

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно – строительный институт  
институт  
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости  
кафедра

Утверждаю

Заведующий кафедрой

 Р.А.Назиров  
подпись                      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Реконструкция музыкальных залов целевого назначения.

тема

Строительство

08.04.01

Код наименование направления

08.04.01.04 Проектирование зданий. Энерго-и ресурсосбережение

Код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

  
подпись, дата                      должность, ученая степень

Е.М.Сергуничева  
инициалы, фамилия

Выпускник

  
подпись, дата

В.И.Моисеева  
инициалы, фамилия

Рецензент

  
подпись, дата                      должность, ученая степень

Е.Г.Плясунов  
инициалы, фамилия

Красноярск 2021

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Состояние вопроса в современное время.....	6
1.1. Термины и определения. Нормативная база.....	8
1.2. История возникновения залов различного назначения.....	12
1.3. Предпосылки повышения энергоэффективности и ресурсосбережения.....	18
1.4. Шум, звук.....	19
1.5. Классификация акустических материалов.....	22
1.5.1. Классификация по функциональному назначению.....	22
1.5.2. Классификация акустических материалов по свойствам.....	26
1.6. Отечественный и зарубежный опыт в акустическом проектировании. Анализ проблем.....	27
1.6.1. Лекционные залы и аудитории.....	27
1.6.2. Залы драматических театров.....	28
1.6.3. Залы Театров оперы и балета.....	30
1.6.4. Концертные залы.....	33
Вывод.....	38
ГЛАВА 2. Методы решения проблем звукоизоляции и проектирование акустической среды.....	39
2.1. Характеристики исследуемого объекта Дома Культуры.....	39
2.2. Способы проектирования эффективной звукоизоляции.....	40
2.2.1. Механизм прохождения звука через однослойную панель.....	40
2.2.2. Методы по улучшению звукоизоляции ограждающих конструкции.....	44
2.2.3. Оценка звукоизоляции ограждающих конструкций.....	46
2.3. Акустика. Основные принципы проектирования.....	47
2.4. Физико-математическая модель процесса распространения звука.....	49

2.5. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics .....	51
Выводы.....	55
ГЛАВА 3. Исследования и расчеты, направленные на выбор оптимального проектного решения.....	56
3.1. Расчеты звукоизоляции перегородок.....	56
3.1.1. Вариант А. ....	56
3.1.2. Вариант Б. ....	61
3.2. Анализ геометрической акустики зала.....	64
3.2.1. Реализованный вариант.....	65
3.2.2. Предложенный альтернативный вариант.....	67
3.3. Построение геометрической модели вариантов зала в программном комплексе COMSOL Multiphysics и расчет времени реверберации.....	68
3.4. Подбор экономически оптимального варианта.....	71
3.4.1. Экономический расчет.....	72
3.4.2. Выбор оптимального варианта.....	74
3.5. Комплексное рациональное решение вопросов звукоизоляции и акустического комфорта залов многоцелевого назначения при капитальном ремонте и реконструкции.....	75
Вывод.....	77
Заключение.....	78
Список источников.....	79
Приложение А.....	83
Приложение Б.....	84

## Введение

В общей массовой, рутинной практике строительства и реконструкции есть немало помещений с дискомфортными, акустическими условиями - достаточно вспомнить залы ожидания в вокзалах, перронные залы метро, гулкие учебные аудитории большого объема, музыкальные залы с низкой слышимостью и т.п., где сложно понять транслируемые объявления или целиком различить произносимые фразы и нюансы музыки.

Основными факторами, влияющими на акустический комфорт помещения являются: архитектурная геометрическая акустика и звукоизоляционные материалы, конструкции. В связи с этим необходимо знать и понимать основные положения акустики помещений, и применять эти положения при решении возникающих задач.

Архитектурная акустика - одна из основных научных дисциплин, данные которой напрямую воздействовали и воздействуют на формирование архитектурной формы помещений. Законы распространения прямых и отраженных звуковых волн в пространстве, экстерьерном и интерьерном, сегодня достаточно хорошо известны, однако при этом, в мире не так много построенных залов с хорошей акустикой для разных жанров звуковых представлений и речевых выступлений.

Так же не стоит забывать о звукоизоляции помещений, требованиям к шуму и вибрациям, вызванным различными технологическими процессам и функциональными назначениями помещений.

Одним из наиболее рациональных подходов к созданию таких специальных помещений, требующих особые условия звуковой и акустической среды, является не новое строительство, а капитальный ремонт и реконструкция существующих зданий и сооружений.

Капитальный ремонт включает в себя ликвидацию неисправностей всех изношенных, поврежденных элементов конструкций, восстановление или замену их на более долговечные либо экономичные, улучшающие эксплуатационные характеристики ремонтируемых зданий. При этом может осуществляться рациональная модернизация здания или объекта: изменение функциональной схемы, влияющей на логистический процесс и основные планировочные решения, увеличение количества и качества услуг, оказываемых в данном строении, оснащение недостающими видами инженерного оборудования, благоустройство окружающей территории, прилегающей к зданию или сооружению.

**Актуальность темы** заключается в необходимости рационального подхода к объемно-планировочным решениям зданий и использованию акустических материалов с целью получения энергоэффективного, экономически выгодного и комфортного проекта с точки зрения акустики.

**Целью:** Разработка метода, позволяющего комплексно и рационально подойти к решению звукоизоляции и созданию акустического комфорта в зданиях с музыкальными залами при капитальном ремонте и реконструкции.

**Задачи:**

- Провести анализ планировочных решений, форм и объемов помещений, влияющих на акустическую среду.
- Выявить последовательность принципиальных решений при выборе материалов и оценить эффективность решений однослойных и многослойных конструкций перегородок.
- Оценить технико-экономическую эффективность предложенных проектных решений.
- Определить методы улучшения звукоизоляции и акустических характеристик помещений.

## ГЛАВА 1. Состояние вопроса в современное время

Одним из наиболее рациональных подходов к созданию помещений, требующих особые условия звуковой и акустической среды, является не новое строительство, а капитальный ремонт и реконструкция существующих зданий и сооружений. В данной ситуации целесообразно обратить внимание на сельские дома культуры.

Проект «МЕСТНЫЙ ДОМ КУЛЬТУРЫ» направлен на ремонт и обновление оборудования сельских клубов и домов культуры населенных пунктов до 50 тысяч человек, согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 30 января 2017г. №100.



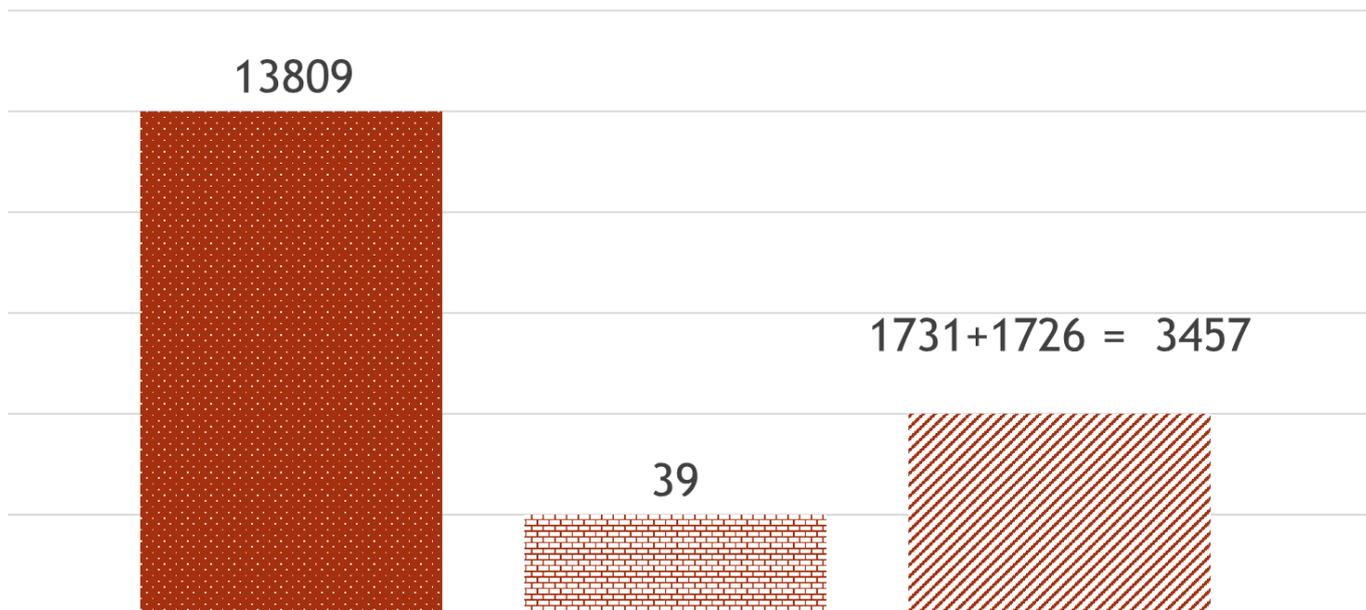
Рисунок.1.1. Данные о состоянии Домов Культуры на старте проекта и окончании.

Из данных диаграмм видно, что по окончании работы действия проекта 90 % от всех объектов остаться нуждающимися в ремонте и реконструкции.

Далее Правительством РФ был запущен Нацпроект «КУЛЬТУРА», разработанный в рамках реализации президентского Указа «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», реализация которого началась 1 января 2019 года. Согласно данным Министерства культуры РФ. Указ президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204.

В рамках национального проекта «Культура» к 2024 году планируется:

- построить 39 центров культурного развития в городах с числом жителей до 300 тысяч человек;
- реконструировать/капитально отремонтировать 526 сельских культурно-досуговых объектов;
- модернизировать 1200 залов по всей РФ, треть из них находится в сельской



- требующие ремонта или реконструкции
- ▤ введенные в эксплуатацию в периоде с 2017 до 2020 г.
- ▨ участники проектов "Местный дом культуры" и "Культура" местности

## Рисунок 2.1. Графики прогнозируемого состояния Домов Культуры на 2024 г.

Прогнозируемое состояние Домов культуры, находящихся в сельской местности, на 2024 год (рис 1.2.). Данные представленной статистики получены на основе анализа сведений проектов «Местный дом культуры» и «культура».

Согласно прогнозируемой статистике, к 2024 году нуждаться в ремонте, реконструкции, реставрации и модернизации будут около 14 тысяч зданий Культуры по РФ.

### **1.1. Термины и определения. Нормативная база.**

*Общий шум:* Шум в определенной ситуации в определенное время и в определенном месте, обычно состоящий из шума различных источников как подвижных (средства дорожного, рельсового, водного и воздушного транспорта), так и расположенных стационарно (промышленные предприятия, энергетические и прочие установки, а также инженерно-техническое и прочее оборудование в жилых и общественных зданиях).

*Фоновый (остаточный) шум:* Часть общего шума при отключении одного или нескольких известных источников.

*Постоянный шум:* Шум, для которого разность между наибольшим и наименьшим значениями уровня звука за временной интервал измерения не превышает 5 дБА при измерении на временной характеристике "медленно" шумомера по ГОСТ 17187

*Непостоянный шум:* Шум, не удовлетворяющий условиям 3.6. Непостоянный шум подразделяют на колеблющийся, прерывистый и импульсный.

*Время реверберации  $T$ , с:* Время, за которое уровень звукового давления в помещении после выключения источника звука снижается на 60 дБ.

*Допустимый уровень шума:* Уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов его организма, чувствительных к шуму.

*Звуковая мощность, Вт:* Количество энергии, излучаемой источником шума в единицу времени.

*Изоляция воздушного шума (звукоизоляция)  $R$ , дБ:* Способность ограждающей конструкции уменьшать проходящий через нее звук.

*Коэффициент звукопоглощения  $\alpha$ :* Отношение величины неотраженной поверхностью звуковой энергии к величине падающей энергии.

