

ARCHITECTURE

THE ARCHITECTURE OF THE FAN-SHAPE AUDITORIUM. FORMATION OF LATERAL REFLECTIONS

Isakov Y.,

graduate student,

FSBEI HE "Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts named after A.D. Kryachkov. "

Russia, Novosibirsk

ORCID:0000-0002-3312-7329

Scientific adviser: **Likhachev E.N.**

Candidate of Architecture, Associate Professor

FSBEI HE "Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts named after A.D. Kryachkov. ",

Russia, Novosibirsk

АРХИТЕКТУРА ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА ВЕЕРНОЙ ФОРМЫ. ФОРМИРОВАНИЕ БОКОВЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Исаков Ю.И.,

аспирант.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова».

Россия, Новосибирск

Научный руководитель: **Лихачёв Е.Н.**

кандидат архитектуры, доцент

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова».

Россия, Новосибирск

Abstract

The fan-shaped auditorium has several advantages for the comfort of the audience. But these shape halls do not have enough lateral reflections, and therefore are not considered to be of high quality for symphonic music. The article presents the results of theoretical studies of the fan-shaped auditorium to increase the Lateral Fraction (LF) and improve uniformity sound field due the geometry of the side walls, and specially designed Schroeder diffusers. The article also describes a geometric method for determining the installation locations of emitters that form active side reflections. As a result of the research, it was determined that active lateral reflections formed by VXL (Yamaha) columns combine specially designed Schroeder diffusers make it possible to provide an average value of the lateral fraction LF of more than 30% over the auditorium sound field in the frequency band from 100 Hz to 1250 Hz.

Аннотация

Веерная форма зрительного зала имеет ряд преимуществ для комфорта зрителей. Но эти залы не имеют достаточно боковых отражений и не считаются качественными для симфонической музыки. В статье представлены результаты теоретических исследований зрительного зала веерной формы по увеличению доли боковой составляющей *Lateral Fraction* (LF) и улучшению равномерности звукового поля за счет геометрии боковых стен, и специально разработанных диффузоров Шредера. Также в статье описывается геометрический метод определения мест установки излучателей, формирующих активные боковые отражения. В результате исследований определено, что активные боковые отражения, сформированные колоннами VXL (Yamaha), в сочетании со специально разработанными диффузорами Шредера, позволяют обеспечить среднее значение доли боковой составляющей LF более 30% по звуковому полю аудитории в полосе частот от 100Гц до 1250Гц.

Keywords: architecture, fan-shaped auditorium, lateral fraction, active lateral reflections.

Ключевые слова: архитектура, зрительный зал веерной формы, доля боковой составляющей, активные боковые отражения.

1. Вступление.

Веерная форма зрительного зала предпочтительна, в первую очередь, по визуальному комфорту зрителей. Чарльз Фоллен МакКим, выдающийся американский архитектор, предложил в 1894

году форму нового симфонического зала Бостона по образцу греческого театра. Николас Эдвардс [1] приводит оценку предлагаемой МакКим формы, данную Уоллесом Сабинном, как «идеальный современный зал» для музыки. В наше время веерный зал

можно считать идеальным для конференции и популярной музыки со звукоусилением, но для классической симфонической музыки он проблематичен, прежде всего, из-за недостатка боковых отражений. О значимости боковых отражений в акустическом качестве симфонического зрительного зала известно из работ Гарольда Маршала [2], Микаэла Баррона [3], Николаса Эдвардса [4] и др. Боковые отражения влияют на кажущуюся ширину источника и на пространственность звучания. Оценивают долю боковой составляющей *Lateral Fraction* (LF) [5] по формуле:

$$J_{LF} = \frac{\int_{0,005}^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_{0,080} p^2(t) dt}, \quad (1)$$

где $p(t)$ – мгновенное звуковое давление импульсного отклика помещения, измеренное микрофоном с диаграммой направленности «круг»;

$p_L(t)$ – мгновенное звуковое давление импульсного отклика помещения, измеренное микрофоном с диаграммой направленности «восьмерка».

Доля боковой составляющей J_{LF} по ISO 3382-1 [5] должна быть от 0,05 до 0,35. В программе EASE доля боковой составляющей представлена в процентах и поэтому в этой работе будем применять значение $LF = 5\% \dots 35\%$. Диапазон частот: четыре

октавные полосы 125Гц, 250Гц, 500Гц, 1кГц, или от 100Гц до 1250Гц в третьоктавном представлении. Из формулы (1) видно, что полезными могут считаться боковые отражения, запаздывающие за прямым звуком на слушательских местах в интервале от 5мс до 80мс. Очень важное условие — это направление прихода боковых отражений. В данном исследовании изучается два подхода по улучшению акустики веерного зала. Первый – пассивные боковые отражения формируются за счет формы боковых стен. Второй – активные боковые отражения формируются за счет дополнительных излучателей, используя технологию активного управления звуковым полем (АУЗП).

2. Формирование пассивных боковых отражений в зрительном зале веерной формы.

Существует методика построения отражающих поверхностей с помощью эллипса.

Свойство эллипса – сумма расстояний от фокусов до любой точки эллипса постоянна – следовательно конкретный эллипс определяет конкретное время задержки. Используя это свойство, можно построить поверхность с требуемой задержкой отражений, как касательную к эллипсу, если в одном фокусе поместить источник, а в другом приемник, рис.1(а).

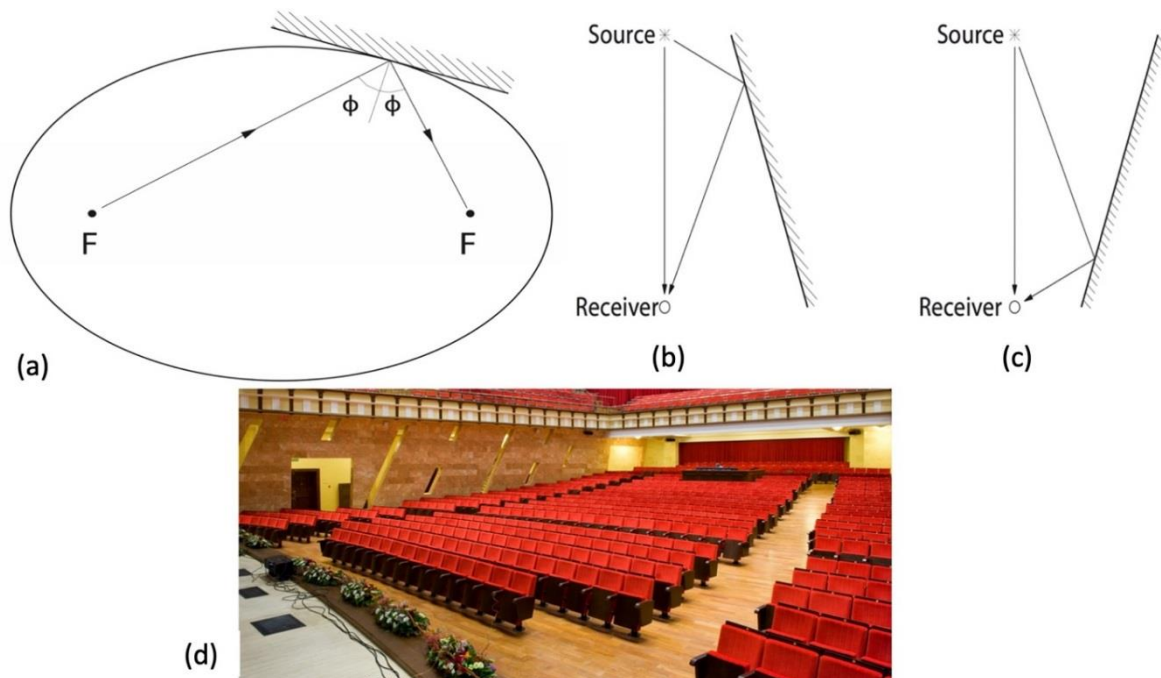


Рис.1.Боковые отражения:

(а) построение отражающей поверхности с помощью эллипса, взято из [3, р. 49] fig.3.12; угол боковых отражений (b) веерный план и (c) обратный веер, взято из [3, р. 50] fig.3.13; обратный веер Большого зала Омской филармонии (d), вид на боковую стену, взято из [6].

При прямых стенах веерная форма зала имеет интенсивные боковые отражения только в той части аудитории, которая ближе к сцене и только около боковых стен, в середине аудитории боковых отражений практически нет, рис.1(b). Для формирования эффективных боковых отражений рационально применить обратный веер, рис.1(c). Обратный веер применил Николас Эдвардс в Большом

зале Омской филармонии [6]. Кроме того, в его проекте боковые стены наклонены в сторону аудитории и выполнены с облицовкой мрамором для максимального эффекта, рис.1(d). Но как сформировать полезные пассивные боковые отражения сохраняя обычную веерную форму? В данном исследовании предлагается два решения.

