	270,4	0,10	27,00	0,60	162,00	1,15	310,96	1,10	297,44	0,80	216,32	0,60	162,24
3	Потолок: KNAUF-Acoustic ППГЗ-С2-12/25 Перфорированные гипсокартонные звукопоглощающие плиты KNAUF-Акустика с квадратной перфорацией в 2 слоя - окраска водоземulsionной краской за 2 раза цвет - RAL 6013	550,2	0,25	137,50	0,60	330,00	1,00	550,00	0,90	495,00	0,60	330,12	0,60	330,12
4	Полы партера: Ковролин толщ 9 мм по бетону	630,95	0,09	56,70	0,08	50,40	0,21	132,30	0,26	163,80	0,27	170,10	0,37	233,10
5	Портальные стены: GIPBRD 1/2, гипсокартон 12 мм	577,92	0,25	144,25	0,10	57,70	0,05	28,85	0,04	23,08	0,07	40,39	0,07	40,39
6	Пол авансены: WOODFLR HWD, палубный брус-сцена	34,32	0,15	5,10	0,11	3,74	0,10	3,40	0,07	2,38	0,06	2,04	0,07	2,38
7	Пол планшета сены: WOODFLR HWD, палубный брус-сцена	394,15	0,15	59,10	0,11	43,34	0,10	39,40	0,07	27,58	0,06	23,64	0,07	27,58
8	Проем сены	394,15	0,20	78,80	0,30	118,20	0,30	118,20	0,30	118,20	0,30	118,20	0,30	118,20
9	Полы балкона: Ковролин толщ 9мм по бетону	117,61	0,09	10,53	0,08	9,36	0,21	24,57	0,26	30,42	0,27	31,59	0,37	43,29
10	Ограждения балкона: DECOR ACOUSTIC акустические панели из шпонированного MDF · EСORNON - дуб красный	37,16	0,10	3,70	0,60	22,20	1,15	42,73	0,10	3,72	0,80	29,73	0,60	22,30
11	Задняя стена партера и балкона: KNAUF-Acoustic ППГЗ-С2-12/25 Перфорированные гипсокартонные звукопоглощающие плиты KNAUF-Акустика с квадратной перфорацией в 2 слоя - окраска водоземulsionной краской за 2 раза цвет - RAL 6013	213,41	0,25	53,25	0,60	127,80	1,00	213,00	0,90	191,70	0,60	128,05	0,60	128,05
12	Внутреннее ограждение балкона: GIPBRD 1/2, гипсокартон 12 мм	25,13	0,25	6,25	0,10	2,50	0,05	1,25	0,04	1,00	0,07	1,75	0,07	1,75
13	Оркестровая яма: PLAST/TILE, штукатурка рельефная по ж/б	61,44	0,01	0,61	0,01	0,61	0,02	1,22	0,03	1,83	0,04	2,44	0,05	3,05
14	Боковые стены сценической коробки: CLAY BRICK, кирпичная кладка	720,44	0,16	115,20	0,13	93,60	0,15	108,00	0,11	79,20	0,13	93,60	0,14	100,80
15	Передняя стена сценической коробки: CLAY BRICK, кирпичная кладка	670,32	0,16	107,20	0,13	87,10	0,15	100,50	0,11	73,70	0,13	87,10	0,14	93,80
16	Потолок сценической коробки: HARDBOARD, профнастил	394,21	0,09	35,46	0,45	177,30	0,25	98,50	0,15	59,10	0,10	39,40	0,10	39,40
17	Портальные стены со стороны сценической коробки: CLAY BRICK, кирпичная кладка	323,6	0,16	51,68	0,13	41,99	0,15	48,45	0,11	35,53	0,13	41,99	0,14	45,22

Дополнительный фонд звукопоглощения

Таблица 2

№ п/п	Зрители, кресла	Число, n	Значение А и эквивалентной площади звукопоглощения An, м2 на частотах:											
			125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			A	An	A	An	A	An	A	An	A	An	A	An
18	Зрители, сидящие на мягк. стульях	375	0,50	187,50	0,70	262,50	0,85	318,75	0,95	356,25	0,95	356,25	0,90	337,50
19	Кресло мягк., обитое тканью с пор. заполн. сид. и спин.	125	0,15	18,75	0,20	25,00	0,20	25,00	0,25	31,25	0,30	37,50	0,30	37,50