*Реверберация:* Явление постепенного спада звуковой энергии в помещении после прекращения работы источника звука.

*Средний коэффициент звукопоглощения:* Отношение суммарной эквивалентной площади звукопоглощения в помещении  $A_{\text{сум}}$  (включая поглощение всех поверхностей, оборудования и людей) к суммарной площади всех поверхностей помещения.

*Уровень звука, дБА:* Энергетическая сумма октавных уровней звукового давления в нормируемом диапазоне частот, откорректированных по частотной характеристике  $A$  шумомера по ГОСТ 17187.

*Уровень звуковой мощности, дБ:* Десятикратный десятичный логарифм отношения звуковой мощности к опорной звуковой мощности ( $W_0 = 10^{-12}$  Вт).

*Шумозащитные экраны:* Сооружения в виде вертикальных или наклонных стенок различной конструкции, земляных насыпей, выемок,

галерей и т.п., установленные вдоль автомобильных и железных дорог в целях снижения шума.

Шум и акустика, как влияющий на человека фактор, подлежит жесткому нормированию. основополагающие документы:

- Свод правил СП 51.13330.2011 «Защита от шума», устанавливает обязательные требования при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий.
- ГОСТ 27296-2012 Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций
- ГОСТ Р ИСО 3744-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью.
- ГОСТ 23337-2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий
- ГОСТ Р 56769-2015 (ИСО 717-1:2013) Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума
- ГОСТ Р 56770-2015 (ИСО 717-2:2013) Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции ударного шума
- ГОСТ Р ИСО 10140-4-2012 Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 4. Методы и условия измерений
- ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума
- Федеральный закон РФ №52 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», предписывающий необходимость создания в среде обитания постоянного акустического комфорта.

- Федеральный закон РФ №384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», определяющий защиту от шума как часть комплекса мероприятий, направленных на обеспечение безопасности зданий и сооружений:

*Статья 24. Требования к обеспечению защиты от шума*

1. Размещение здания или сооружения на местности, проектные значения характеристик строительных конструкций, характеристики принятых в проектной документации типов инженерного оборудования, предусмотренные в проектной документации мероприятия по благоустройству прилегающей территории должны обеспечивать защиту людей от:

- 1) воздушного шума, создаваемого внешними источниками (снаружи здания);
- 2) воздушного шума, создаваемого в других помещениях здания или сооружения;
- 3) ударного шума;
- 4) шума, создаваемого оборудованием;
- 5) чрезмерного реверберирующего шума в помещении.

2. В здании или сооружении, которые могут являться источником шума, приводящего к недопустимому превышению уровня воздушного шума на территории, на которой будут осуществляться строительство и эксплуатация здания или сооружения, должны быть предусмотрены меры по снижению уровня шума, источником которого является это проектируемое здание или сооружение.

3. Защита от шума должна быть обеспечена:

- 1) в помещениях жилых, общественных и производственных зданий;
  - 2) в границах территории, на которой будут осуществляться строительство и эксплуатация здания или сооружения.
4. В помещениях и на открытых площадках, где от различимости звука, создаваемого средствами радиооповещения, может зависеть безопасность людей, должны быть предусмотрены меры по обеспечению оптимального уровня громкости и различимости звука.
- «Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценки шумов на рабочих местах» МУ № 1844-78, разработанные для измерения и оценки шума.
  - «Допустимые уровни шума, вибрации и требования к звукоизоляции в жилых и общественных зданиях» МГСН 2.04.97
  - Свод правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».
  - Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Сан-Пин 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям помещения»
  - Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.662-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки», численно описывающий шум.

## **1.2. История возникновения залов различного назначения**

Начало истоков архитектурной/строительной акустики восходят к глубокой древности. Акустические задачи в те времена ставились и решались в связи со строительством гигантских сначала культовых, а позже и других общественных сооружений - залов для собраний и зрелищ.

Наши предшественники в Ассирии, Вавилоне, Древнем Египте в 5-2 тысячелетиях до н. э. возводили храмы и залы, имеющие выразительную архитектуру и мощный художественный образ. Огромные строительные конструкции, и уникальные скульптуры, живопись - все было направлено на то, чтобы поразить посетителей величием, создать у них ощущение особого пространства, мистической атмосферы, созданной божественными силами. Древним строителям и архитекторам, по-видимому, уже были известны законы распространения и отражения звуковых волн в залах. Применяя их, они достигали потрясающих акустических эффектов, поражающих воображение посетителей.

Другие, но столь же сильные чувства порождало искусство возведения величественных сооружений в Древней Греции (VII-IV вв. до н. э.) - одной из самых развитых мировых цивилизаций. В отличие от искусства Древнего Египта в основе древнегреческого лежало представление о силе и красоте человека, его неотъемлемой связи с окружающей средой, миром и общественной жизнью. Искусство Древней Греции выделялось гармоничностью и светлыми образами. Древним греческим храмам, залам и другим общественным сооружениям присуще соразмерность частей конструкций, это определило их уникальные акустические характеристики. Рациональность принятых проектных решений древними греками акустических приемов была подтверждена современной наукой нашего времени.

Так же наряду со зданиями, предназначенными для общения с высшими божествами, уделялось внимание сооружениям общего общественного назначения. Зрелищные постройки Древней Греции подразделялись на два типа: одейоны и театры. Первые - сравнительно небольшие крытые сооружения для репетиций и представлений с не большим количеством артистов (без музыкального сопровождения) и слушателей. Вторые являлись зрелищными сооружениями открытого вида и огромной вместимости (от 1 000

чел. До 20 000 чел.). Скамьи для зрительских мест располагались на возвышающейся плоскости, обходя обычно полукругом центральную площадку.

Элементы архитектурных особенностей греческих архитекторов были приняты их римскими последователями. Их открытые театры были достаточно сходны с греческими в некоторых моментах, но в отличие от предшествующих возводились не только на естественных склонах рельефа, но и на горизонтальных участках земли. Классическим примером такого театра является амфитеатр Флавия (Колизей на 56 000 чел.), используемый в 80-90 гг. н. э.

В современное время установка систем звукоусиления даже в залах вместимостью 200-300 человек является обычным необходимым делом. Поэтому фантастические свидетельства историков о вместимости древних греческих и римских театров, обходящихся естественной акустикой, так сильно удивляют. Например, театр Помпея одновременно размещал 17,8 тысяч человек, театр Марцелла в Риме (20 000 чел.).

Даже если эта информация несколько преувеличена (по современным оценкам, названные театры вмещали соответственно 5 000 и 7 000 зрителей), то кажется чудом, что в этих огромных сооружениях добивались удовлетворительной звучности и разборчивости на зрительных местах.

Остается предположить: либо уши тех посетителей зрелищных сооружений были в несколько раз чувствительнее современных, либо древние архитекторы знали неведомые методы акустических приемов, позволявших достигнуть достаточную громкость и разборчивость на зрительских местах.

Известно, что маски актеров на сцене, изображающие различные эмоции действующих персонажей, были такой формы, которая направляла звук в сторону слушателей.

Римский деятель, мыслитель, ученый и поэт Лукреций Кар в известном трактате "О природе вещей" высказал представление об акустике, в том числе и об акустике помещений залов того времени. Так же в "Десяти книгах об архитектуре" проанализировал опыт античных архитекторов и сформировал несколько положений, которые используются при строительстве театров и залов в наше время.

Наши предшественники имели хорошее представление о роли звуковых волн, их опасности поздних отражений, способных вызвать эхо. Знание акустических принципов в проектировании помещений находило иногда неожиданное применение. До современных дней дошли "шепчущие галереи", находящиеся в Древнем Риме и Китае.

В них, благодаря грамотно расположенным и специальным образом направленным отражающим поверхностям ограждающих конструкций, тихие звуки распространялись на достаточно большие расстояния, и человек, удаленный от другого на десятки метров, мог общаться с ним, не прикладывая больших усилий в голосе.

Не далеко от г.Сиракузы на о.Сицилия находятся древнейшие каменоломни. По древним рассказам, в одну из галерей, названную "ухом Диониса", располагали заключенных. Наверху, благодаря спроектированным каналам в виде щелей, были слышны все разговоры пленных между собой. Таким образом задерживающие их получали нужную тайную информацию.

Особые звуковые каналы так же помогали правящим в своих дворцах подслушивать секретные разговоры подданных, полагавших, что их не слышат, и на основании этого оценивалась их преданность.

В конце Дохристианского периода изучение строительной акустики, как части физики перестало идти вперед. Считалось, что большую роль в этом сыграл авторитет греческого мыслителя Аристотеля (384-322 г. до н. э.),

который говорил, что физическое исследование не достойно внимания ученого. Даже во времена Леонардо да Винчи (около 1,5 тыс. г. н. э.) строители и архитекторы того времени пользовались принципами об устройстве акустики помещений, заимствованными из античного опыта возведения.

Древние знания об акустической среде помещений нашли практическое применение при возведении монументальных зданий раннего и позднего средневековья. В католических храмах создавалась иллюзия музыки, спускающейся с небес. Это не случайная удача строителей, а осознанное использование особых архитектурных форм и объемов и определенное расположение музыкального инструмента и хора.

Специфическими акустическими характеристиками отличались так же и православные сооружения. Голоса священников и церковного хора отражались от купольной верхней части перекрытия сооружения и направлялись вниз, к молящимся. У них возникало ощущение необычного звучания, которое можно было услышать только там. Для создания необычной акустической среды архитекторы закладывали в конструкции стен и сводов разные глиняные - "голосники". Это были своеобразные особые акустические резонаторы, работающие на усиление.

В 18 и начале 19 в. внимание переместилось на сооружения концертных и театральных залов. Пошло развитие нового музыкального искусства - оперы. Оптимальным выбором геометрической формы, объемов, размеров помещений, рациональным размещением звукопоглощающих материалов в этих залах достигали хорошие условия для зрителей и исполнителей - актеров, музыкантов и поэтов.

В 19 веке из не четких представлений античного мира о строительной акустике стали вырисовываться определённые знания. В конце 19 и начале 20 веков У.Сэбин провел опыты, проложившие путь теории архитектурно-

строительной акустики, выявил количественную взаимосвязь геометрических показателей помещений и их акустическими свойствами.

Сэбин изучал акустические процессы после выключения источника звука, как запаздывание многократно отраженных звуковых волн и их постепенное угасание в итоге поглощения энергии волн встречающимися преградами. Начальная причина данного явления - энергия, сообщенная помещению зала от источника звуковой волны.

Эта теория У.Сэбина, вопреки большим практическим успехам, повлекла не малую критику.

После прекращения действия источника звука процесс затухания происходит не под воздействием вынужденных колебаний, а как результат затухания собственных (резонансных) колебаний, возбужденных источником звука, и с частотами, определяемыми формой и размерами помещения.

Такая теория, названная волновой, была основательно изучена Болтом, Морзом, Дрейзенем, Фурдуевым и другими. Следует отметить, что уже Дж. Стретт, опираясь на математическое решение, данное Дюамелем, считал возможным исследовать акустику помещений с точки зрения волновой теории.

До начала 20 в., т. е. до работ У. Сэбина, главное внимание в акустике помещений уделяли анализу направлений путей распространения потоков звуковой энергии в помещении - прямого и отраженного от преград, т. е. рассмотрению геометрической (лучевой) картины. Геометрическая теория - самая древняя. Она успешно применяется и в наше время, особенно при проектировании залов большой вместимости.

В современное время нет единой теории, объясняющей все акустические явления и звуковые процессы в помещениях и позволяющей с единых позиций

решать конкретные задачи оптимизации в залах разных назначений. К тому же, эти задачи связаны с психофизиологией и эстетической оценкой звучания слушателями, со вкусами музыкантов и актеров. Такие задачи носят особый характер, и мы не будем их касаться.