Первое решение - использовать пилообразную форму боковых стен. Для создания боковых отражений необходимы поверхности с большим удельным весом более 20 кг/м^2 и большой площадью. По стандарту ISO 3382-1 нам необходимо сформировать пассивные отражения, начиная с частоты $f = 125 \text{ Гц}$, тогда длина волны составляет около $2,7 \text{ м}$, следовательно наименьшая грань поверхности должна быть не меньше $5,4 \text{ м}$. По причинам, которые будут рассмотрены далее, принимаем шаг «пилы» боковой стены равным 4 м . Если взять это значение, как длину волны, то получим частоту $f_0 = 86 \text{ Гц}$, при которой эффективность отражений па-

дает - 6 дБ . Однако, полная эффективность отражения (без ослабления, 0 дБ) будет получена только на частоте $2f_0 = 172 \text{ Гц}$ [7].

Второе решение - диффузоры Шредера. Диффузоры Шредера [8] позволяют создать отражения, направление которых практически не зависит от угла падения звуковой волны. Но диффузоры Шредера эффективны лишь в определенном диапазоне частот, на который они рассчитаны. Авторами спроектирован составной диффузор Шредера 11-го порядка, работающий на средних частотах 210 Гц и 350 Гц , при этом теоретически эффективные диапазоны частот от 160 Гц до 770 Гц , и от 260 Гц до 1270 Гц , соответственно, рис.2.

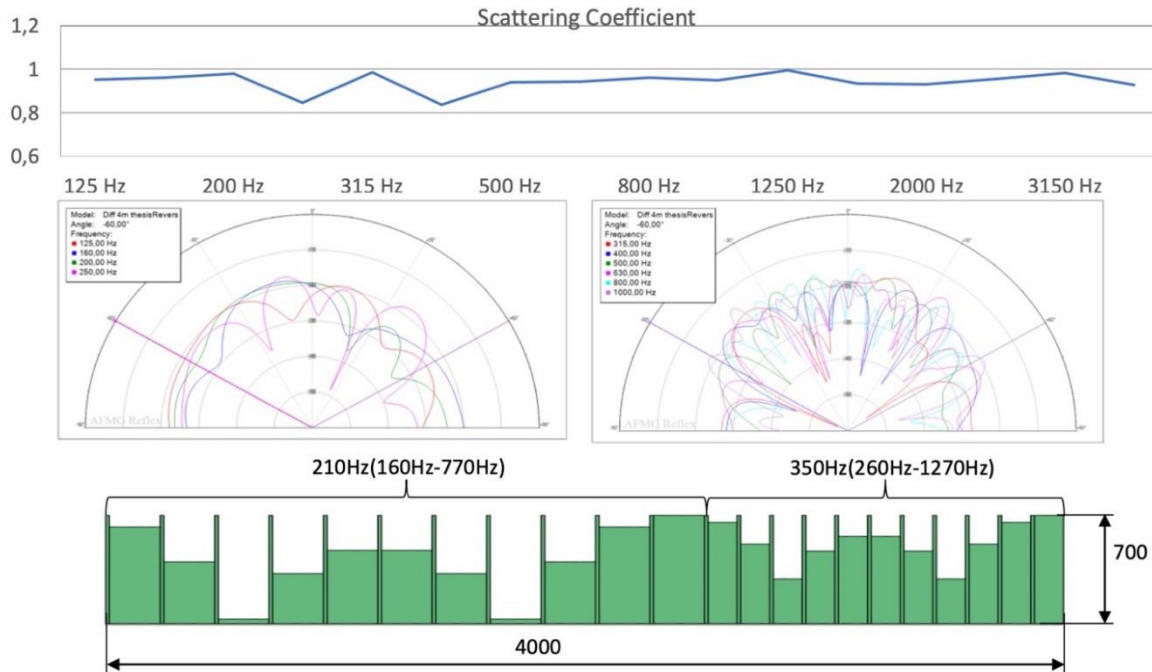


Рис.2. Коэффициент рассеяния, диаграммы направленности отражений при угле падения 60° к нормали и разрез диффузора 11-го порядка.

Спроектированный диффузор имеет теоретическое значение коэффициента рассеяния не менее $0,8$ в диапазоне частот от 125 Гц до 3150 Гц . А угол рассеяния 180° на частотах от 125 Гц до 1 кГц , рис.2. (Расчет выполнен в программе AFMG Reflex). Для улучшения условий формирования отражений на низких частотах около 125 Гц можно объединить

оба решения: выполнить стены пилообразными и применить авторские диффузоры Шредера. В результате необходимо оценить 4 формы боковых стен, рис.3. Дополнительно оценивалось формирование боковых отражений при использовании диффузоров, выпускаемых промышленностью, диффузор RPG-72МН [9].

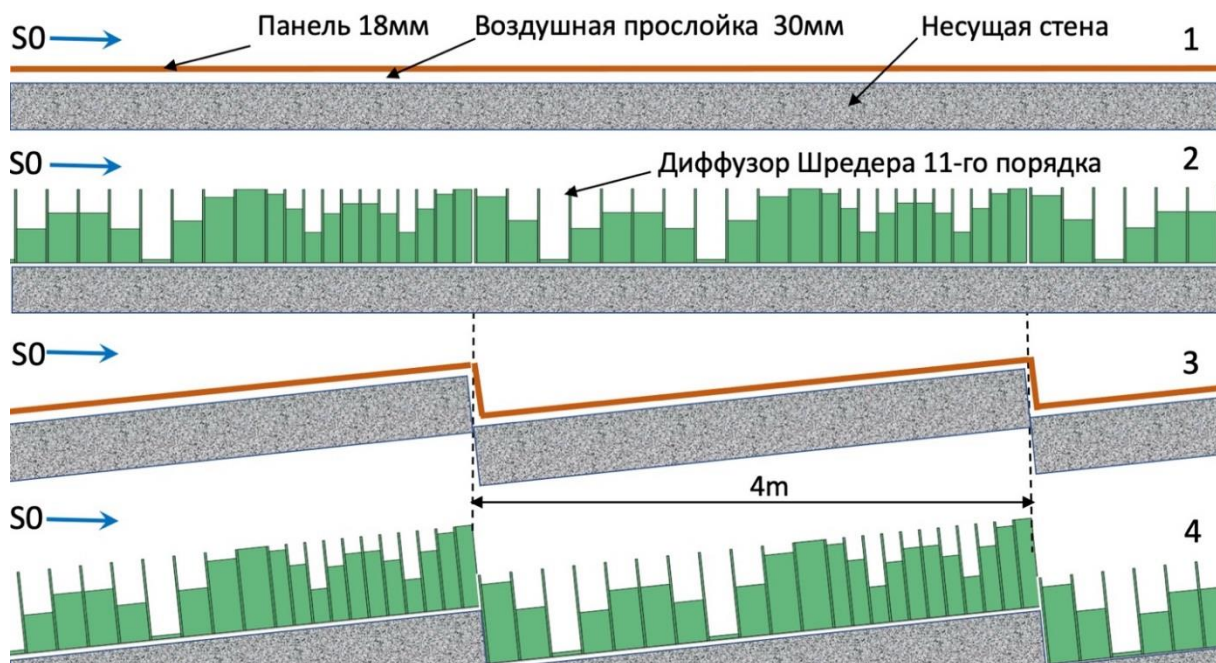


Рис.3. Варианты геометрии боковых стен зрительного зала.

1-стена плоская с облицовкой деревянными панелями толщиной 18мм с воздушным зазором 30мм от несущей стены; 2-стена плоская, облицованная авторскими диффузорами Шредера 11-го порядка; 3-стена пилообразная, шаг пилы 4м, облицована деревянными панелями, толщиной 18мм с зазором 30мм; 4-стена пилообразная, облицованная авторскими диффузорами Шредера 11-го порядка.

2.1. Описание модели.

Для анализа эффективности формирования боковых отражений была создана модель гипотетического веерного зрительного зала, у которого максимальное удаление зрителей от сцены составило

32м. Боковые стены составляют угол 60° . Расположение зрителей для беспрепятственной видимости сцены на исцидомальном наклоне пола, без лож и балконов, рис.4(а).