Суммарная площадь звукопоглощения ΣS	4008,6	ΣA_f	1148,83	1735,94	2366,08	2172,08	1871,26	1887,72
Средний коэффициент звукопоглощения $\alpha_{ср}$			0,29	0,43	0,59	0,54	0,47	0,47
-LN(1- $\alpha_{ср}$)			0,34	0,57	0,89	0,78	0,63	0,64
Стандартное время реверберации T_r			2,33	1,39	0,88	1,01	1,23	1,19

Рис. 2. Расчет частотной зависимости стандартного времени реверберации

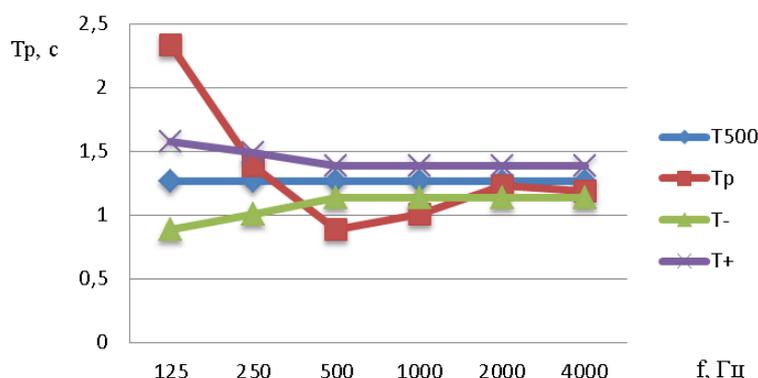


Рис. 3. График частотной зависимости стандартного времени реверберации:

T_{500} - оптимальное время реверберации; T_p - стандартное время реверберации;
 T_- - нижняя граница предельных отклонений; T_+ - верхняя граница предельных отклонений

Анализ полученной частотной зависимости времени реверберации позволяет сделать следующие выводы:

- превышение времени реверберации на низких частотах, по сравнению со среднечастотным значением, более чем в 2 раза крайне негативно скажется на общем восприятии речевого и музыкального материала (резко снизится ясность речевого материала (C_{50}) и различимость и ясность музыкального материала (C_{80}), появится гулкость).

Вероятные причины подобного явления – отсутствие специальных мер при обработке сценической коробки (выбор и размещение материалов на ограждающих поверхностях сценической коробки), завышенное значение удельного объема воздуха, приходящегося на зрительское место;

- время реверберации в области средних частот находится значительно ниже допустимых пределов отклонения времени реверберации, что приведет к тому, что звуковой контент, как речевой, так и музыкальный, будет восприниматься "сухим" или "пустым".

Возможные причины – излишнее количество звукопоглощающих панелей KNAUF-Acoustic (ППГЗ-С2-12/25) и DECOR ACOUSTIC (акустические панели из шпонированного MDF, ESO PHON) в зрительском зале, расположенных на потолке, стенах и ограждениях балкона;

- повышение времени реверберации на высоких частотах по сравнению со средними частотами (при условии учета звукопоглощения в воздухе).

Возможные причины – использование звукопоглощающих материалов с холмообразной зависимостью коэффициентов звукопоглощения.

Проверка архитектурно-строительных решений (геометрическая теория)

Для проверки архитектурно-строительных решений по конфигурации ограждающих поверхностей стен и потолка в помещении драматического театра использовалась геометрическая теория распространения звука в помещении [11, 12]. Используя ее основополагающие принципы, получают лучевые эскизы (лучевые картины) на планах помещения и продольном разрезе.

Для создания диффузного звукового поля необходимо, чтобы звуковые волны не фокусировались в определенных областях, приводя к неравномерности плотности звуковой энергии в помещении. Форма потолка должна способствовать, с одной стороны, равномерному распределению звуковой энергии на всю площадь зрительских мест, а с другой стороны - обеспечивать первые ранние отражения в структуре реверберационного процесса на каждом зрительском месте.

Исходными данными для анализа являются чертежи профиля звукоотражающих конструкций потолка и стен на 1 и 2 этажах. На рис. 4 представлены лучевые картины, полученные для профиля потолка существующего архитектурно-строительного решения.