Проблемы акустики залов большой вместимости, оборудованных системами звукоусиления, также находятся за пределами данной работы. Она посвящена лишь рассмотрению основных положений и практическому применению трех существующих теорий - статистической, волновой, геометрической.

### **1.3. Предпосылки повышения энергоэффективности и ресурсосбережения**

В настоящее время существует огромное количество зданий с музыкальными залами, в которых излишний объем, не правильные габариты, формы потолка, пола играют плохую роль в общем акустическом комфорте помещений.

Звукоизоляция между зрительным залом и прочими помещениями, зависит от расположения этих помещений и может быть различной.

Очевидно, что смежные помещения передают шумовое воздействие друг другу более явно, если бы, например они были рассредоточены. Поэтому стоит обратить внимание на функциональную схему здания, оценить и расположить максимально выгодно, с точки зрения шума, помещения, которые потребуют определенного внимания в решении вопроса звукоизоляции и акустики.

Звукоизоляция репетиционных залов и классов очень важна и должна быть хорошо продумана. Вместе с этим простая обшивка стен, звуко-, виброизоляция полов, перегородок, звукоизоляция потолков и полов может быть не достаточной. В совокупности важно не количество и толщина звукоизолирующего акустического материала, а исполнение соединений, примыканий и исполнения узлов в местах сопряжения различных конструкций, подвергаемых процедуре увеличения звукоизоляции.

Правильное решение узлов и контроль монтажа повышает качество звукоизоляции, уменьшает траты на применяемый акустический материал и не «съедает» полезную площадь помещения.

#### **1.4. Шум, звук.**

Звук – это колебательный процесс, представляющий собой чередующиеся волны сгущения и разрежения упругой среды и волнообразно распространяющийся в этой среде. Любое колеблющееся тело, соприкасаясь с окружающей средой, образует звуковые волны и является источником звука. Волны сгущения приводят к повышению давления в упругой среде, а волны разрежения — к понижению. Отсюда появился термин звуковое давление — это переменное давление, возникающее дополнительно к атмосферному давлению при прохождении звуковых волн.

Звуки различаются по ряду признаков – это сила звука, частота звука. Чем выше частота колебаний звуковой волны, тем выше звук, который мы слышим.

Шум – это, как правило, совокупность звуков различной частоты и силы. С точки зрения воздействия на человека шум оценивается в частотном диапазоне от 45 до 11 тыс. Гц, который включает девять октавных полос.

Таблица 1.1 - Уровни шума

Уровень шума	Описание шума
22 дБА	Такой уровень шума характеризуется как абсолютная тишина.
25-26 дБА	Тишина. Уровни шума находятся на пороге слышимости и едва уловимы человеческим ухом.
30 дБА 31 дБА 32 дБА 36 дБА	Очень тихо. Уровни шума тихие, но хорошо слышимые. При измерениях можно обнаружить превышение фонового уровня (без слышимых шумов) на 3-5 дБА
40-45 дБА	Шум слабо слышим. Уровень шума, тихий, но шум слышно отчетливо. Превышение фона более чем на 3-5 дБА.
46-59 дБА	Нормальный уровень шума. Шум не нарушает условия комфорта.
60 дБА 65 дБА 75 дБА	Шум достаточно громкий. Выходит за пределы комфортных условий.
78 дБА 85 дБА 88 дБА 100-102 дБА 110 – 114 дБА	Очень громкий шум
120 дБА	Болевой порог
130 дБА 150 дБА	Нестерпимый шум. Находиться в таких условиях можно только в наушниках
180 дБА	Смертельный уровень шума

Шумы, проникающие в помещение, подразделяются на внешние и внутренние.

Первые, возникающие внутри здания, могут быть разделены на бытовые, а так же механические, связанные с работой инженерного и санитарно-технического оборудования (такими являются лифты, вентиляторы, насосов и др.).

Вторые создаются находящимися в доме людьми: разговоры, крики, плач, пение, игра на различных музыкальных инструментах.

Уровни шума вблизи этих источников могут достигать различных высоких значений: звуки от громких музыкальных инструментов создают шум от 80 до 90 дБ, громкий разговор и плач от 70 до 80 дБ, разговор средней громкости от 60 до 65 дБ.

При применении средств защиты от шума, в первую очередь, необходимо выяснить вид.

Виды шума:

- Воздушный - звуковые колебания в воздухе.
- Ударный – звуковые колебания при механическом воздействии на любую конструкцию, обычно это - пол, перекрытие, стена.
- Структурный – звуковые колебания, находящиеся в материале конструкции, переданные вибрирующим оборудованием.

Основные строительно-акустические методы защиты:

- Звукоизоляция ограждающих конструкций – свойство строительных конструкций задерживать часть энергии падающих на них звуковых волн, отражая или преобразовывая в энергию собственных колебаний.

- Звукопоглощение – свойство строительных конструкций поглощать, преобразовывая энергию звуковых волн в тепловую.
- Виброизоляция – свойство строительных конструкций задерживать часть энергии вибрации, отражая или преобразовывая в энергию собственных колебаний

## **1.5. Классификация акустических материалов**

Выбор материала для создания звукового комфорта в помещении зависит также от характера самого звука. Работающие электроприборы, телевизор, приемник, громкие разговоры, звуки от животных, звуки машин и так далее создают воздушный шум.

Если же происходит воздействие непосредственно на перекрытия: сверление стен, забивание гвоздей, ходьба, звук от перестановки мебели и т. п., то речь идет об ударном шуме.

Когда несущие конструкции дома жестко соединены между собой без применения звукоизолирующих упругих прокладок, то шум любого характера распространяется по конструкциям дома и превращается в структурный шум.

### **1.5.1. Классификация по функциональному назначению**

**Звукопоглощающие материалы** предназначены для применения в конструкциях звукопоглощающих облицовок внутренних помещений и для отдельных звукопоглотителей для снижения звукового давления в помещениях производственных и общественных зданий.

Звукопоглощающие материалы применяются в основном в звукопоглощающих облицовках производственных помещений и технических устройств, требующих снижения уровня шумов (промышленные цехи, машинописные бюро, установки вентиляции и кондиционирования воздуха и др.), а также для создания оптимальных условий слышимости и улучшения акустических свойств помещений общественных зданий (зрительные залы, аудитории, радиостудии и пр.).

Звукопоглощающая способность материалов обусловлена их пористой структурой и наличием большого числа открытых сообщающихся между собой пор, максимальный диаметр которых обычно не превышает 2 мм (общая пористость должна составлять не менее 75 % по объёму). Большая удельная поверхность материалов, создаваемая стенками открытых пор, способствует активному преобразованию энергии звуковых колебаний в тепловую энергию вследствие потерь на трение.

Эффективность звукопоглощающих материалов оценивается коэффициентом звукопоглощения, равным отношению количества поглощённой энергии к общему количеству падающей на материал энергии звуковых волн.

Звукопоглощающие материалы имеют волокнистое, зернистое или ячеистое строение и могут обладать различной степенью жёсткости (мягкие, полужёсткие, твёрдые).

Мягкие звукопоглощающие материалы изготавливаются на основе минеральной ваты или стекловолокна с минимальным расходом синтетического связующего (до 3 % по массе) или без него. К ним относятся маты или рулоны с объёмной массой до  $70 \text{ кг/м}^3$ , которые обычно применяются в сочетании с перфорированным листовым экраном (из алюминия, асбестоцемента, жёсткого поливинилхлорида) или с покрытием

пористой плёнкой. Коэффициент звукопоглощения этих материалов на средних частотах (250-1000 Гц) от 0,7 до 0,85.

К полужёстким материалам относятся минераловатные или стекловолоконистые плиты с объёмной массой от 80 до 130 кг/м<sup>3</sup> при содержании синтетического связующего от 10 до 15 % по массе, а также древесноволокнистые плиты с объёмной массой 180-300 кг/м<sup>3</sup>. Поверхность плит покрывается пористой краской или плёнкой. Коэффициент звукопоглощения полужёстких материалов на средних частотах составляет 0,65-0,75. В эту же группу входят звукопоглощающие плиты из пористых пластмасс, имеющие ячеистое строение (пенополиуретан, полистирольный пенопласт и др.).

**Звукоизоляционные материалы** применяются в качестве прокладок (прослоек) в многослойных ограждающих конструкциях для улучшения изоляции ограждений от ударного и воздушного звуков.

Звукоизоляционные прокладочные материалы применяются в виде рулонов или плит в конструкциях междуэтажных перекрытий, во внутренних стенах и перегородках, а также как виброизоляционные прокладки под машины и оборудование. Характеризуются малым значением динамического модуля упругости, как правило, не превышающим 1,2 Мн/м<sup>2</sup> (12 кгс/см<sup>2</sup>), при нагрузке 20 Мн/м<sup>2</sup> (200 кгс/см<sup>2</sup>).

Упругие свойства скелета материала и наличие воздуха, заключённого в его порах, обуславливают гашение энергии удара и вибрации, что способствует снижению структурного и ударного шума.

Различают звукоизоляционные прокладочные материалы, изготавливаемые из волокон органического или минерального происхождения (древесноволокнистые плиты, минераловатные и стекловолоконистые рулоны и плиты толщиной от 10 до 40 мм, объёмная масса 30-20 кг/м<sup>3</sup>), а также из

эластичных газонаполненных пластмасс (латексы синтетических каучуков, пенополиуретан, пенополивинилхлорид), выпускаемых в виде плит толщиной от 5 до 30 мм; объёмная масса эластичного пенополиуретана 40-70 кг/м<sup>3</sup>, пенополивинилхлорида 70-270 кг/м<sup>3</sup>.

В ряде случаев для целей звукоизоляции применяются штучные прокладки из литой или губчатой резины.

**Вибропоглощающие материалы** предназначены для ослабления изгибных колебаний, распространяющихся по жестким конструкциям (преимущественно тонким) для снижения излучаемого ими звука, для поглощения вибрации и вызываемых шумов при работе инженерного и санитарно-технического оборудования.

Вибропоглощающие материалы изготавливают как на основе натурального волокна (базальтовая вата, каолиновая вата, вспученный перлит, вспененное стекло, шамот) так и на основе синтетической субстанции (пенополиэстр, пенополиуратен, пенополиэтилен, пенополипропилен).

Наиболее долговечна минеральная вата из горных пород, в большинстве случаев - базальтовая. Среди её дополнительных преимуществ выделяют гидрофобность, огнестойкость, паропроницаемость и экологическую безопасность.

Для устранения передачи ударного звука применяются конструкции «плавающих» полов. Упругие прокладки укладываются между несущей плитой перекрытия и чистым полом. Также необходимо упругими прокладками отделять конструкцию пола от стен по периметру помещения.

Эффективными звукоизоляционными изделиями с волокнистой структурой являются маты и плиты полужесткие минераловатные и стекловатные на синтетическом связующем, маты и рулоны прошивные

стекловатные, древесноволокнистые изоляционные плиты, пористая резина, поливинилхлоридные и полиуретановые пенопласты.

Изготавливают ленточные и полосовые прокладки длиной от 1000 до 3000 мм и шириной 100, 150, 200 мм, штучные прокладки - длиной и шириной 100, 150, 200 мм. Изделия из волокнистых материалов применяются только в оболочке из водостойкой бумаги, пленки, фольги.

Вибропоглощающими материалами служат некоторые сорта резины и мастики, фольгоизол, листовые пластмассы. Вибропоглощающие материалы наносятся на тонкие металлические поверхности, при этом создается эффективная вибропоглощающая конструкция с высокой энергией на трение.

### **1.5.2. Классификация акустических материалов по свойствам**

1. По форме звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на:

- штучные (блоки, плиты);
- рулонные (маты, полосовые прокладки, холсты);
- рыхлые
- сыпучие (вата минеральная и стеклянная, керамзит, вспученный перлит и другие пористые зернистые материалы).

2. По жесткости звукопоглощающие материалы подразделяют на:

- мягкие,
- полужесткие,
- жесткие
- твердые.