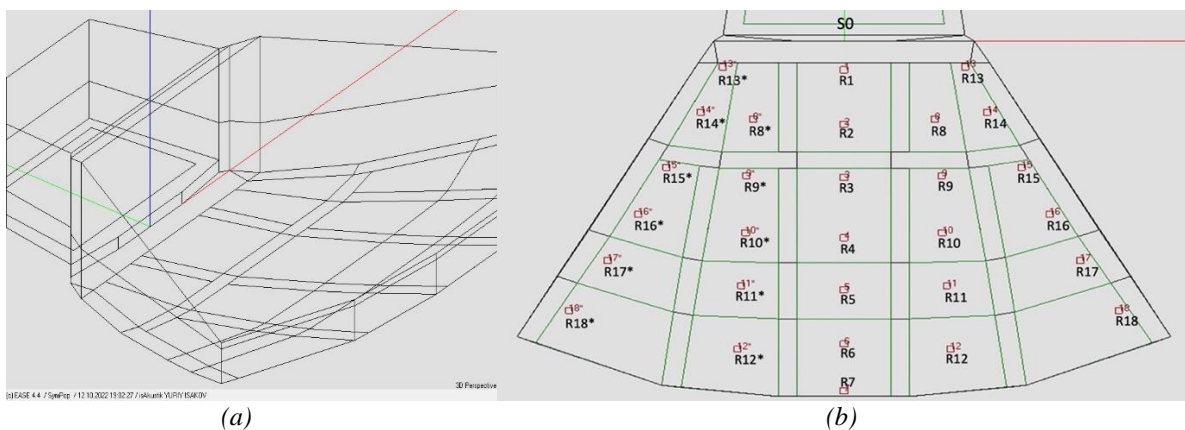


Рис.4. Модель EASE веерного зрительного зала (а).
План контрольных точек R1-R18(R18*) в аудитории зрительного зала и источника S0 на сцене (b).

Для анализа акустических параметров определены контрольные R1-R7, R8(R8*)-R18(R18*) точки звукового поля аудитории, рис.4(б). Как оказалось, в симметричных контрольных точках значения могут отличаться. В модели веерного зрительного зала изменяются акустические свойства боковых стен высотой 4м от пола, остальные ограждающие поверхности имеют следующие акустические свойства: аудитория – полностью заполнена зрителями на мягких креслах; проходы -паркет; все остальные поверхности, звукопоглощение

100%. Источник звука S0 -всенаправленный, расположен на центральной оси сцены, на расстоянии 2,5м от края сцены, на высоте 1,5м от планшета сцены. В результате сильной заглушенности зала, время реверберации RT60, рассчитанное по формуле Эйринга составило от 0,35с до 0,4с для разных форм боковых стен. Расчет выполнялся с помощью модуля AURA 4. Рассчитывались не только усредненные параметры по звуковому полю, но и параметры во всех контрольных точках.

2.2. Результаты расчета параметров звукового поля при пассивных отражениях.

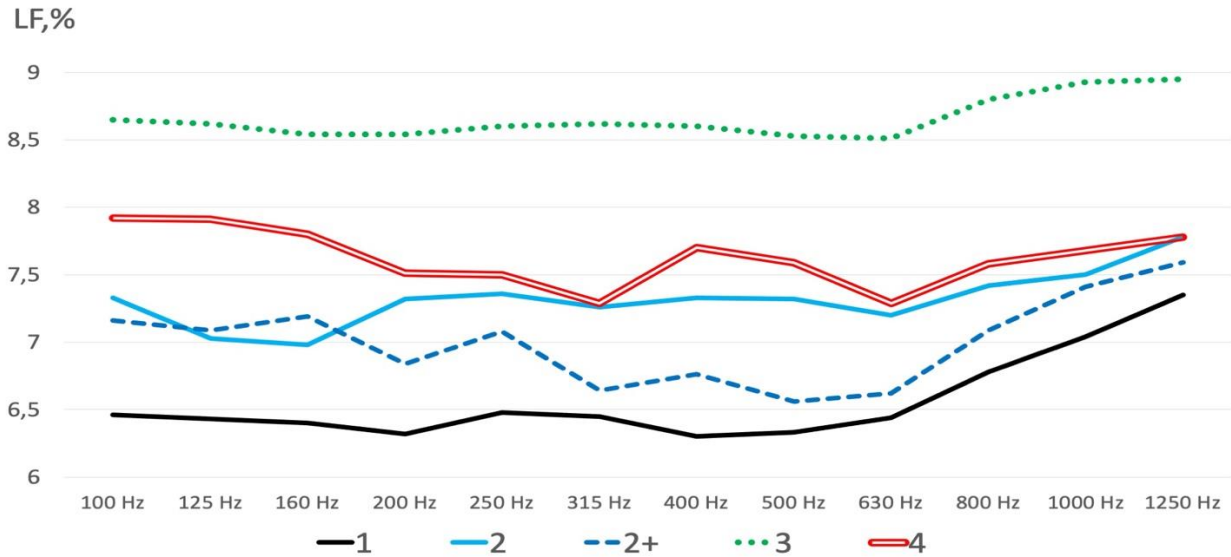


Рис.5. Графики доли боковых отражений LF, усредненной по звуковому полю аудитории при разной геометрии боковых стен.

1-стена плоская с облицовкой деревянными панелями толщиной 18мм с воздушным зазором 30мм от несущей стены; 2 -стена плоская, облицованная авторскими диффузорами Шредера 11-го порядка; 2+ применены диффузоры RPG -72МН [9]; 3-стена пилообразная, шаг пилы 4м, облицована деревянными панелями, толщиной 18мм с зазором 30мм; 4-стена пилообразная, облицованная авторскими диффузорами Шредера 11-го порядка.

Плоская стена имеет наименьшую эффективность, кривая 1, рис.5. Диффузор, специально разработанный 11-го порядка, кривая 2, эффективнее

диффузора RPG в диапазоне частот от 200Гц до 1кГц, кривая 2+. Плоская пилообразная стена показывает самый высокий усредненный по звуковому полю аудитории уровень боковой составляющей LF, кривая 3. Пилообразная стена позволяет эффективнее создавать боковые отражения на частотах ниже 160Гц, особенно это заметно с диффузорами Шредера 11-го порядка, кривая 4. Более детально уровень боковой составляющей LF показан в контрольных точках на рис.6. Значения в каждой точке усреднялись в третьктавных полосах с центральными частотами от 100Гц до 1250Гц.

LF,%

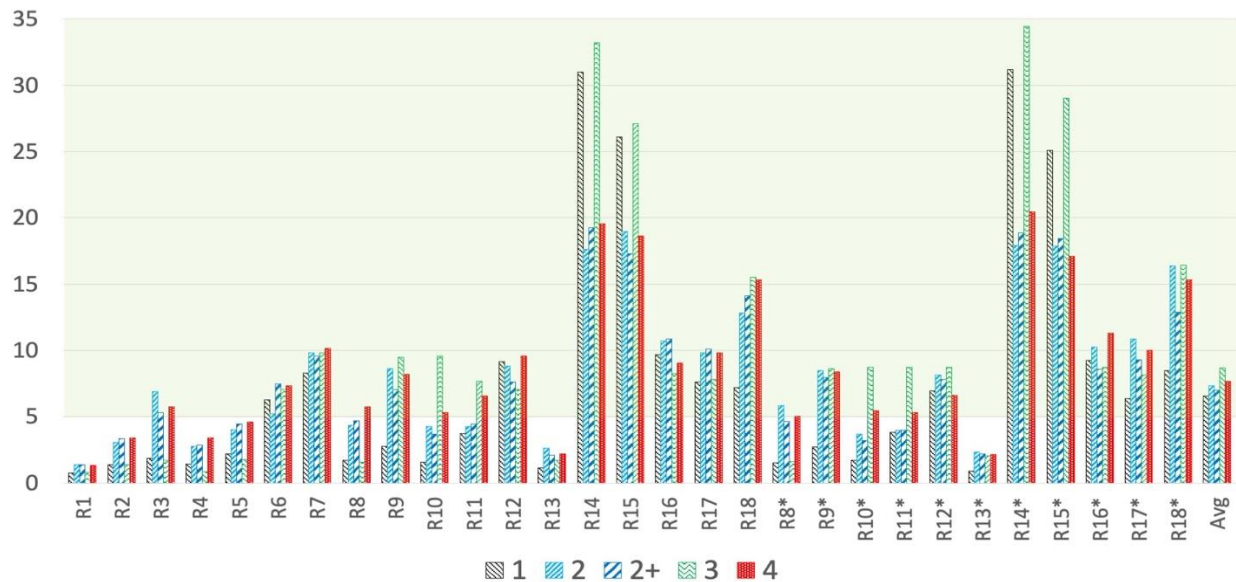


Рис.6. Гистограммы значений доли боковой составляющей LF в контрольных точках при разных формах боковых стен. Подсвечена зона рекомендуемых значений LF для симфонической музыки. Легенда соответствует рис.5.