Анализ лучевых картин позволяет сделать следующее заключение о форме звукоотражающих поверхностей:

- звукоотражающий козырек не обеспечивает равномерного распределения звуковых лучей на всех зрительских местах;

- присутствуют зоны, в которых звуковые лучи не приходят, а значит, в таких областях не будет достаточной диффузности поля, и если первые отражения придут сзади или спереди, то субъективно звук будет казаться плоским;

– на зрительские места, расположенные на балконе, первые отражения придут не сверху, а практически с тыла, что приведет к резкому ухудшению качества звучания.

На рис. 5 представлены лучевые картины, полученные для профиля потолка предлагаемого варианта профиля звукоотражающего потолка.

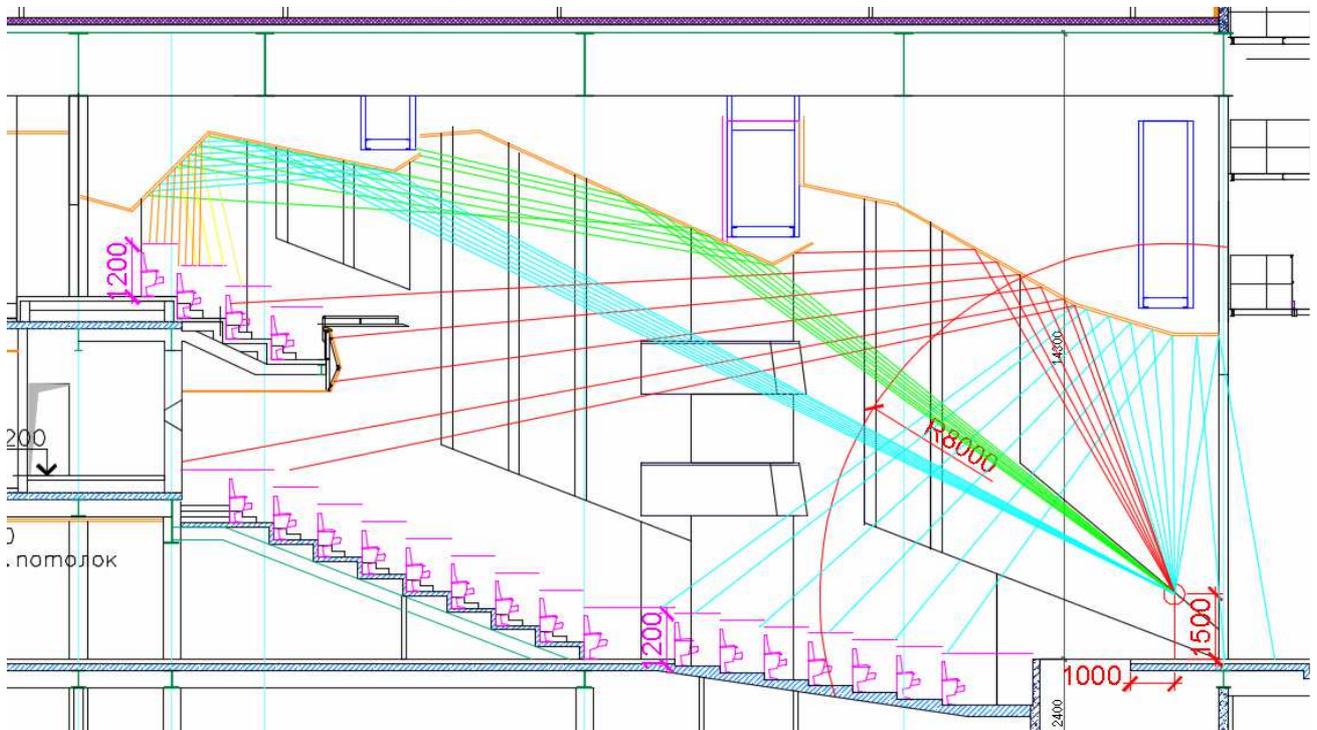


Рис. 4. Разрез зала с построением звуковых отражений от существующего профиля потолка