3. По структурным признакам звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на:

- пористо-зернистые,
- пористо-волокнистые,
- пористо-ячеистые (из ячеистого бетона и перлита)
- пористо-губчатые (пенопласты, резины).

4. По возгораемости акустические материалы и изделия подразделяют на три группы:

- сгораемые,
- трудносгораемые
- несгораемые.

## 1.6. Отечественный и зарубежный опыт в акустическом проектировании. Анализ проблем

### 1.6.1. Лекционные залы и аудитории.

Таблица 1.2. Характеристики отечественных и зарубежных залов и аудиторий

Зал	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельн. объем м <sup>3</sup> /чел	Максимальное удаление от лектора, м	Оценка
Типовая аудитория МГУ	209	1048	5,0	14	Отл.
Лекционный зал Дворца культуры и науки в Варшаве	400	1800	4,5	17	Отл.
Большая аудитория МГУ	520	3144	6,0	24	Уд.
Конференц-зал МИД (высотка на Смоленской пл.)	520	5000	9,6	20	Неуд.

- Для лекционных залов рекомендуется оптимальный удельный объем 4-5 м<sup>3</sup>/чел. Первые два зала не вызывают никаких замечаний.
- Большая аудитория МГУ – объем завышен, время реверберации:

$$f_{500} - 2,3 \quad f_{2000} - 1,9 \text{ с при норме } 1,0-1,1 \text{ с.}$$

- Помещение несколько «гулкое», страдает разборчивость речи. Из-за большой высоты потолка велико запаздывание первых отражений в передней части аудитории.

Конференц-зал МИД – все недостатки предыдущего зала резко усугубляются, акустические условия неудовлетворительны.

### 1.6.2. Залы драматических театров

Таблица 1.3. Характеристики отечественных и зарубежных залов

Театры	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельн. объем м <sup>3</sup> /чел	Максимальное удаление от сцены, м	Оценка
Центральный театр Российской Армии	1500	17900	11,9	32	Неуд.
МХАТ (Камергерский)	1160	4850	4,2	23	Хор.
Театр им. Вахтангова	1050	4600	4,4	26	Отл.
Театр им. Пушкина	950	4400	4,6	22	Хор.

драматических театров

Центр. театр Российской армии (рис.3) – целый набор ошибок:

- удельный объем 11,9 м<sup>3</sup>/чел при оптимальном 4-5 м<sup>3</sup>/чел. Результат – завышенное время реверберации 1,5-1,6 с на  $f = 500-1000$  Гц (норма 1,2 с), зал «гулкий».

- высокий потолок 18,3 м – большое запаздывание отражений, в центре зала 60 мс.
- угол раскрытия стен  $18^\circ$  вместо  $10-12^\circ$  - отражения от стен не попадают в партер.
- отношение  $b/\lambda = 0,76$ , рекомендуемое 1,3-1,6, результат – плохая разборчивость на боковых местах.
- задняя стенка – цилиндрическая форма – фокусирование звука, эхо в первых рядах партера.
- глубина под балконом  $2,6h$  (должно быть не более  $1,5h$ ), результат – плохая слышимость.



Рисунок 1.3. Центральный театр Российской армии.

### 1.6.3. Залы театров оперы и балета

Таблица 1.4. Характеристики отечественных и зарубежных залов театров оперы и балета

Театры	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельн. объем м <sup>3</sup> /чел	Максимальное удаление от сцены, м	Оценка
Большой (Москва) Новый филиал	2300 970	13800 7900	6 8,1	24 25	Хор. Хор.
Оперы и балета (Минск)	1145	11410	10	25	Неуд.
Оперы и балета (Волгоград)	1100	5440	4,9	22	Неуд.
Детский музыкальный (Москва)	1250	8250	6,6	24	Хор.
Новая опера (Москва)	790	5500	7,0		Хор.
Ла Скала (Милан)	2289	11250	4,9	22	Уд.
Оперный (Одесса)	1728	9000	5,2	23	Уд.
Ковент-Гарден (Лондон)	2150	12250	5,7	25	Уд.
Национальная Опера (Париж) 1875	2130	10000	4,7	25	Хор.
Опера «Бастилья» (Париж) 1989	2700	21000	7,8	34	Неуд.
Театр Колон (Буэнос-Айрес) 1908	2487	20570	8,3	30	Отл.

Большой театр – в целом акустика хорошая, несколько сухо звучит музыка. Удельный объем на нижнем пределе оптимального 6-8 м<sup>3</sup> /чел.

Оперный театр в Минске (рис.1.4) – завышен объем, большая реверберация, гулко, плохая разборчивость. Форма в плане – полукруглая, фокусирование звука, отражения от стен не поступают в середину партера. Пространство под балконом  $\lambda = 2,2h$ , должно быть не более  $1,5h$ , плохо слышно в задних рядах под балконом.



Рисунок 1.4. Оперный театр в Минске, Беларусь.

Оперный театр в Волгограде (рис.5) объем занижен, музыка звучит сухо, нет объемного звучания.

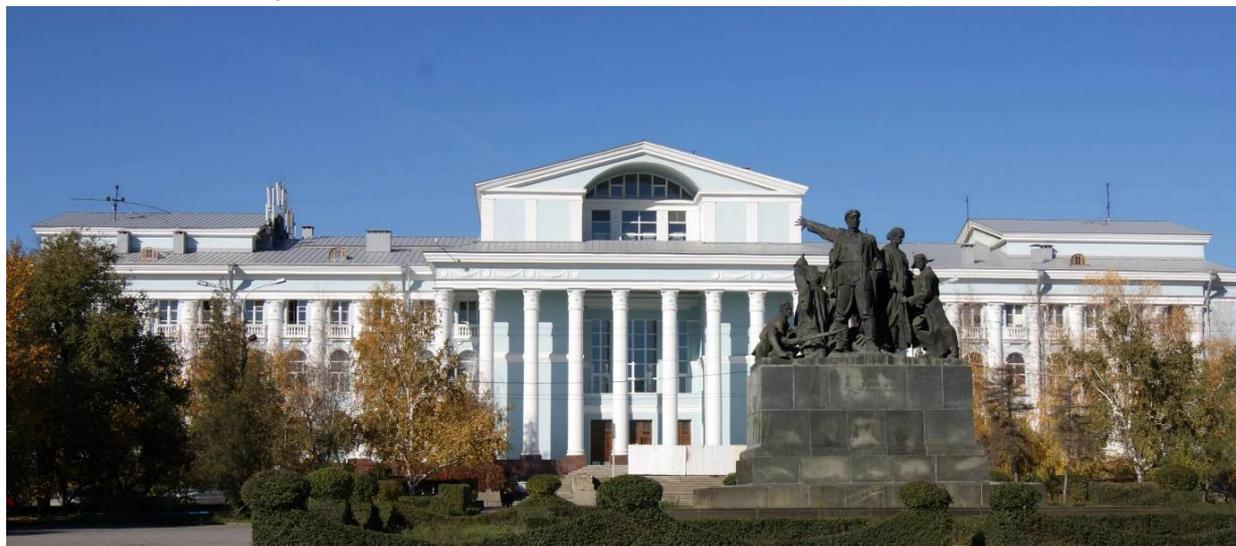


Рисунок 1.5. Оперный театр в Волгограде.

Детский музыкальный театр им. Н. Сац. Для устранения «театрального эха» пришлось обработать звукопоглощающим материалом примыкание потолка к задней стене и барьер балкона. Широкое раскрытие боковых стен привело к дефициту отражений (от стен) в партер, что компенсируется отражениями от козырька. Кривизна задней стены создавала опасность фокусирования звука, для исправления этого принято сложное членение задней стены.

Знаменитые театры Ла Скала в Милане (рис. 1.6) и Национальная Опера в Париже имеют заниженные объемы (4,9 и 4,7 м<sup>3</sup> /чел). Время реверберации в этих залах на средних частотах одинаково 1,25 с, в то время как оптимальное 1,6 с.



Рисунок 1.6. Театр Ла Скала в Милане.

Вместе с тем новый оперный театр в Париже «Бастилья» большей частью публики оценивается как неудовлетворительный с точки зрения акустики.

По общему мнению специалистов, лучшей акустикой обладает оперный театр Колон в Буэнос-Айресе.



Рисунок 1.7. Национальная Опера в Париже

#### 1.6.4. Концертные залы

В больших концертных залах для симфонической музыки оптимальный удельный объем 8-10 м<sup>3</sup>/чел, при органной музыке желательно его увеличить до 10-12 м<sup>3</sup>/чел. Обычно принято считать максимальной границей вместимости 2000 человек.

Однако, удельный объем, от которого зависит величина времени реверберации, еще не всецело определяет акустические качества зала. Огромное значение имеет структура отражений. А это уже зависит от формы зала.

Таблица 1.5. Характеристики отечественных и зарубежных концертных залов

Зал	Вместимость, чел.	Объем, м <sup>3</sup>	Удельн. объем м <sup>3</sup> /чел	T (500Гц) Измер	T(500Гц) Оптим.
Роял Альберт Холл (Лондон) 1871	5220	86650	16,6	2,4	2,2
Барбикан (Лондон) 1982	2026	17750	8,8	1,7	1,9
Зал музыкального общества (Вена) 1870	1680	15000	8,9	2,0	1,9
Бостонский симфонический 1900	2625	18740	7,1	1,9	1,9
Карнеги Холл (Нью-Йорк) 1891	2800	24270	8,7	1,8	2,0
Колонный зал Дома Союзов (Москва) 1814	1600	12500	7,8	1,8	1,85
Большой зал Консерватории (Москва) 1901	2150	17000	7,9	1,8	1,9
Концертный зал им. Чайковского 1930	1560	17630	11,2	2,0	1,9
Светлановский зал ММДМ (Москва) 2002	1800	17000 (19000) орг.	9,4 (10,5)	1,9 (2.1)	1,9 (2,35)
Гос. филармония (С.-Петербург)	1400	16380	11,7	1,8	1,9
Бетховен – Халле (Бонн) 1959	1420	16000	11,2	1,8	1,9

Старые залы – прямоугольная форма, небольшая ширина при относительно большой высоте, колонны, полуколонны, пилястры, лепнина – отражения от стен приходят раньше, чем от потолка, направления отраженного звука отличаются от направления прямого, это создает пространственное впечатление.

Этим объясняются отличные акустические качества таких залов, как Бостонский симфонический, Карнеги Холл в Нью-Йорке (рис.1.8), театра Колон в Буэнос-Айресе, хотя в них вместимость больше 2000 мест.



Рисунок 8. Зал Карнеги Холл в Нью-Йорке

Практически все зарубежные залы, приведенные в таблице, имеют хорошие акустические качества. Только Лондонский Роял Альберт Холл отличается повышенной гулкостью.

Из московских залов хорошая акустика в Колонном Зале Дома Союзов (рис.1.9) и в Большом зале консерватории (причины – выше). Неудачен в акустическом плане Концертный зал им. Чайковского.

Хотя время реверберации очень близко к оптимальному, но не все оно определяет. Зал в плане имеет форму эллипса, зрители располагаются на амфитеатре с большим подъемом.



Рисунок 1.9. Колонный Зал Дома Союзов

При таких условиях в зал не поступают отражения от стен, они идут только от потолка и приходят с большой задержкой из-за высокого потолка.

Интересное решение большого Светлановского зала Московского международного дома музыки, 2002 г. Строительства (рис.1.10).



Рисунок 1.10. Светлановский зал Московского международного дома музыки

При вместимости 1800 чел. в обычном варианте его объем 17000 м<sup>3</sup> (удельный объем 9,4 м<sup>3</sup> /чел), время реверберации на средних частотах соответствует оптимуму.

При исполнении органной музыки в звукоотражающем козырьке открываются окна (25% площади) и объем увеличивается до 19000 м<sup>3</sup> (удельный - 10,5 м<sup>3</sup> /чел), время реверберации увеличивается до 2,1 с.