Несмотря на то, что усредненное значение доли боковой составляющей минимально при плоской стене, рис.6, форма 1, наблюдаются значительные выбросы в контрольных точках R14, R15, R14*, R15*. В этих же контрольных точках выбросы повторяются и при пилообразных боковых стенах, форма 3. Если мы посмотрим на карты LF в октавной полосе с центральной частотой 250Гц, рис.7, слева, то обнаружим повышенную энергию отражений около боковых стен ближе к сцене. Наглядно проявляется эффект выброса значений LF в контрольных точках R14, R15, R14*, R15*, как при плоской боковой стене, так и при пилообразной, рис.6. Кроме этого, пилообразная форма стен увеличивает значения в контрольных точках R10, R11,

R10*, R11* до рекомендованных в ISO 3382-1, рис.6. Применение диффузоров прежде всего смягчает выбросы значений LF в контрольных точках R14, R15, R14*, R15*, рис.6. Кроме того, в контрольных точках R3, R8, R8*, диффузоры позволяют достигнуть рекомендуемого значения >5% доли боковых отражений. В контрольных точках R1, R2, R4, R5, R13, R13* значение LF не поднимается выше 2% и не достигает рекомендуемых значений даже при сочетании пилообразной стены и авторских диффузоров. Однако, в случае с диффузорами Шредера 11-го порядка, энергия боковых отражений распределяется более равномерно на большей площади, рис.7, справа.

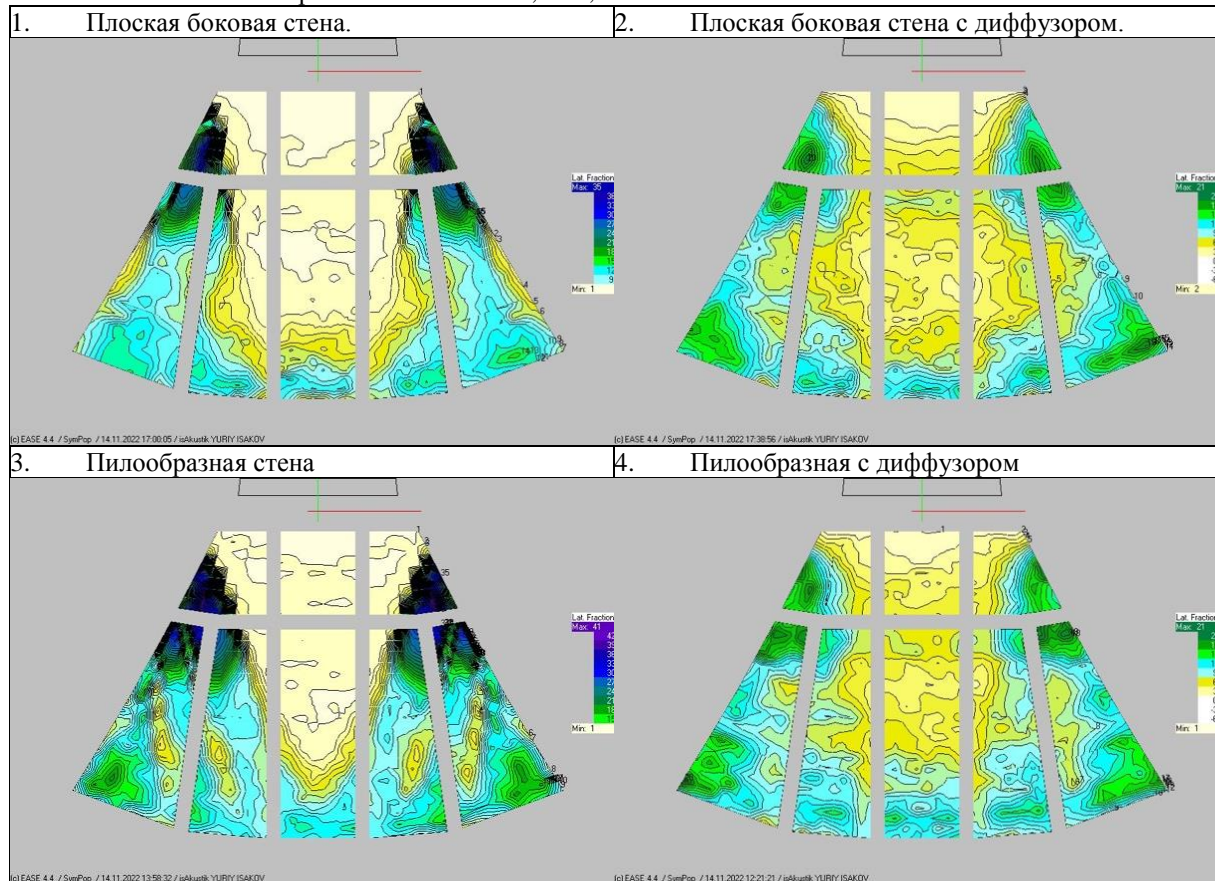


Рис. 7. Карты распределения значений боковой составляющей LF по звуковому полю аудитории.

3. Создание интенсивных боковых отражений с помощью технологий АУЗП.

3.1. Рекомендации по геометрии расположения боковых излучателей.

Линейная технология АУЗП позволяет формировать ранние отражения с нужной интенсивностью, задержкой, а главное, в нужном направлении.

Рекомендации по размещению и выбору параметров излучателей, предлагаемые в данном исследовании, опираются на графический метод Николаса Эдвардса, представленный на рис. 8.

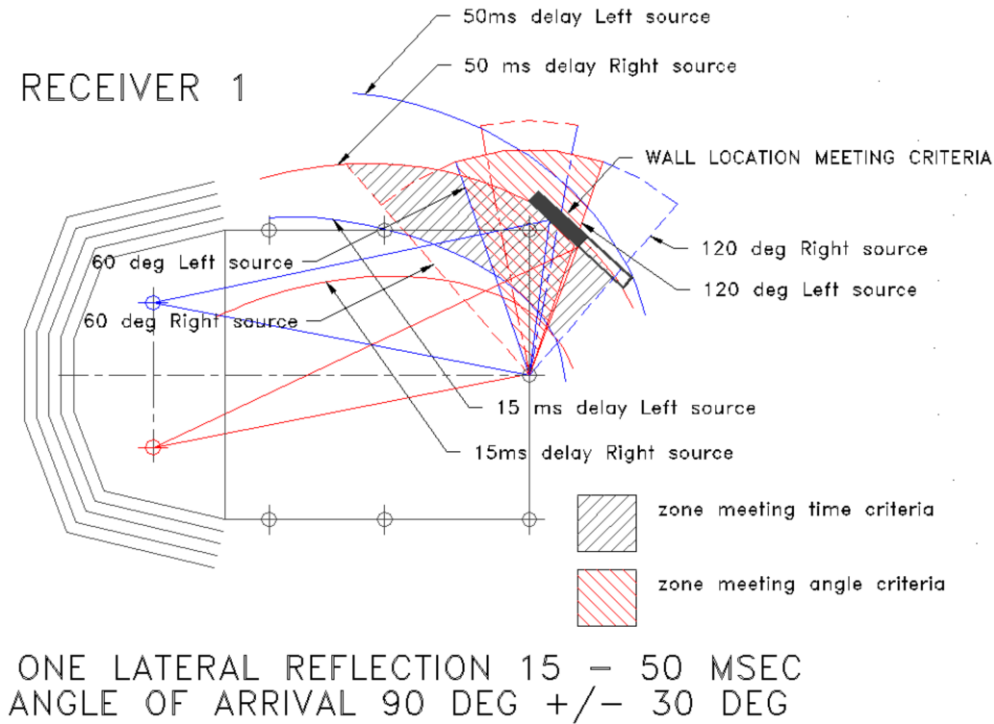


Рис.8. Графическое построение отражающей поверхности, создающей боковые отражения.

Н. Эдвардс предлагает построения эллипсов выполнять для двух значений задержек для 15мс и 50мс. Область между эллипсами дает рабочую зону по временному критерию. Для формирования рабочей зоны по углам прихода отражений Эдвардс принимает угол бокового восприятия $\varphi = \pm 30^\circ$, или от 60° до 120° к лучам от источников SL(SR) к приемнику R1, рис.8. Отличие предлагаемого авторами метода опирается на более детальный анализ критериев стандарта ISO 3382-1. Ширина диаграммы

направленности микрофона «восьмерка» определяется границами снижения нормированной чувствительности до 0,7. Если эту границу нанести на графическое представление диаграммы, то получим углы восприятия $\varphi = \pm 45^\circ$, рис.9(b). Причем, надо понимать, диаграмма направленности микрофона — это фигура вращения, а значит в вертикальной плоскости углы такие же.