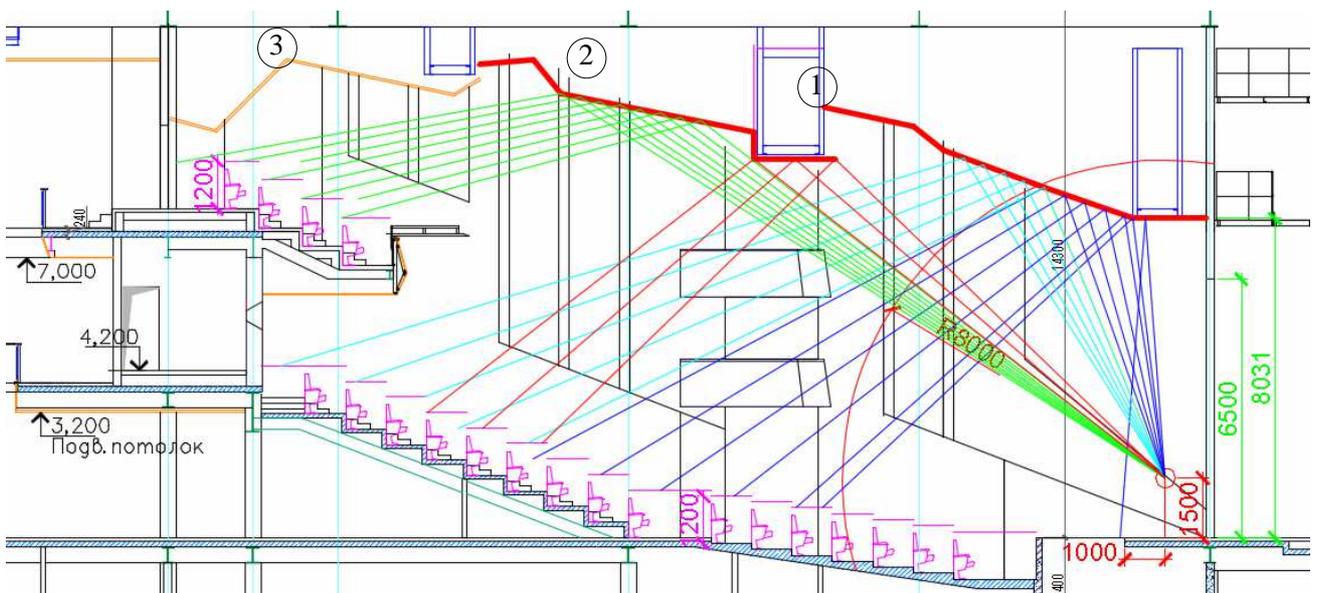


Рис. 5. Разрез с построением звуковых отражений от рекомендуемого профиля потолочных звукоотражающих конструкций

Предлагаемый профиль звукоотражающих конструкций позволяет равномерно распределить звуковые отражения для всех зрительских мест без фокусировки звуковых лучей. Конструкция козырька (1) позволяет получить ранние отражения для всех зрительских мест, находящихся в партере. Получение требуемых отражений для зрительских мест, находящихся на балконе, обеспечивается конструкцией козырька (2). Завершающий участок потолочных конструкций (3) практически не используется для получения ранних отражений на

зрительских местах, поэтому он должен обладать достаточно высокими звукопоглощающими свойствами. Поздние отражения, полученные от конструкции (3), при малой интенсивности будут способствовать ощущению "обертывания" ("погружения") звуком.

Для проверки геометрии стеновых конструкций на втором этаже использовался чертеж плана 2 этажа. На рис. 6 представлен лучевой эскиз, полученный при отражении от предложенных стеновых отражающих поверхностей.