Чтобы избежать отрицательных последствий купола (фокусирования) на его внутренней поверхности сделаны специальные отражатели, разбивающие его сферическую форму и обеспечивающие «перемешивание» звуков для повышения диффузности поля.

## **Выводы**

Таким образом, проанализировав информацию о современном состоянии принципов проектирования звукоизоляции и акустических решений, была обозначена необходимость в развитии более экономичных, энерго- и ресурсосберегающих путей решений для капитальных ремонтных работ зданий с музыкальными залами.

Проблема с перерасходом или не достатком звукоизоляции, не продуманным подходом к ее устройству приводит к не рациональному использованию акустических материалов и уменьшению площади помещений.

Так же, при капитальном ремонте часто возникают ошибки при проектировании акустической среды зала. Не экономичный подход и использование старых технологий ставит вопрос о целесообразности модернизации этого процесса.

В настоящее время нужен более комплексный метод к реализации капитального ремонта зданий с музыкальными залами. Этот метод должен включать в себя: перепланировку функциональной схемы; верное и рациональное использование звукоизоляционных акустических материалов, проработка узлов сопряжения между ними и конструкциями; акустическая среда помещения должна отвечать требованиям, которые устанавливаются конкретными целями зала.

## **ГЛАВА 2. Методы решения проблем звукоизоляции и проектирование акустической среды**

### **2.1. Характеристики исследуемого объекта. Варианты используемых отделочных материалов**

Строительство Объекта, в соответствии с проектной документацией, предусматривает строительное производство по возведению двухэтажного здания дома культуры и подвальное (цокольное) помещение.

Дом культуры (Рис.3) включает в себя следующие помещения: зрительный зал вместимостью 150 мест, библиотеку с помещением для закрытого фонда, читальный зал, хранилище декораций, кружковые, артистические, парикмахерскую, помещение бытовых услуг, танцевальный зал, фойе, вестибюль, гардероб, кабинет директора, санитарные узлы, душевые, раздевалки, комнату уборочного инвентаря, коридоры, тамбур.

Здание оснащается системами инженерно-технического обеспечения, в том числе системой электроснабжения, теплоснабжения, вентиляции, холодного и горячего водоснабжения, водоотведения, сетями связи.

#### Основные технико-экономические показатели Объекта:

- площадь участка – 2404,23 м<sup>2</sup>;
- площадь застройки – 982,27 м<sup>2</sup>;
- строительный объем – 4986 м<sup>3</sup>;

#### Характеристика здания:

- степень огнестойкости здания – II;
- степень ответственности здания – II;
- класс конструктивной пожарной опасности здания – С0;
- класс функциональной пожарной опасности здания - Ф2.1.

#### *Конструктивные решения:*

Фундаменты – монолитные ленточные по гравийно-песчаной подушке

Стены – кирпичные

Стены подвала – из сборных бетонных блоков

Перекрытие – сборные железобетонные многопустотные плиты

Крыша – стропильная с покрытием металлочерепица

Двери наружные – алюминиевые утепленные, двери внутренние – из МДФ, глухие и остекленные

Окна – пластиковые

Полы – с покрытием из керамической плитки, линолеума, досок, бетона

Ограждения крылец – из металлоконструкций

Козырьки – из металлоконструкций с покрытием из металлочерепицы

Водосток – организованный

Отмостка – бетонная.

Панели потолочные с комплектующими: «Армстронг»

Плиты теплоизоляционные ПТЭ-150 Ц

## **2.2. Способы проектирования эффективной звукоизоляции**

### **2.2.1. Механизм прохождения звука через однослойную панель**

С точки зрения передачи звука, различают акустически однородные (однослойные) конструкции и акустически неоднородные (многослойные) конструкции. Однородные конструкции, о которых пойдет речь далее, состоят из одного или нескольких слоев, жестко связанных между собой по всей поверхности и колеблющихся как одно целое (оштукатуренные кирпичные стены, плиты перекрытий с покрытием по стяжке линолеумом и др.). Многослойные конструкции состоят из нескольких слоев, не связанных жестко друг с другом, способных колебаться с разными для каждого слоя

амплитудами. Звукоизоляционные свойства неоднородных конструкций выше, чем однородных.

Для однослойных конструкций одним из факторов снижения звукоизоляции воздушного шума является явление «волнового совпадения». При возбуждении однослойной конструкции в какой-либо точке под действием источника колебаний, в ней распространяются изгибные волны, скорость которых зависит от толщины, плотности, модуля упругости и частоты возбуждающих колебаний. В звуковой волне, падающей наклонно на конструкцию, чередующиеся области повышенного и пониженного звукового давления вызывают деформацию и изгиб конструкции.

Согласно теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой проф. М.С. Седова, установлено, что во всем диапазоне частот прохождение звука пластину ограниченного размера связано с явлением самосогласования звуковых полей с собственным полем пластины. При этом прохождение звука имеет двойственную природу: резонансное и инерционное прохождение звука. С учетом двойственной природы прохождения звука выражение звуковой мощности, излучаемой ограждающей конструкцией, запишется как:

$$W_2 = W_{2c} + W_{2и}, \quad (1)$$

где  $W_{2c}$  – мощность, излучаемая упругими волнами;  $W_{2и}$  – мощность, излучаемая инерционными волнами.

В этом случае суммарный коэффициент прохождения звука через ограждение:

$$\tau = \tau_c + \tau_{и}, \quad (2)$$

где  $\tau_c$  – коэффициент резонансного прохождения звука, а  $\tau_{и}$  – коэффициент инерционного прохождения звука через ограждение. Собственная звукоизоляция ограждения, дБ:

$$R = 10 \lg ( 1/ \tau_c + \tau_{и} ) . \quad (3)$$

Механизм прохождения звука через однослойную панель (рис 1) заключается в следующем: звуковые волны, падающие со стороны источника шума, образуют в плоскости ограждения поле звукового давления, которое, в свою очередь, возбуждает в пластине изгибные колебания. При этом волновое поле смещений пластины формируется свободными упругими и инерционными (чисто вынужденными) волнами [15].

Поле инерционных волн образовано однородной вынужденной волной и краевыми неоднородными вынужденными волнами. Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется массой и размерами ограждения. Данные волны существуют на каждой частоте, а на частотах собственных колебаний панели собственные и инерционные волны отличаются начальной фазой движения [15].

Резонансное прохождение звука через панель определяется потерями энергии на рассеивание в материале (характеризуются коэффициентом потерь  $\eta$ ) и степенью самосогласования собственного волнового поля и звуковыми полями перед и за ограждением ( $A_1$  и  $A_2$  – в «шумном» и «тихом» помещениях соответственно). Таким образом, излучение звука в режиме собственных колебаний различно в областях простых, неполных и полных пространственных резонансов.

Для панелей с небольшой цилиндрической жесткостью инерционное прохождение может преобладать, и тогда звукоизоляция определяется поверхностной массой. Чем выше цилиндрическая жесткость ограждения, тем

больший вклад в излучение звука вносят резонансные колебания. В этом случае на величину звукоизоляции, кроме массы, оказывают влияние толщина пластины, модуль упругости и коэффициент потерь материала.

Повысить собственную звукоизоляцию ограждения можно путем уменьшения цилиндрической жесткости  $D$  или увеличением коэффициента потерь.

В свою очередь цилиндрическая жесткость пластины определяется:

$$D = Eh^3/(12(1-\mu)) , \quad (4)$$

где  $E$  – модуль упругости материала (модуль Юнга) пластины, Па;  $h$  – толщина пластины, м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала пластины.

В момент, когда скорость распространения вынужденной волны в пластине совпадает со скоростью свободной изгибной волны, наступает своеобразный резонанс, который был назван эффектом волнового совпадения.

Волновое совпадение – это явление, когда точно совпадают фазовые скорости распространения свободных изгибных волн в пластине и фазовые скорости распространения падающих звуковых волн вдоль пластины.

При этом интенсивность изгибных колебаний резко увеличивается и, следовательно, резко возрастает прохождение звука через ограждение в изолируемое помещение. Теоретически имеет место полное прохождение звука через ограждение.

Таким образом становится понятно, что в определенном диапазоне частот, как установил Л. Беранек, например: в зоне I прохождение звука через пластину зависит от изгибной жесткости. Чем она выше, тем ниже коэффициент звукопоглощения конструкции. Кроме того, в этой области значительное влияние оказывают резонансы пластины. В зоне II звукоизоляция ограждения

определяется только его массой, а в зоне III – волновым совпадением и жесткостью пластины.

### **2.2.2. Методы по улучшению звукоизоляции ограждающих конструкций**

Для однослойных массивных ограждений существует зависимость – чем оно массивнее, тем лучше оно изолирует помещение от шума. Согласно исследованиям, удвоение массы конструкции приводит к улучшению звукоизоляции в среднем на 6 дБ.

Однако требование рационального расхода ресурсов диктует необходимость развития современного проектирования звукоизоляции в направлении обеспечения требуемых акустических условий в помещениях за счет регулируемой звукоизоляции ограждений при минимально возможной их массе.

Улучшения звукоизоляции перегородки можно добиться, уменьшив жесткость узла сопряжения каркаса перегородки с несущим перекрытием и элементов перегородок друг с другом. Для этого при монтаже перегородок между поверхностью основания и горизонтальными направляющими устанавливают уплотнительные ленты, эластичные прокладки. Аналогично уплотняющие прокладки устраивают в узле примыкания перегородки к потолку.

Устройство обшивки из двух рядов ГКЛ по сторонам деревянных стоек, позволяющее увеличить поверхностную плотность конструкции, приводит к улучшению звукоизоляции на 8-9 дБ. Замена деревянного каркаса на

одинарный металлический позволяет повысить звукоизоляцию на 3-5 дБ, при 20 %-ном снижении массы перегородки.

Хорошую звукоизоляцию могут обеспечить перегородки по металлическому каркасу с двухслойной обшивкой, у которых индекс изоляции воздушного шума на 6 дБ больше по сравнению с однослойной.

Наличие жесткого каркаса создает условия для беспрепятственной передачи звука через его конструкцию от одной обшивки к другой. Поэтому замена одинарного каркаса на двойной, состоящий из двух рядов, не связанных между собой стоек, позволяет значительно улучшить звукоизоляционные характеристики.

Улучшение звукоизоляции слоем, таким как упруго закрепленная облицовка стен, плавающий пол или подвесной потолок, различно для косвенной и прямой звукопередачи и зависит от типа базовых структурных элементов, на которые устанавливается слой. Поэтому звукоизоляция должна определяться по результатам лабораторных измерений с таким же базовым структурным элементом, который применяется в натуральных условиях.

В настоящее время не существует стандартного метода расчетов или измерений, позволяющего определить влияние косвенной звукопередачи на прямую звукопередачу, а также результатов, обусловленных изменением базового структурного элемента.

Однако, по результатам испытаний различных технических решений, позволяющих улучшить звукоизоляцию конструкций, набирается статистика, позволяющая использовать их в процессе проектирования. Некоторые типичные примеры улучшения звукоизоляции дополнительными слоями или при помощи мероприятий приведены в таблице 2 согласно ГОСТ Р ЕН 12354-12012, СП 55-101-2000 и каталогам производителей.

### 2.2.3. Оценка звукоизоляции ограждающих конструкций

Согласно СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» [2] при ориентировочных расчетах индекс изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями сплошного сечения допускается определять по формуле:

$$R=37\lg m+55\lg K-43 \quad (5)$$

где  $m$  – поверхностная плотность, кг/м<sup>2</sup>;

$K$  – коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью.