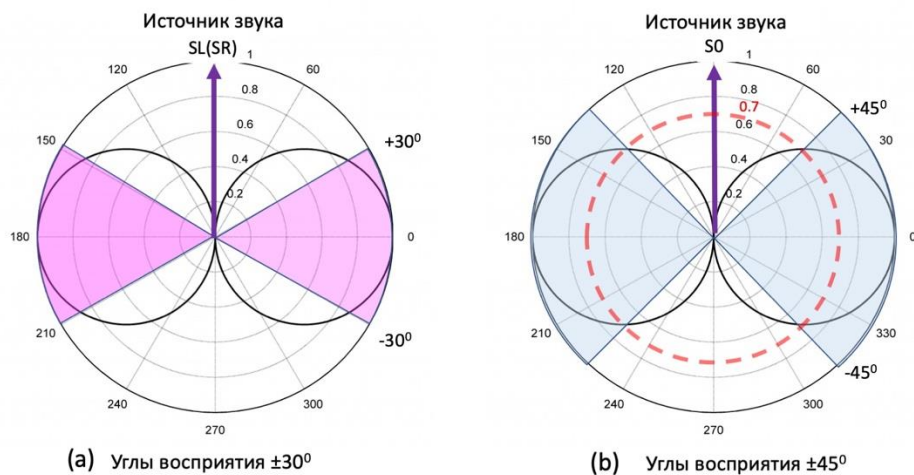


Рис.9. Диаграмма направленности микрофона «восьмерка» и углы восприятия боковых отражений: по Н. Эдвардсу, (b) по данному исследованию.

Значения углов восприятия боковых отражений оказывают влияние на геометрию расположения излучателей, формирующих активные боковые

отражения. Шаг расположения излучателей можно рассчитать по формуле:

$$l_{spkw} = 2(l_{aisle} + 0,5W_{ch}) \tan \varphi, \quad (2)$$

l_{spkw} – шаг настенных излучателей в плане, м;
 l_{aisle} – ширина бокового прохода, м;
 W_{ch} – ширина кресла, м;
 φ – угол бокового восприятия слушателя.

При выполнении требований по ширине бокового прохода, не менее $l_{aisle} = 1,5\text{м}$, центр головы слушателя на крайних местах будет на расстоянии 1,8м от боковой стены, если ширина кресла $W_{ch} = 0,6\text{м}$, рис.10. Максимальное расстояние между

спинками кресел в рядах 1м по стандарту. По Эдвардсу [4] максимальный угол бокового восприятия слушателей следует ограничить в пределах $\varphi = \pm 30^\circ$, тогда мы получаем шаг излучателей $l_{spkw} = 2,08\text{м}$, рис.10 вверху слева. При угле восприятия $\varphi = \pm 45^\circ$, получаем по формуле (2) $l_{spkw} = 3,6\text{м}$. На рис.10, слева внизу показано, что при определенном расположении излучателей шаг можно увеличить до 4м.

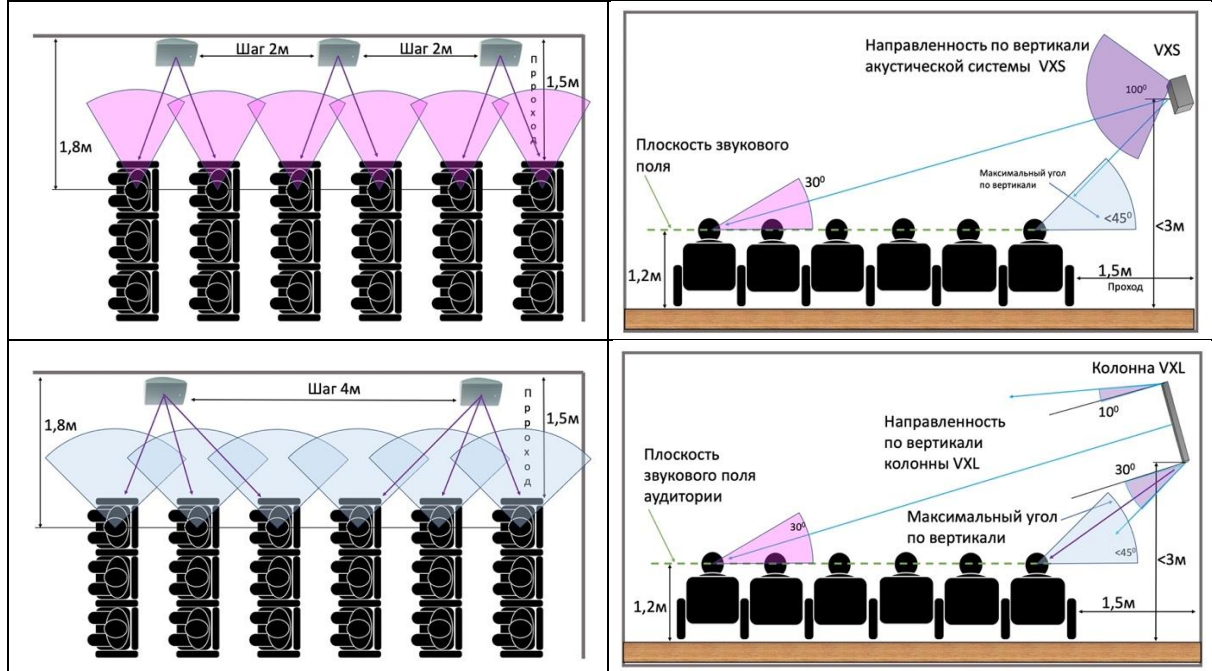


Рис.10. Геометрия расположения излучателей, создающих активные боковые отражения.

Положение настенного излучателя по высоте h_{spkw} можно рассчитать по формуле:

$$h_{spkw} = h_{lstn} + (l_{aisle} + 0,5W_{ch}) \tan \varphi, \quad (3)$$

h_{spkw} – высота центра настенного точечного излучателя от пола, м;

h_{lstn} – высота расположения органов восприятия звука слушателей, 1,2м.

На рис.10, справа вверху показано, что для точечного излучателя, например VXС (Yamaha), максимальная высота от центра до пола $h_{spkw} < 3\text{м}$. Боковые излучатели должны обеспечивать достаточный уровень звукового давления в средней зрительной зоне, но на ближних местах уровень не должен быть слишком высоким. Поскольку, ширина исследуемого зрительного зала значительна, расстояние между крайними точками около 50м, применение

точечных излучателей не эффективно. Для этой цели оптимально использовать колонны VXL (Yamaha) в режиме Wide. В этом случае диаграмма направленности колонны по вертикали будет $+10^\circ - 30^\circ$, рис.10 справа внизу. Для такого линейного излучателя как колонны VXL максимальная высота может рассчитываться по формуле (3) до низа колонны, рис.10.

3.2. Проверка позиций излучателей и времени задержки методом трассировки.

Излучатели, формирующие боковые активные отражения размещаются в модели в позициях, сформированных в соответствии с указанными выше рекомендациями. План расположения всех излучателей ER, FF и источника S0 показан на рис.11а.

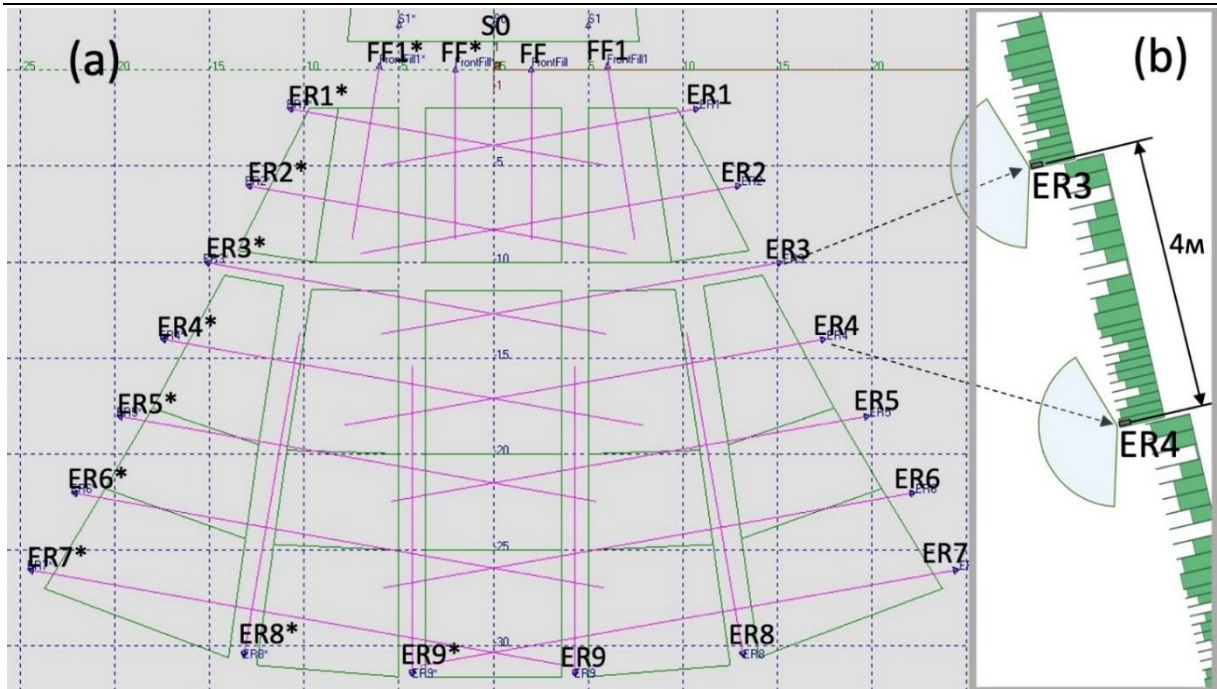


Рис.11. План расположения излучателей, формирующих активные отражения:

(a) излучатели ER, ER*, FF, FF* и источник звука S0;

(b) фрагмент пилообразной боковой стены с авторскими диффузорами Шредера 11-го порядка со встроенными излучателями ER3, ER4.