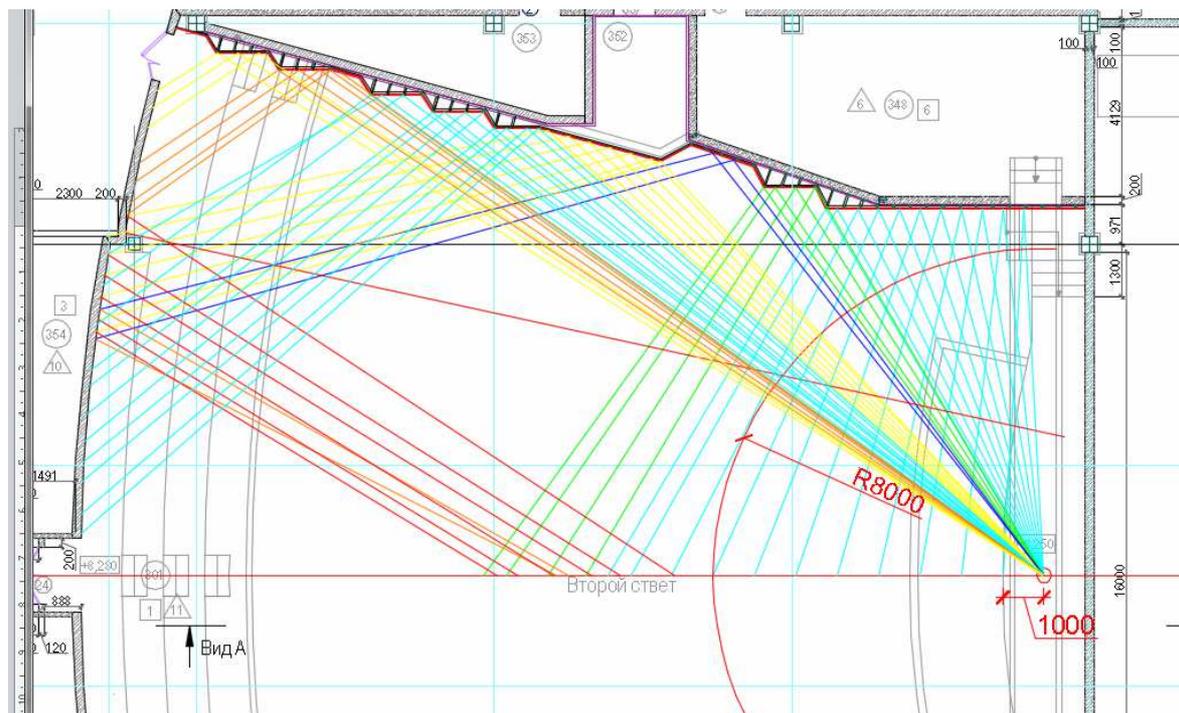


Рис. 6. План 2 этажа с построением звуковых отражений от существующих профилей стеновых панелей

Верхняя часть стен в зрительном зале является площадками отражений высокого порядка, а это значит, что отражения от верхних частей стен формируют завершающий участок в структуре реверберационного процесса (реверберационный хвост). Для участка поздних отражений необходимо также создавать равномерное диффузное поле с целью получения плавного спада плотности звуковой энергии и обеспечения одинакового ощущения времени реверберации на зрительских местах. Получение достаточного количества поздних отражений, пришедших с разных направлений, позволяет улучшать эффект "погружения" или "обертывания".

Анализ лучевой картины, представленной на рис. 4, показал, что данная конструкция стеновых панелей не удовлетворяет требованиям к формированию звукового поля в помещении.

На рис. 7 приведена лучевая картина при отражении от рекомендуемого профиля стеновых конструкций.

Для проверки геометрии стеновых конструкций на первом этаже использовался чертеж плана 1 этажа. Так как нижняя часть стен в зрительном зале является площадками, отражаясь от которых звуковая энергия приходит на всю плоскость зрительных мест после одного или двух отражений, то эта часть стен формирует начальный участок реверберационного процесса. Наличие в реверберационном процессе ранних отражений от боковых стен положительно влияет на пространственность звучания. Таким образом, необходимо получить на всех зрительских местах приход ранних боковых отражений.