С 01.12.2013 г. на территории РФ действует ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 «Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Часть 1. Звукоизоляция воздушного шума между помещениями» [3]. В ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 приводится следующая формула для расчета звукоизоляции ограждающих конструкций согласно ЕН ИСО 717-1 «Акустика. Оценка звукоизоляции в зданиях и строительных элементах. Часть 1. Изоляция от воздушного шума»:

$$R_w=37,51 \lg(m/m_0)-42 \quad (6)$$

Для  $m < 150$  кг/м<sup>2</sup> применяется коррекция  $C = -1$  дБ,

Для  $m > 150$  кг/м<sup>2</sup>  $C = -2$  дБ.

Сравнение результатов измерений, представленных различными международными лабораториями за последние тридцать лет, показывает, что

они лежат в пределах отклонений от минус 4 до плюс 8 дБ. Такой относительно большой разброс обусловлен многими факторами, некоторые из которых связаны с особенностями материала, другие с лабораторным оборудованием и применением различных методов измерений. Учет влияния указанных факторов привел к разработке различных эмпирических формул для «закона массы», используемых в настоящее время в европейских странах.

### **2.3. Акустика. Основные принципы проектирования**

В закрытом помещении после прекращения действия источника звука слушатель воспринимает прозвучавший музыкальный или речевой сигнал в течение некоторого временного интервала. Это объясняется тем, что уровень звукового давления (у.з.д.), созданный в расчетной точке, является интегральной характеристикой энергии прямого звука и энергии отраженных от поверхностей помещения звуковых волн.

Процесс спада звуковой энергии называется *реверберационным процессом*, а само явление - *реверберацией*.

Для количественной оценки реверберации используется понятие - *время реверберации*, которое не должно зависеть ни от индивидуального порога слышимости, ни от начального уровня сигнала. Это время, за которое первоначальная энергия сигнала уменьшится на 60 дБ.

Надлежащее время реверберации, характеризующее общую гулкость помещения, является одним из важных условий хорошей акустики зала. При этом следует помнить, что для достижения четко определенного времени реверберации требуется достаточная диффузность звука в зале.

Время реверберации является первой и одной из основных характеристик помещений, зависящей от объема помещения и общего звукопоглощения. Объем зала определяется пропорциями зала.

Отношение длины зала  $l$  к средней ширине  $в$  оптимально:

$$1,3 \leq l/v \leq 1,6. \quad (7)$$

В таких пределах и отношение ширины зала к средней высоте должно быть в пределах от 1,3 до 1,6.

Рекомендуемая в плане форма раскрытия трапеции боковых стен зала от  $5-12^\circ$ . Прямоугольная форма с горизонтальным потолком допустима только для лекционных залов с вместимостью не более 200 человек.

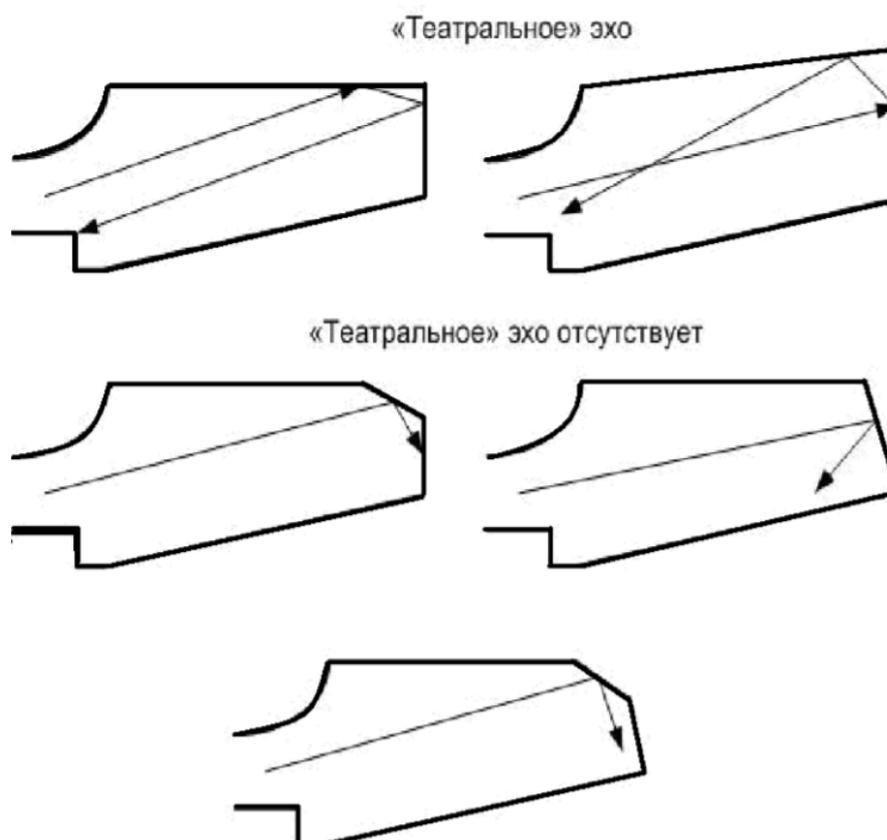


Рисунок 2.1. Театральное эхо

В расчете акустических параметров вычисляются такие показатели как:

- Время запаздывания первых отражений.

- Допустимое время запаздывания
- Радиус действия прямого звука. Театральное эхо (рис.2.1.)

Присутствие и сила эха также зависит от плотности и разреженности воздуха и многих других факторов — дальности источника звука и отражающей поверхности, угла отражающей поверхности по отношению к звуковым волнам, интервала между прямой и отражённой волной.

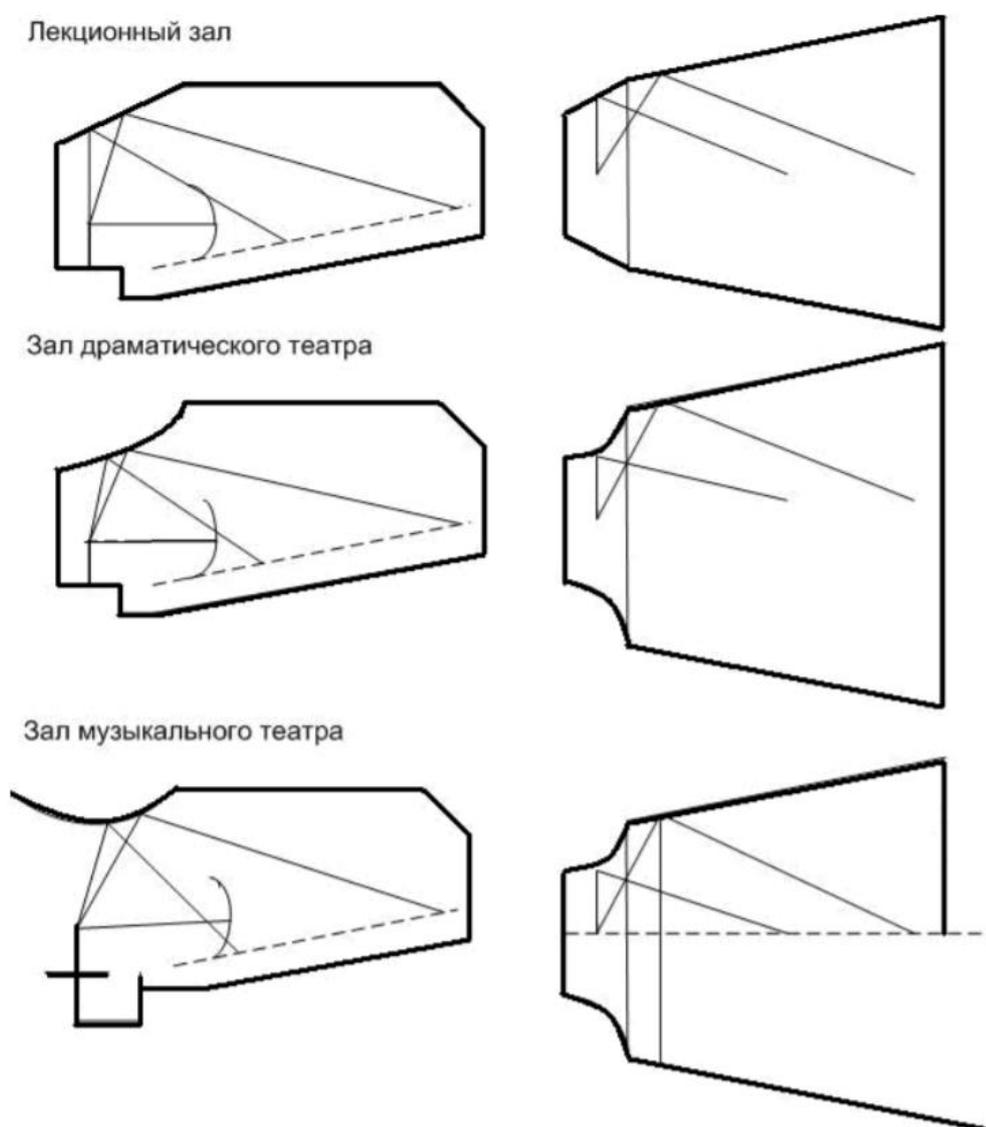


Рисунок 2.2. Первые отражения от потолка, стен и отражателей.

## 2.4. Физико-математическая модель процесса распространения звука

Волна – изменение состояния среды (возмущение), распространяющееся в этой среде и переносящее с собой энергию. Иными словами: «волнами или волной называют изменяющееся со временем пространственное чередование максимумов и минимумов любой физической величины, например, плотности вещества, напряжённости электрического поля, температуры».

Не зависимо от природы волны перенос энергии осуществляется без переноса вещества; последнее может возникнуть лишь как побочный эффект. Перенос энергии принципиальное отличие волн от колебаний, в которых происходит, так сказать, лишь «местные» преобразования энергии. Волны же, как правило, способны удаляться на значительные расстояния от места своего возникновения.

То есть вторая производная смещения по времени пропорциональна второй производной смещения по координате, причем коэффициентом пропорциональности служит квадрат скорости распространения волны  $V$ .

Полученное дифференциальное уравнение в наиболее общем виде описывает распространение волнового процесса; оно носит название волнового уравнения.

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} \nabla \rho \right) = 0, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – давление, при котором слышим звук ( $2 \cdot 10^{-5}$  Па);

$\rho$  – давление, Па;

$t$  – время, с.

Плоская волна отличается тем свойством, что направление ее распространения и ее амплитуда одинаковы во всем пространстве. Произвольные звуковые волны этим свойством, конечно, не обладают. Однако

возможны случаи, когда звуковую волну, не являющуюся плоской, в каждом небольшом участке пространства можно рассматривать как плоскую. Для этого необходимо, чтобы амплитуда и направление волны почти не менялись на протяжении расстояний порядка длины волны.

Если выполнено это условие, то можно ввести понятие о лучах как о линиях, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением распространения волны, и можно говорить о распространении звука вдоль лучей, отвлекаясь при этом от его волновой природы. Изучение законов распространения звука в таких случаях составляет предмет геометрической акустики. В данном случае процесс распространения звуковых волн описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{q}}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{k}} \\ \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{q}} \end{cases} \quad (9)$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор,  $\text{м}^{-1}$  ;

$\omega$  – частота,  $\text{с}^{-1}$ ;

$t$  – время,  $\text{с}$ ;

$\vec{q}$ –вектор,  $\text{м}$

## 2.5. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics — универсальная программная платформа для моделирования прикладных задач. В ней можно использовать базовую платформу отдельно или расширять его функциональные возможности, комбинируя и добавляя модули расширения, которые позволяют моделировать электромагнитные, механические, акустические,

гидродинамические, термодинамические и химические устройства и процессы.

Используемые численные методы и доступные типы исследований.

Программный пакет COMSOL использует для расчетов гибкие и эффективные решатели и методы. Частоты, характерные для задач акустики, покрывают несколько декад. Вычислительная сложность расчетов может сильно зависеть от формулировки акустической задачи. Таким образом, ни один конкретный способ или численный метод не подходит к абсолютно всем задачам из данной области.