Учитывая вышеизложенное, излучатели ER позиционируются с шагом 4м, что совпадает с шагом «пилы» боковой стены. Колонны VXL (Yamaha) очень узкие, около 50мм, глубиной около 100мм, поэтому могут крепиться на стену открыто, но для лучшего дизайна можно их встроить в диффузоры, как это показано на фрагменте пилообразной стены с диффузорами, рис.11b. Для контроля геометрии расположения излучателей выполняется

трассировка лучей излучения к контрольным точкам, рис.12. Используется модуль трассировки программы EASE. Для контроля направления прихода полезных боковых отражений, в контрольную точку помещается диаграмма направленности восприятия боковых отражений по рис.9(b). Нормаль диаграммы смотрит на источник звука S0. Углы диаграммы $\pm 45^\circ$. Для примера приведена трассировка в контрольной точке R1, рис.12.

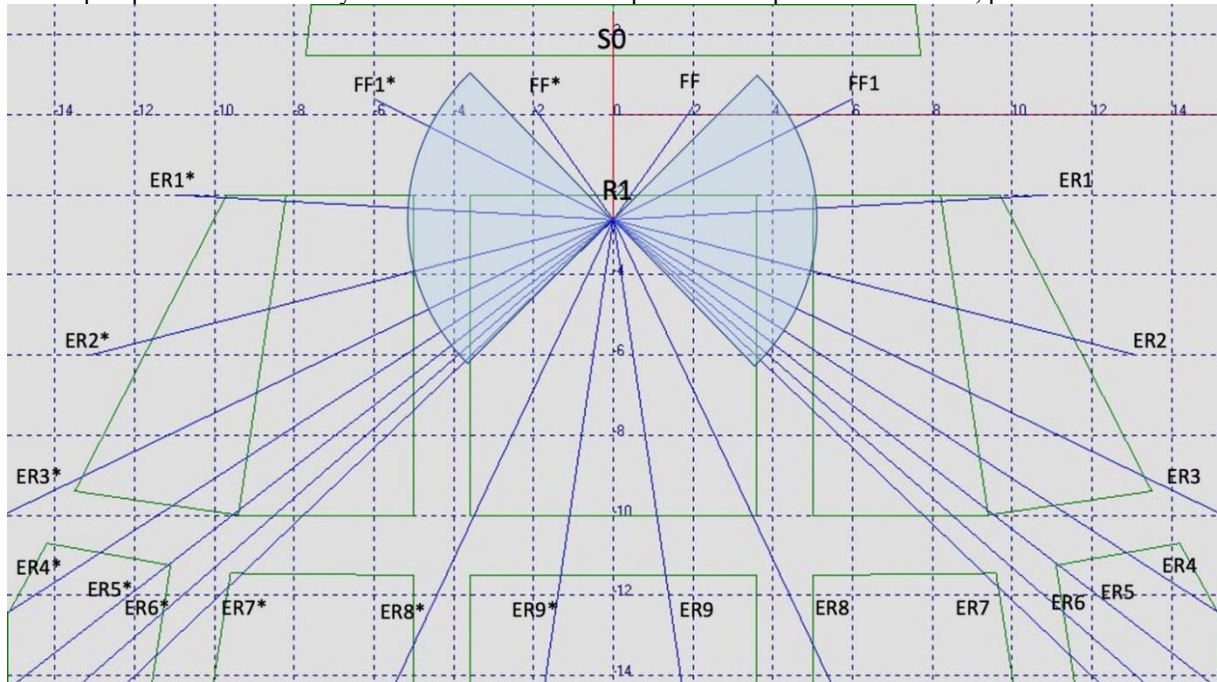


Рис.12. Карта трассировки активных боковых отражений в контрольной точке R1.

По первому критерию - направлению прихода отражений, рабочими можно считать активные боковые отражения, сформированные излучателями ER1, ER7, ER1*, ER7*. А также отражения, сформированные фронтальными излучателями FF1, FF1* тоже можно считать рабочими в точке R1, рис.12. Вторым критерий – время запаздывания отражений, которое также контролируется в модуле трассировки EASE. По рефлектограмме в контрольной точке, в которой сигналы отражений представлены в виде импульсов с соответствующей амплитудой, можно определить какие отражения входят

в интервал времени вычисления параметра J_{LF} по формуле (1) от 5мс до 80мс, рис.13. Рабочими отражениями в контрольной точке могут считаться только те, которые соответствуют двум критериям, а именно, в контрольной точке R1 это отражения, сформированные излучателями ER1, ER1*, ER2, ER2* и FF1, FF1*. Отражения, сформированные излучателями ER3-ER7, ER3*-ER7* не могут считаться рабочими в контрольной точке R1. Но эти отражения могут быть рабочими в других контрольных точках.

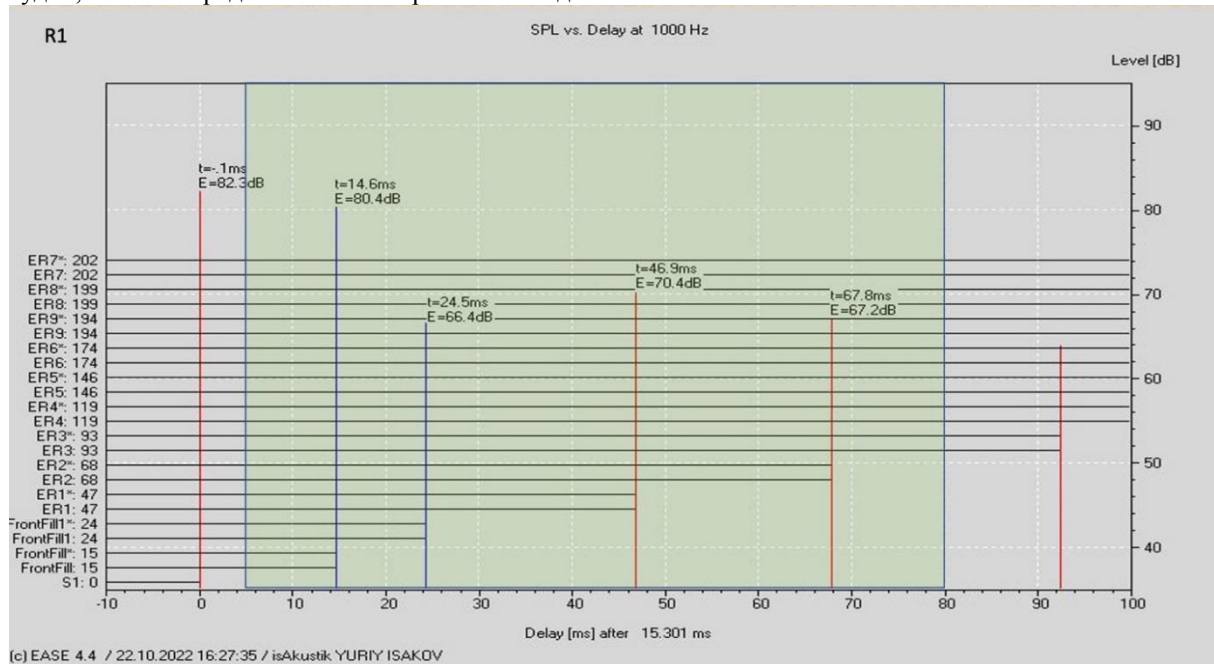


Рис.13. Рефлектограмма в контрольной точке R1.
Выделена область рабочих отражений по времени запаздывания.

Расчеты параметров звукового поля с активными отражениями.

Для расчетов применяется модель с пилообразными боковыми стенами и с потолочными панелями, закрывающими технологические мостики, рис.14.