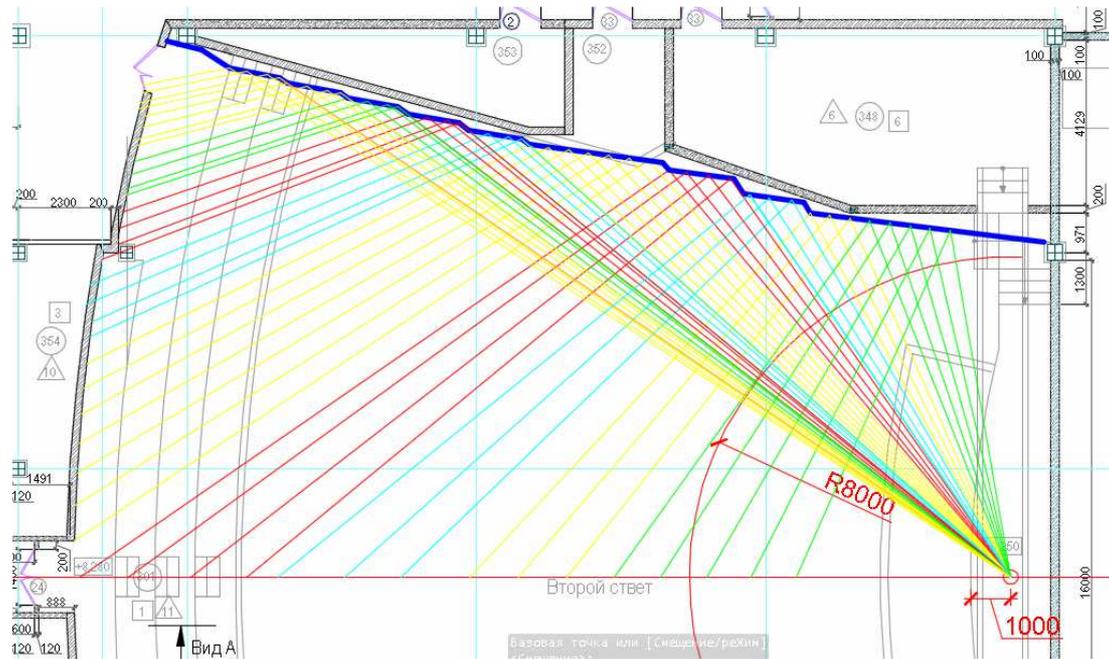


Рис. 7. План 2 этажа с построением звуковых отражений от рекомендуемых профилей стеновых панелей

На рис. 8 получены лучевые картины для проверки решений конструкций стеновых панелей на 1 этаже. Анализ лучевого эскиза позволил сделать следующий вывод: предложенная конструкция боковых стен не отвечает поставленной задаче равномерного распределения звуковой энергии на зрительских местах с целью формирования ранних боковых отражений. На рис. 9 предложен лучевой

эскиз, полученный при отражении от рекомендуемого профиля стеновых конструкций. Рекомендуемый профиль стен на 1 этаже совпадает с профилем конструкции на 2 этаже. Анализ эскиза показывает, что исходные стены удовлетворяют поставленным задачам формирования звукового поля и ранних отражений.