Модуль Акустика содержит четыре различных численных метода: метод конечных элементов (FEM), метод граничных элементов (BEM), метод трассировки лучей (Raytracing) и разрывный метод конечных элементов Галеркина (dG-FEM). Различные типы исследований дополняют набор численных методов и позволяют выполнять все нужные виды анализа. В частности, в модуль включены исследования в частотной области (frequencydomain), исследования на собственные частоты и моды (eigenfrequency и eigenmodes), а также нестационарные исследования во временной области (timedomain). Специализированные итерационные методы позволяют решать мультифизические модели с миллионами степеней свободы, сочетая различные подходы в рамках одной задачи.

Программный пакет для моделирования акустических явлений в устройствах и конструкциях.

С помощью моделирования можно исследовать и улучшать качество звука и снижать уровень шума для различных устройств и конструкций, основанных на акустических явлениях и эффектах. Модуль Акустика расширяет возможности пакета COMSOL Multiphysics® и предоставляет набор инструментов для моделирования акустических волн и вибраций в громкоговорителях, мобильных устройствах, микрофонах,

звукопоглощающих устройствах, датчиках, сонарах и расходомерах. Вы можете использовать специализированные функции для визуализации акустических полей и построения виртуальных прототипов устройств и компонентов.

Модуль Акустика также включает множество специализированных формулировок и материальных моделей, которые можно использовать для узкоспециализированных прикладных задач, например, для расчета термических и вязких потерь (т.н. термовязкостная акустика) в миниатюрных преобразователях и мобильных устройствах или для расчета пороупругих волн и колебаний на основе уравнений Био. Мультифизический функционал дополнительно расширяется за счет использования нескольких специализированных численных методов, включая метод конечных элементов (МКЭ - FEM), метод граничных элементов (МГЭ - BEM), трассировку лучей (RayTracing) и разрывный метод конечных элементов Галеркина (dG-FEM).

#### Модуль геометрическая оптика

Универсальный и эффективный расчет траекторий лучей. Модуль RayOptics (Геометрическая оптика) позволяет моделировать распространение электромагнитных волн в системах, в которых длина волны значительно короче наименьшего геометрического элемента модели. Электромагнитные волны рассматриваются как лучи, которые проникают сквозь однородные и дифференцированные среды. Траекторий таких лучей могут рассчитываться на больших расстояниях при минимальных затратах на вычисления, поскольку отсутствует необходимость выражать длину волны с помощью сетки конечных элементов. На границах сред лучи могут подвергаться отражению и рефракции.

В модуле RayOptics доступен ряд граничных условий, включая сочетание зеркального и рассеянного отражения. Лучи могут брать начало в областях, на границах или на регулярной сетке точек. Особые функции

доступны для моделирования солнечного излучения, а также лучей, отраженных от освещенной поверхности или преломленных ею. Специализированные инструменты постобработки обеспечивают множество способов анализа траекторий лучей, оценки представления множества лучей и даже визуализации интерферограммы.

Используем ли мы только модуль Акустика либо сочетание различных продуктов семейства COMSOL, процесс моделирования в программном пакете COMSOL® всегда универсален, логичен и прост.

Типичный процесс моделирования состоит из нескольких шагов:

- построение геометрии;
- выбор материалов;
- выбор подходящего физического интерфейса;
- задание граничных и начальных условий;
- создание конечноэлементной сетки, в т.ч. автоматическое;
- расчет физической модели;
- визуализация результатов;
- интеграция с другими программными платформами.

Если мы хотим использовать в модели табличные данные или включить в модель сложную геометрию из сторонней CAD-системы, то для нас найдется подходящий модуль интеграции. С помощью продуктов LiveLink™ мы можем интегрировать программный пакет COMSOL Multiphysics® со многими сторонними инструментами, например, программным пакетом MATLAB®, электронными таблицами Microsoft® Excel®, пакетом Inventor® и многими другими.

## Вывод

Подводя итог можно сказать, что нет разработанного инженерного подхода методики расчета акустики и звукоизоляции музыкальных залов при капитальном ремонте, строительстве и реконструкции.

Во-первых, нужно оценить геометрические параметры и отметить верные пути, при выборе объема зала и габаритов конструкций. Сделать это максимально адаптивно для различных зданий, имеющих разные мощности посещаемости и специфику работы.

Во-вторых, необходимо построить геометрическую модель распространения звуковых волн в помещении, для определения наиболее выгодных положений для установки отражателей звука. Определить положение сцены и зрительных мест в плане по высоте. Выявить основные закономерности, которые можно применять для применения в проектах подобных помещений музыкальных залов.

В-третьих, для достижения проектирования эффективной звукоизоляции необходимо совершить расчет вариантов ограждающих конструкций разных типов и материалов, с точки зрения экономии средств.

## ГЛАВА 3. Исследования и расчеты, направленные на выбор оптимального проектного решения

### 3.1. Расчеты звукоизоляции перегородок

Расчет производится согласно СП 23-103-2003. Часть 3.

Расчетом предусматривается комплекс мероприятий, обеспечивающих выполнение следующих нормативных требований по защите от шума:

Таблица 2 - «Требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума ограждающих конструкций и приведенные уровни ударного шума перекрытий при передаче звука сверху вниз» свода правил СП 51.13330.2011 «Защита от шума» в части Образовательные организации.

Таблица 9.1. Требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума.

Наименование и расположение ограждающей конструкции	$R_{w\text{треб}}$ , дБ
П.32. Стены и перегородки между классами, кабинетами и аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования.  (П.33. Стены и перегородки между музыкальными классами образовательных организаций среднего общего образования и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования)	48 (55)

#### 3.1.1. Вариант А.

Расчет звукоизоляции перегородки из стеновых бетонных блоков КП-ПС-39-150-1500 (ГОСТ 6133-99) толщиной 90 мм со слоем штукатурки.

Рассчитаем изоляцию воздушного шума конструкции перегородки стеновых бетонных блоков с поверхностной плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup> и пустотностью 20 %. Толщина перегородки 110 мм с учетом цементной штукатурки по 10 мм с каждой стороны. Средняя плотность с учетом пустотности 1840 кг/м<sup>3</sup>.

Находим частоту, соответствующую точке В

$$f_B = \frac{29000}{h} = \frac{29000}{110} = 2636 \text{ Гц} \approx 250 \text{ Гц} \quad (11)$$

Округляем до среднегеометрической частоты 1/3 -октавной полосы, в пределах которой находится  $f_B$ .

Определяем поверхностную плотность ограждения  $m = \gamma h$ , в данном случае  $m = 1840 \cdot 0,09 + 1800 \cdot 0,02 = 201,6 \text{ кг/м}^2$ .

Определяем ординату точки В в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности  $m_3$ , по формуле:

$$R_B = 20 \lg m_3 - 12 \quad (12)$$

Эквивалентная поверхностная плотность определяется по формуле:

$$m_3 = K \times m \quad (13)$$

где К- коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью. Определяется по табл. 10 СП 23-103-2003. Для бетонных блоков с пустотностью 20%  $K=1,1$

$$m_3 = 201,6 \text{ кг/м}^2 \times 1,1 = 221,76 \text{ кг/м}^2 \quad (14)$$

Подставляем значения в формулу 1:

$$R_B = 20 \lg 242 - 12 = 35 \text{ дБ} \quad (15)$$

Из точки В влево проводим горизонтальный отрезок ВА, вправо от точки В – отрезок ВС с наклоном 6 дБ на октаву до точки С с ординатой 65 дБ. Точка С соответствует частоте 5000 Гц, Рассчитанная частотная характеристика изоляции воздушного шума рассмотренной конструкции перегородки приведена на рисунке 3.1.

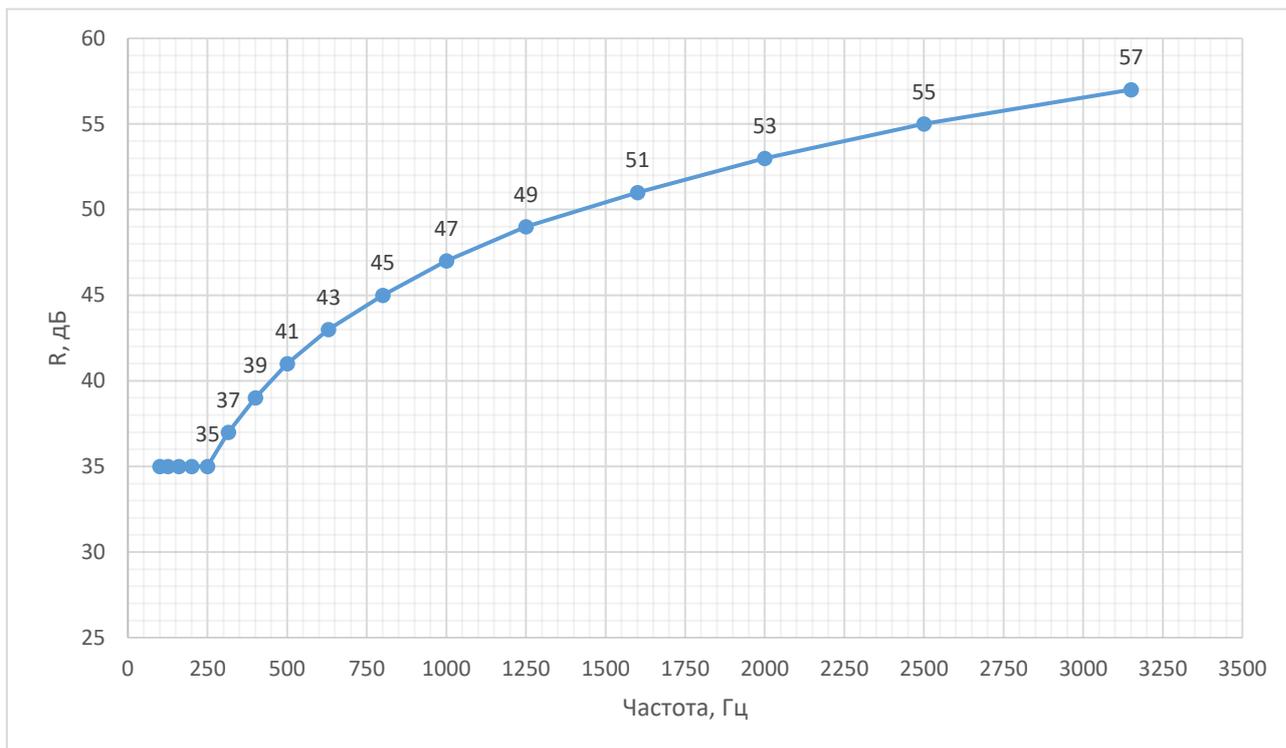


Рисунок 3.1. Расчетная частотная характеристика изоляции воздушного шума перегородки Вариант А.

В нормируемом диапазоне частот изоляция воздушного шума исходной перегородкой составляет значения, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Изоляция воздушного шума перегородки Вариант А.

<b>f, Гц</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
R, дБ	35	35	35	35	35	37	39	41
<b>f, Гц</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>
R, дБ	43	45	47	49	51	53	55	57

Определим индекс изоляции воздушного шума  $R_w$  перегородкой из стеновых бетонных блоков отштукатуренной с двух сторон, расчетная частотная характеристика которой приведена в Таблице 9.1. Расчет проводится по форме Таблицы 3.2. Вносим в таблицу значения  $R$  оценочной кривой и находим неблагоприятные отклонения расчетной частотной характеристики от оценочной кривой.

Таблица 3.2. Расчет неблагоприятных отклонений расчетной частотной характеристики от оценочной кривой.