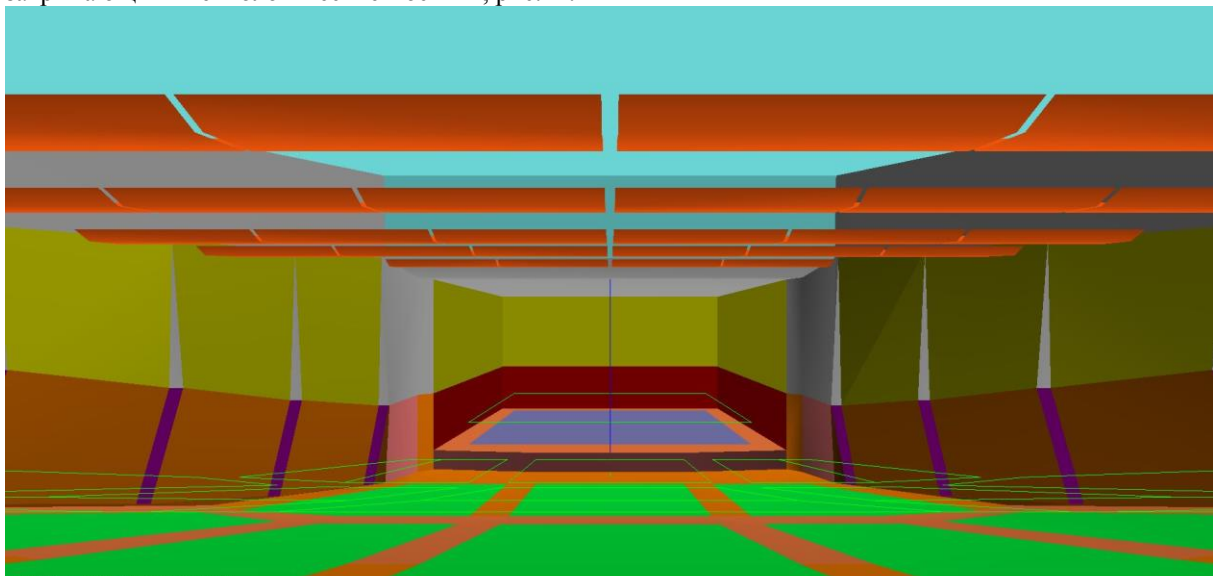


Рис.14. Модель зрительного зала веерной формы с потолочными панелями.
Вид с контрольной точки R7.

Доля боковой составляющей оценивалась при пассивных отражениях LF_p и при комбинации пассивных и активных отражений LF_A , рис.15. Расчет выполнен в модуле AURA 4 для двух вариантов облицовки боковых пилообразных стен, форма 3-

плоские деревянные панели 18мм с воздушным зазором 30мм, форма 4 -авторские диффузоры Шредера 11-го порядка.

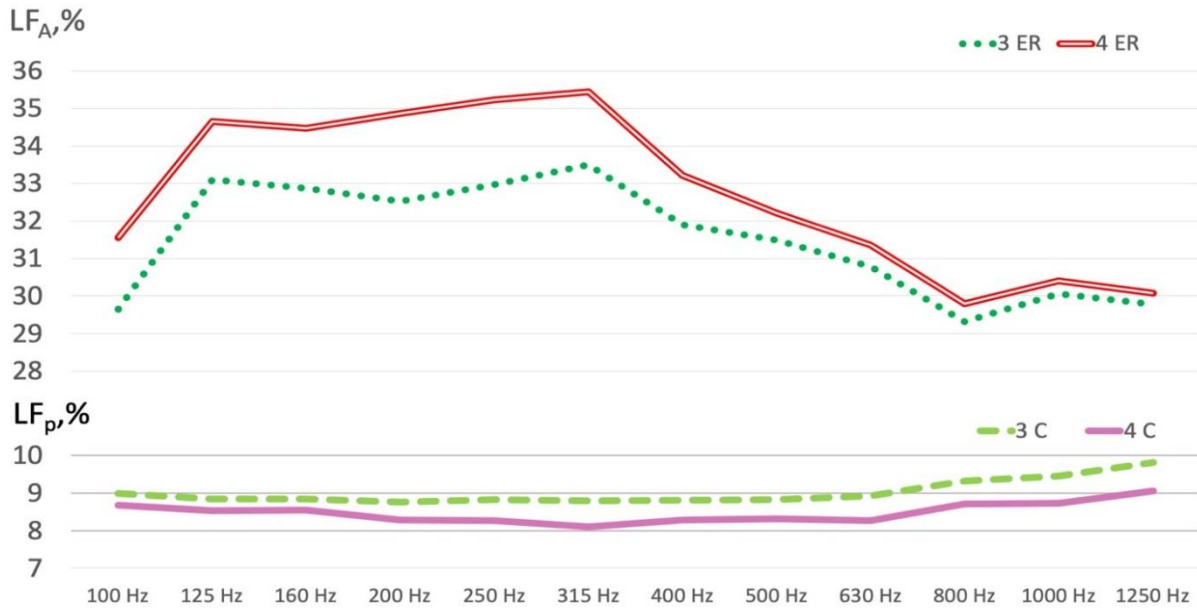


Рис.15. Доля боковой составляющей LF в диапазоне частот от 100Гц до 1250Гц.
3С- боковые стены пилообразные, облицованы панелями 18мм, есть потолочные панели; 4С- боковые стены пилообразные, диффузоры Шредера, есть потолочные панели; 3ER – работают излучатели ER, FF, форма как 3С; 4ER – работают излучатели ER, FF, форма как 4С.

Усредненное по звуковому полю аудитории в 4-х октавах с центральными частотами 125Гц, 250Гц, 500Гц, 1кГц (или в диапазоне от 100Гц до 1250Гц) значение доли боковой составляющей LF_p при пилообразных боковых стенах с облицовкой панелями, форма 3С, составляет 9%, а с диффузорами, форма 4С, составляет 8,48%, рис.19. На рис.16 эти значения отмечены, как Avg. Отличие составляет всего 0,5%. Порог восприятия измене-

ний по стандарту равен 5%. При формировании активных отражений, усредненное по звуковому полю в 4-х октавах значение доли боковой составляющей LF_A для формы 3ER составляет 31,49%, а для формы 4ER – 32,77%, что значительно отличается от LF_p . Но между 3ER и 4ER отличие всего 1,3%, что ниже порога восприятия отличия. Поэтому наибольший интерес имеет поведение значений доли боковой составляющей LF в контрольных точках, рис.16.

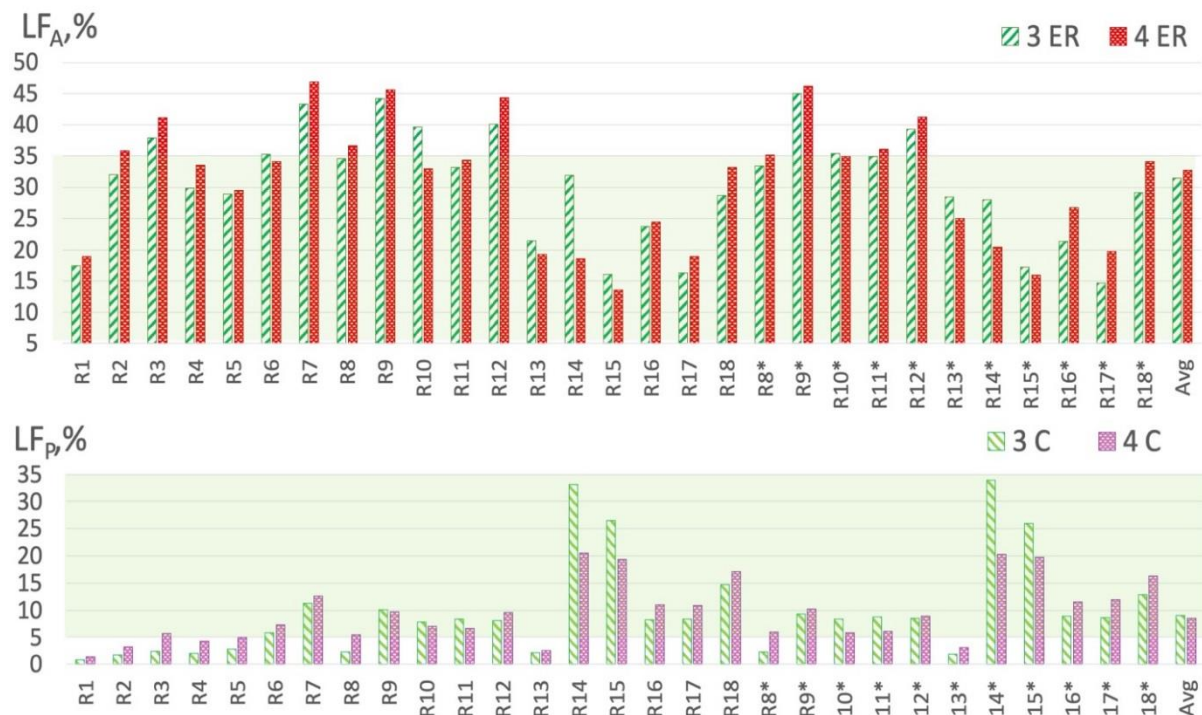


Рис.16. Доля боковой составляющей LF в контрольных точках. Подсвечена зона рекомендуемых значений LF для симфонической музыки. Легенда аналогична на рис.15.