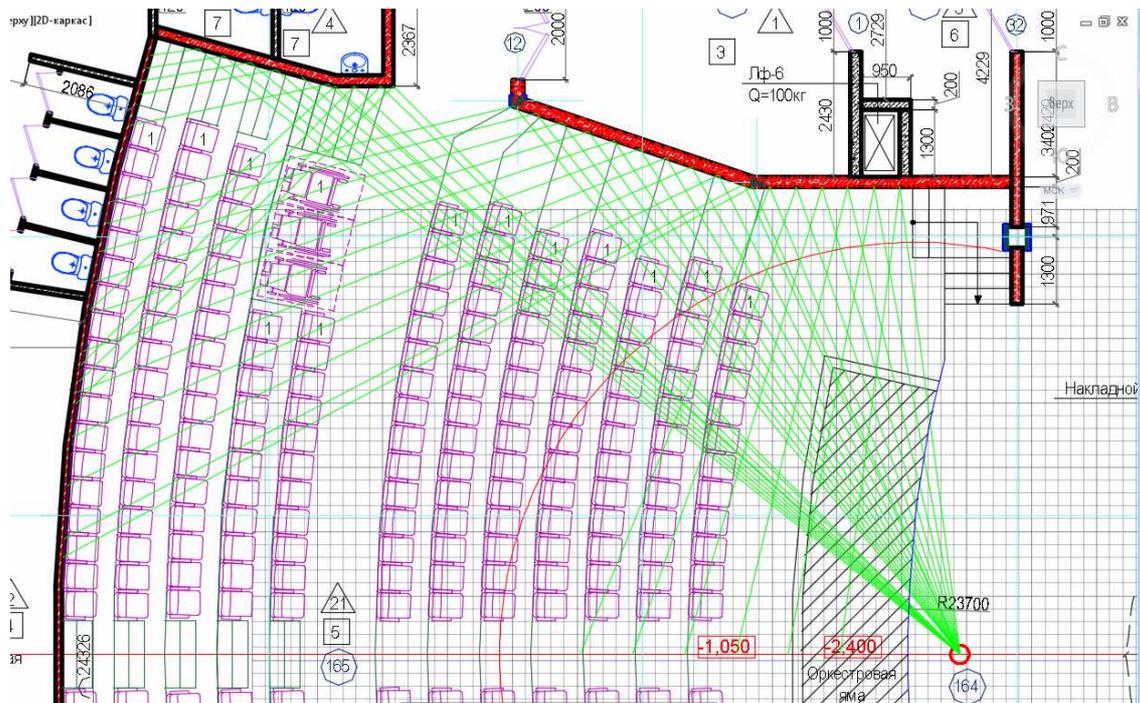


Рис. 8. План 1 этажа с построением звуковых отражений от существующих профилей стеновых панелей

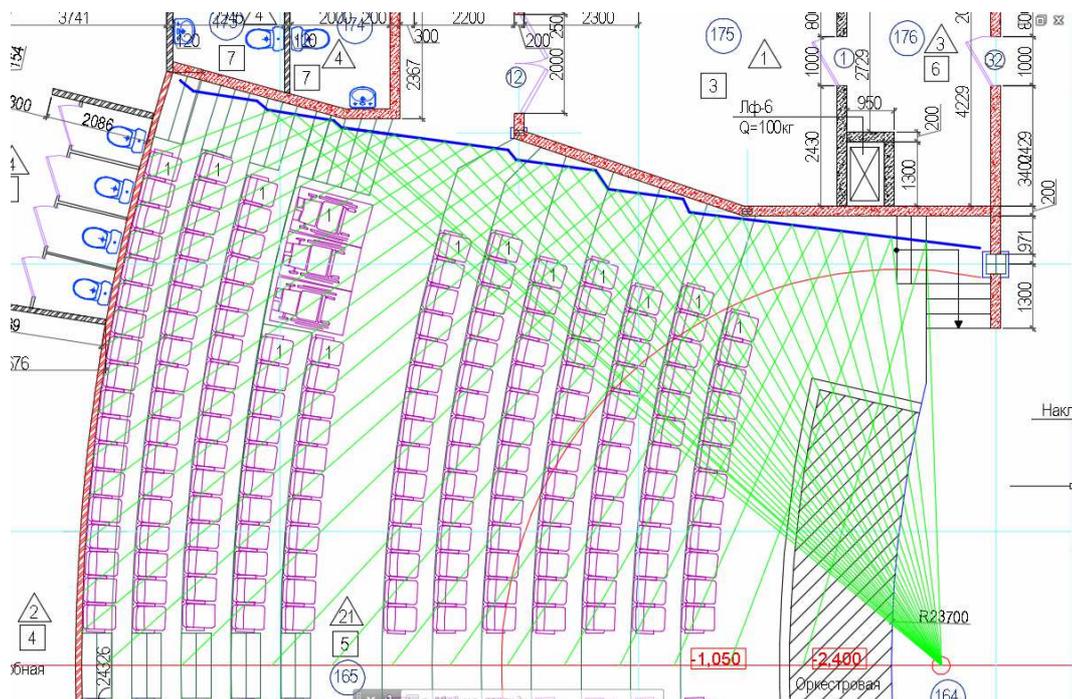


Рис. 9. План 1 этажа с построением звуковых отражений от рекомендуемых профилей стеновых панелей

Выводы

Моделирование акустических свойств зала драматического театра проводилось в программе Ease 4.4. Использование программного продукта Ease 4.4. позволило провести: проверку предложенных на первом и втором этапах акустической экспертизы проектных решений по геометрии стеновых и потолочных панелей; выбор материалов отделки поверхностей в помещении с целью получения требуемой формы частотной зависимости времени реверберации; оценку предложенной системы озвучивания; анализ объективных параметров звукового поля в помещении; анализ структур реверберационных процессов на контрольных зрительских местах.

Литература

1. Справочник по акустике [Текст] / под ред. М. А. Сапожкова. – М.: Связь, 1979. – 312 с.
2. Папернов, Л. З. Расчет и проектирование систем озвучения и звукоусиления в закрытых помещениях [Текст] / Л. З. Папернов, Н. Т. Молодая, Ч. М. Метер. – М.: Связь, 1979. – 144 с.
3. Рейхардт, В. Акустика общественных зданий [Текст] / В. Рейхардт; пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1984. – 198 с.
4. Щиржецкий, Х. А. Акустика зальных помещений [Текст] / Х. А. Щиржецкий, Л. А. Борисов // Сцена. – 2002. – №2. – С. 21.
5. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости [Текст] / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1981. – 47 с.
6. Ватсон, Ф. Р. Архитектурная акустика [Текст] / Ф. Р. Ватсон; пер. с англ. – М.: ИЛ, 1948. – 207 с.
7. Анерт, В. Техника звукоусиления. Теория и практика [Текст] / В. Анерт, Ф. Стефен; пер. с англ. – М: ООО «ПКФ Леруша», 2003. – 416 с.
8. Макриненко, Л. И. Акустика помещений общественных зданий [Текст] / Л. И. Макриненко. – М.: Стройиздат, 1986. – 173 с.
9. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости [Текст] / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1981. – 47 с.
10. Усик, В. В. Автоматизированный акустический расчет помещений зрительных залов с использованием статистической теории [Текст] / В. В. Усик, И. Г. Мягкий // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2010. – №3/11. – С. 22-26.
11. Усик, В. В. Применение геометрической теории для построения профиля звукоотражающей поверхности [Текст] / В. В. Усик, И. Г. Мягкий // Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків, 2011. – Вип. 1 (27). – С. 166-169.
12. Порошин, С. М. Методика проведения акустической экспертизы и архитектурно-

строительных решений для зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест [Текст] / С. М. Порошин, В. В. Усик // 36. наук. праць VI Міжнародного Радіоелектронного Форуму "Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку" (МРФ – 2017). – Харків, 2017. – С. 125-130.

Усик В. В., Мягкий І. Г. Використання перших двох етапів акустичної експертизи приміщень глядацьких залів на прикладі драматичного театру на 500 місць. Авторами розглянуті основні результати застосування перших етапів акустичної експертизи приміщень на прикладі драматичного театру на 500 місць. Проведено аналіз та обґрунтування основних факторів, що впливають на акустичні властивості приміщення. Описаний алгоритм послідовного застосування трьох теорій поширення звукових хвиль в приміщенні. Використання статистичної теорії дозволило провести аналіз рішень з обробки звукопоглинальними матеріалами огорожувальних поверхонь приміщення з метою забезпечення оптимальної частотної залежності часу реверберації. Використання геометричної теорії дозволило провести аналіз існуючих архітектурних і будівельних рішень, розробити рекомендації для третього етапу експертизи.
Ключові слова: акустичні властивості приміщення, статистична теорія, геометрична теорія поширення звуку, час реверберації, ревербераційний процес.

Усик В.В., к.т.н, доцент кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна. E-mail: usik.viktory@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-3515-4849.

Мягкий Ігор Григорович, головний інженер ТОВ "Musicland", Харків, Україна. E-mail: miagky1954@gmail.com

Usik Victoriya, Dr. of Philosophy, docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine. E-mail: usik.viktory@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-3515-4849.

Myagkiy I.G., head engineer "Musicland", Kharkiv, Ukraine. E-mail: miagky1954@gmail.com

Usik V.V., Myagky I.G. Use of the first two stages of acoustic examination of rooms of auditoriums by the example of a dramatic theater for 500 seats. The authors consider the main results of the application of the first stages of the acoustical examination of premises using the example of a dramatic theater for 500 seats. The analysis and substantiation of the main factors affecting the acoustic properties of the room are carried out. An algorithm for the sequential application of three theories of the propagation of sound waves in a room is described. The use of the statistical theory made it possible to analyze solutions for processing sound-absorbing materials of the enclosing surfaces of the room in order to ensure the optimum frequency dependence of the reverberation time. Using the geometric theory allowed to analyze existing architectural and building solutions, develop recommendations for the third stage of the examination.
Key words: acoustical authorities, statistical theory, geometric theory widening sound, reverberation hour, reverberation process.

Надійшла 10.10.2017 р.