В контрольных точках R14(R14*), R15 (R15*) пассивные отражения от гладких пилообразных стен образуют выбросы значений $LFP(3C) = 33(34)\% \dots 26(26)\%$, которые сглаживаются при применении диффузоров Шредера, до значений $LFP(4C) = 20(20)\% \dots 19(20)\%$, в этих же точках, рис.16. Активные боковые отражения в сочетании с пассивными значительно увеличивают долю боковой составляющей на всех зрительных местах. Но в контрольных точках R14(R14*) значения $LFA(3ER)=32(28)\%$, что значительно превышает

значения $LFA(4ER)=19(20)\%$. В остальных контрольных точках значения LFA при активных боковых отражениях различаются на величину меньше, чем порог восприятия изменений. Минимальное значение $LFA(4ER) = 13,5(16)\%$ обнаруживается в контрольных точках R15(R15*), рис.16. Карты распределения интенсивностей боковых отражений по звуковому полю в октавных полосах с центральными частотами от 125Гц до 1кГц наглядно демонстрируют преимущество комбинации пассивных и активных боковых отражений, по сравнению с пассивными, рис.21.

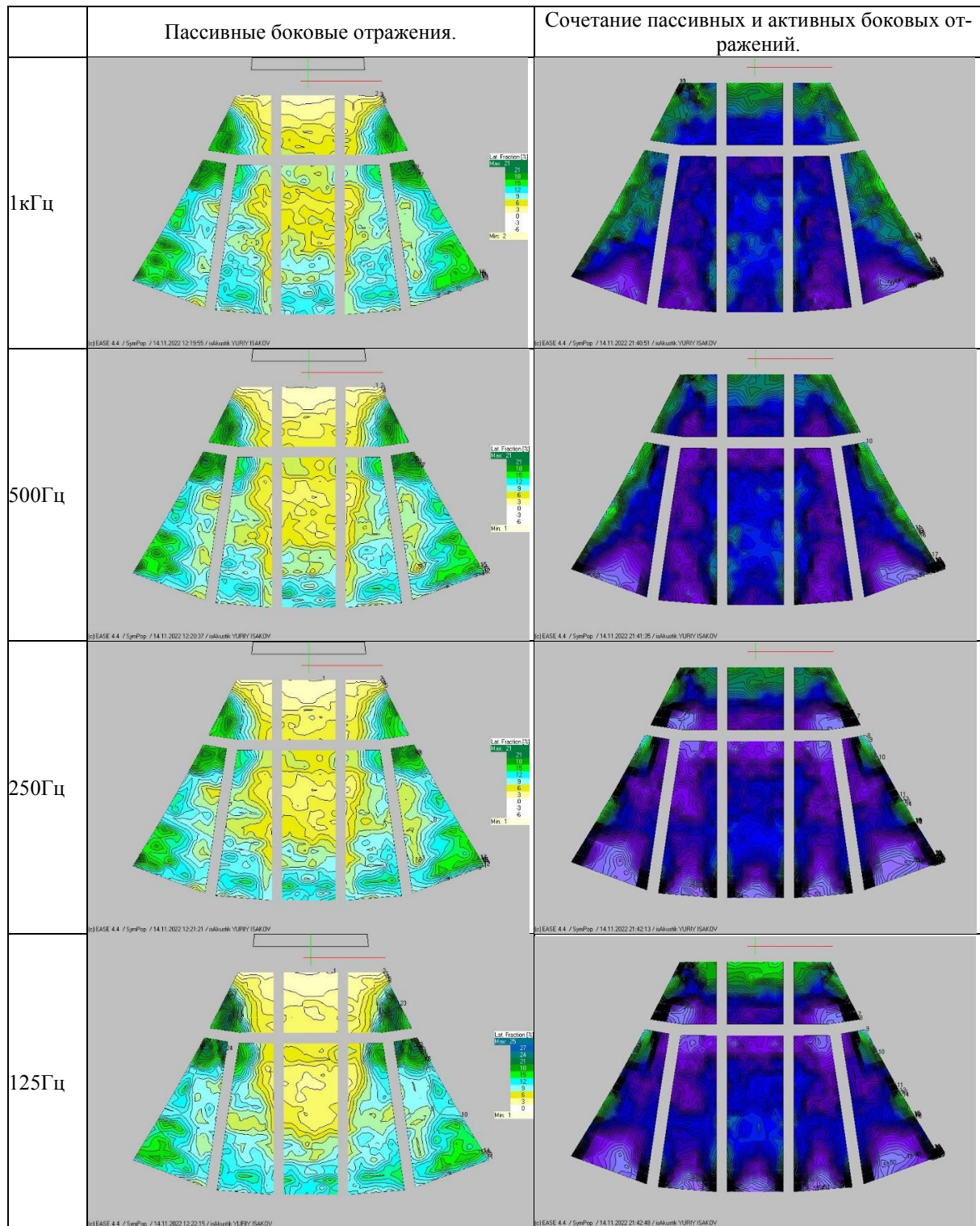


Рис.17. Карты распределения интенсивности боковых отражений по звуковому полю аудитории с пассивными и активными боковыми отражениями при пилообразной стене с диффузорами Шредера 11-го порядка.

В таблице 1 приведены значения доли боковой составляющей LF_{Avg} усредненной по звуковому полю аудитории в диапазоне от 100 до 1250Гц (4

октавы) для различных форм стен при пассивных и комбинации пассивных и активных отражений.

Таблица 1.

Результаты расчета доли боковой составляющей LF.

Вид отражений	Пассивные отражения							Комбинация пассивных и активных отражений.	
	1	2	2+	3	4	3C	4C	3ER	4ER
LF _{Avg} , %	6,57	7,32	7,0	8,66	7,63	9,0	8,48	31,49	32,77

4. Выводы.

Архитектура зрительного зала с веерной формой может быть улучшена применением пилообразной формы боковых стен и диффузоров Шредера, работающих в диапазоне от 160 Гц до 1250 Гц. Значение доли боковой составляющей LF, усредненной по звуковому полю, увеличивается от 6,6% до 9%. Улучшается также равномерность значений по звуковому полю аудитории. Но при этом значение LF на части зрительских мест в центре аудитории не поднимается выше 2%.

В процессе исследований разработаны рекомендации по геометрическому расположению излучателей, формирующих активные боковые отражения. В качестве излучателей в данной работе использовались колонны VXL (Yamaha), что оправданно при веерной форме зала. В результате, при суммировании пассивных и активных боковых отражений увеличивается значение доли боковой составляющей LF_{Avg} с 9% до 30% и более. Следовательно, комбинация методов архитектуры и технологий активного управления звуковым полем (АУЗП) может значительно улучшить звучание симфонической музыки в зрительном зале веерной формы.

References

1. N. Edwards, «THE ACOUSTIC SCIENCE OF BOSTON'S SYMPHONY HALLS» 05 12 2017. [Online]. URL: [https://www.idibri.com/content/articles/acoustics-](https://www.idibri.com/content/articles/acoustics-boston-symphony-hall-nicholas-edwards.pdf)

[boston-symphony-hall-nicholas-edwards.pdf](https://www.idibri.com/content/articles/acoustics-boston-symphony-hall-nicholas-edwards.pdf). [Data available: 20 11 2022]

2. H. Marshall, «The acoustical design of the Christchurch town hall,» *Journal of Building Acoustics*, т. Volume 21 Number 1, 2014

3. B. Michael, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*; second edition, London and New York: Spon Press, 2010.

4. N. Edwards, «Acoustical Design Methods for Concert Halls in Dallas, Texas (USA) and Birmingham, England.» *Fachkolloquium Infomationstechnik 1991 Akustik und Messtechnik*, Technische Universität Dresden Institut für Technische Akustik. 21 Februar 1991

5. International Standard ISO 3382-1, *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters-Part1: Performance spaces*, First edition 2009-06-15.

6. «Omsk Philharmony. Concert hall,» 2019. [Online]. URL: <https://omfil.ru/filarmoniya/zaly/kontsertnyy-zal>. [Data available: 19 11 2022].

7. J. H. Rindel, «150th Meeting of the Acoustical Society of America,» в *Reflection of sound from finite-size plane and curved surfaces*, Minneapolis, 2005.

8. P. D'Antonio, «Acoustical Design of Worship Spaces,» *Journal AES*, т. Vol 38 N10, № RPG Diffusor Systems, 1990.

9. RPG Acoustical Systems, «RPG,» 2022. [Online]. URL: <https://www.rpgacoustic.com/product/diffractal/>. [Data available: 19 11 2022].