№	Среднегеометрическая частота 1/3 - октавной полосы, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	<b>500</b>	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	35	35	35	35	35	37	39	<b>41</b>	43	45	47	49	51	53	55	57
2	33	36	39	42	45	48	51	<b>52</b>	53	54	55	56	56	56	56	56
3	-	1	4	7	10	11	12	<b>11</b>	10	9	8	7	5	3	1	-
4	27	30	33	36	39	42	45	<b>46</b>	47	48	49	50	50	50	50	50
5	-	-	-	1	4	5	6	<b>5</b>	4	3	2	1	-	-	-	-
6								<b>46</b>								

В таблице номера пунктов:

- 1- Расчетная частотная характеристика  $R$ , дБ
- 2- Оценочная кривая, дБ. Набор оценочных значений, используемых для сравнения с результатами измерений в третьоктавной полосе, приведен в таблице 3. ГОСТ Р 56769-2015 «Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума»
- 3- Неблагоприятные отклонения, дБ
- 4- Оценочная кривая, смещенная вниз на 2, дБ
- 5- Неблагоприятные отклонения от смещенной оценочной кривой, дБ
- 6- Индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ , дБ

Если сумма неблагоприятных отклонений максимально приближается к 32 дБ, но не превышает эту величину, величина индекса  $R_w$  составляет 52 дБ. Если сумма неблагоприятных отклонений превышает 32 дБ, оценочная кривая смещается вниз на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений не превышала указанную величину.

Если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, оценочная кривая смещается вверх на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой максимальна приближалась к 32 дБ, но не превышала эту величину.

В данном случае сумма неблагоприятных отклонений 99 дБ выше 32 дБ. Смещаем оценочную кривую вверх на 4 дБ и находим сумму неблагоприятных отклонений уже от смещенной оценочной кривой. На этот раз она составляет 31 дБ, что менее 32 дБ.

За величину индекса изоляции воздушного шума принимаем значение смещенной оценочной кривой в 1/3 октавной полосе 500 Гц, т.е.  $R_w = 46$  дБ, что НЕ СООТВЕТСТВУЕТ требованиям СП 51.13330.2011 «Защита от шума». Требуется дополнительное устройство звукоизоляционного материала. Звукоизоляционные характеристики подобных конструкций определяются в основном их массой, но даже при увеличении толщины в два раза, индекс звукоизоляции поднимается на 5-8 дБ. В таком случае есть два пути решения: первый - увеличение толщины перегородки, если «съедаемая» площадь не является критической; второй - применение многослойной конструкции.

В этом варианте перегородки используем дополнительную обшивку гипсокартоном (ГОСТ 6266-97) 12,5 мм для повышения звукоизоляции.

При различном выполнении монтажа, качества проработки стыков и связей значение дополнительной звукоизоляции остается в пределах от 2 до 8 дБ.

Таким образом, общий индекс звукоизоляции перегородки составляет в худшем варианте исполнения:

$46 + 2 = 48$  дБ, что СООТВЕТСТВУЕТ требованиям СП 51.13330.2011 «Защита от шума».

### 3.1.2. Вариант Б.

Расчет звукоизоляции бетонных перегородок толщиной 160 мм (ГОСТ 26633-2015).

Рассчитаем изоляцию воздушного шума конструкции перегородки из тяжелого бетона 2400 кг/м<sup>3</sup>, с поверхностной плотностью 400 кг/м<sup>2</sup>. Толщина перегородки 160 мм.

Находим частоту, соответствующую точке В:

$$f_B = \frac{29000}{h} = \frac{29000}{160} = 181,25 \approx 200 \text{ Гц} \quad (16)$$

Округляем до среднегеометрической частоты 1/3 -октавной полосы, в пределах которой находится  $f_B$ .

Определяем ординату точки В в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности  $m_e$ , по формуле 13. Эквивалентная поверхностная плотность определяется по формуле 14.

где К- коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и т.п. по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью. Определяется по табл. 10 СП 23-103-2003. Для

сплошных ограждающих конструкций плотностью более  $1800 \text{ кг/м}^3$  и более  $K=1$ .

Подставляем значения в формулу 2:

$$m_3 = 400 \times 1 = 400 \text{ кг/м}^3 \quad (17)$$

Подставляем значения в формулу 1, значение округлить до 0,5 дБ:

$$R_B = 20 \lg 400 - 12 = 40,05 \approx 40 \text{ дБ}$$

Из точки В влево проводим горизонтальный отрезок ВА, вправо от точки В – отрезок ВС с наклоном 6 дБ на октаву до точки С с ординатой 65 дБ. Рассчитанная частотная характеристика изоляции воздушного шума рассмотренной конструкции перегородки приведена на рисунке 3.2.

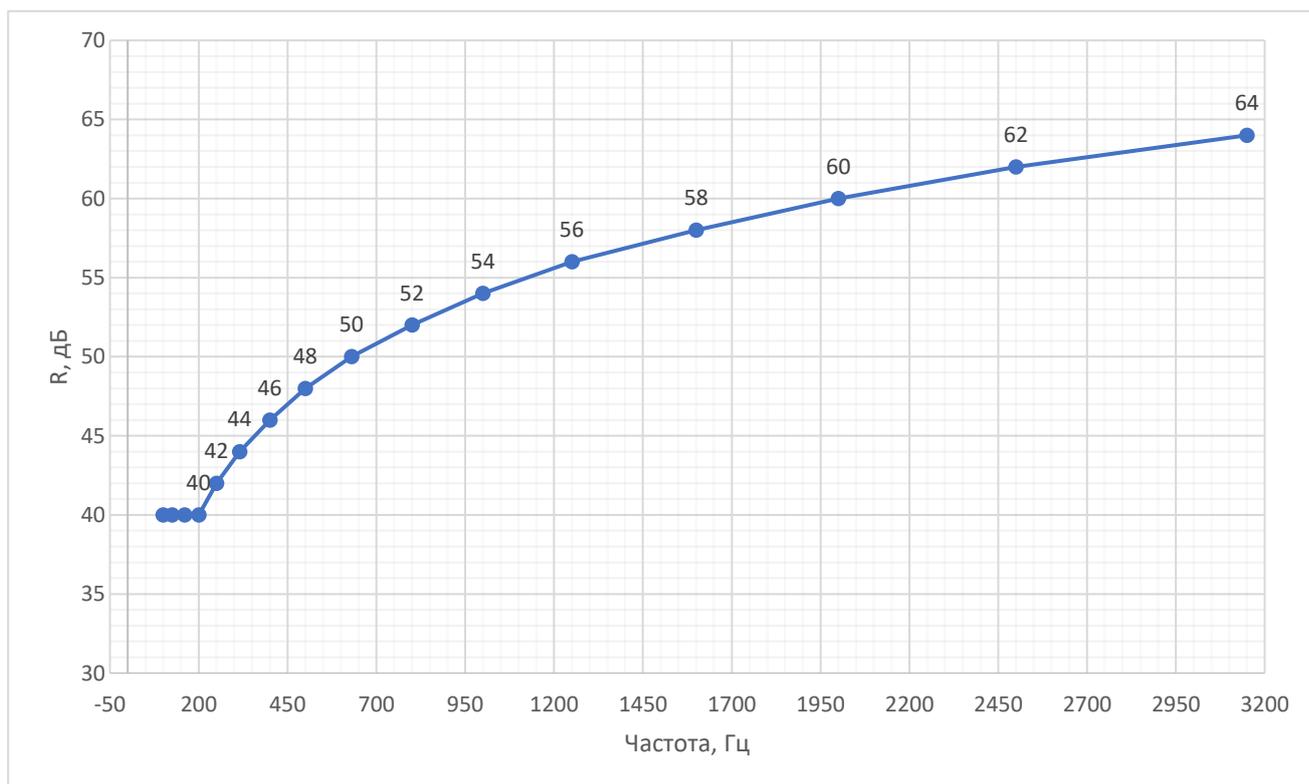


Рисунок 3.2. Расчетная частотная характеристика изоляции воздушного шума перегородки Вариант Б.

В нормируемом диапазоне частот изоляция воздушного шума исходной перегородкой составляет значения, представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Изоляция воздушного шума перегородки Вариант А

<b>f, Гц</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
R, дБ	40	40	40	40	42	44	46	48
<b>f, Гц</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>
R, дБ	50	52	54	56	58	60	62	64

Определим индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ , расчетная частотная характеристика которой приведена в Таблице 3.3. Расчет проводится по форме Таблицы 3.4. Вносим в таблицу значения R оценочной кривой и находим неблагоприятные отклонения расчетной частотной характеристики от оценочной кривой.

Таблица 3.4. Расчет неблагоприятных отклонений расчетной частотной характеристики от оценочной кривой.

№	Среднегеометрическая частота 1/3 - октавной полосы, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	40	40	40	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
2	33	36	39	42	45	48	51	<b>52</b>	53	54	55	56	56	56	56	56
3	-	-	-	2	3	4	5	<b>4</b>	3	2	1	-	-	-	-	-
4	34	37	40	43	46	49	52	<b>53</b>	54	55	56	57	57	57	57	57
5	-	-	-	3	4	5	6	<b>5</b>	4	3	2	-	-	-	-	-
6								<b>53</b>								

В таблице номера пунктов:

- 1- Расчетная частотная характеристика R, дБ
- 2- Оценочная кривая, дБ. Набор оценочных значений, используемых для сравнения с результатами измерений в третьоктавной полосе, приведен

в таблице 3. ГОСТ Р 56769-2015 «Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума»

- 3- Неблагоприятные отклонения, дБ
- 4- Оценочная кривая, смещенная вверх на 1, дБ
- 5- Неблагоприятные отклонения от смещенной оценочной кривой, дБ
- 6- Индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ , дБ

Если сумма неблагоприятных отклонений значительно меньше 32 дБ или неблагоприятные отклонения отсутствуют, оценочная кривая смещается вверх на целое число децибел так, чтобы сумма неблагоприятных отклонений от смещенной оценочной кривой максимальна приближалась к 32 дБ, но не превышала эту величину.

В данном случае сумма неблагоприятных отклонений 24 дБ ниже 32 дБ. Смещаем оценочную кривую вверх на 1 дБ и находим сумму неблагоприятных отклонений уже от смещенной оценочной кривой. На этот раз она составляет 32 дБ, что не более 32 дБ.

За величину индекса принимается ордината смещенной вверх оценочной кривой в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц. В данном случае  $R_w = 53$  дБ, что **СООТВЕТСТВУЕТ** требованиям СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и превышает значения, представленные в таблице 9.1.

### **3.2. Анализ геометрической акустики зала**

Теория геометрической акустики наиболее полно учитывает форму помещения. Разработанные на её основе методы главным образом используются для анализа распределения первых отражений от поверхностей помещения. В последнее время геометрическая акустика (метод мнимых

источников и метод прослеживания звуковых лучей) в сочетании с вычислительной техникой применяется также для расчета ряда акустических характеристик помещения.

В данном случае для оценки геометрии зала, с точки зрения распространения звуковых волн и комфортной акустической среды, воспользуемся методом расчета геометрической акустики, не прибегая к специальным программным обеспечениям. Так как программы достаточно дорогостоящи и трудоемки в использовании для таких не больших объектов как сельские дома культуры. Далее в п.3. будет выполнен расчет в COMSOL Multiphysics для получения и сравнения его с более упрощенным. Таким образом, будут выделены основные принципы проектирования залов, которые можно будет применять для других аналогичных объектов.

### **3.2.1. Реализованный вариант**

Схематичный план главного зала на 150 мест (рис.3.4.). Схематичный разрез (рис.3.3.).

На схеме изображено расположение сцены и посадочных мест для зрителей. Из расчета на минимальные габариты кресел.

Габариты и размещение кресел для зрителей согласно ГОСТ 16854-2016 «Кресла для зрительных залов. Общие технические условия» ГОСТ 16855-91 «Кресла для зрительных залов. Типы и основные размеры.»

Анализируя форму и габариты зала, можно сказать, что в ней нет отражающих форм потолка и стен, помогающих более рациональному распространению звука без звукоусиливающего оборудования.

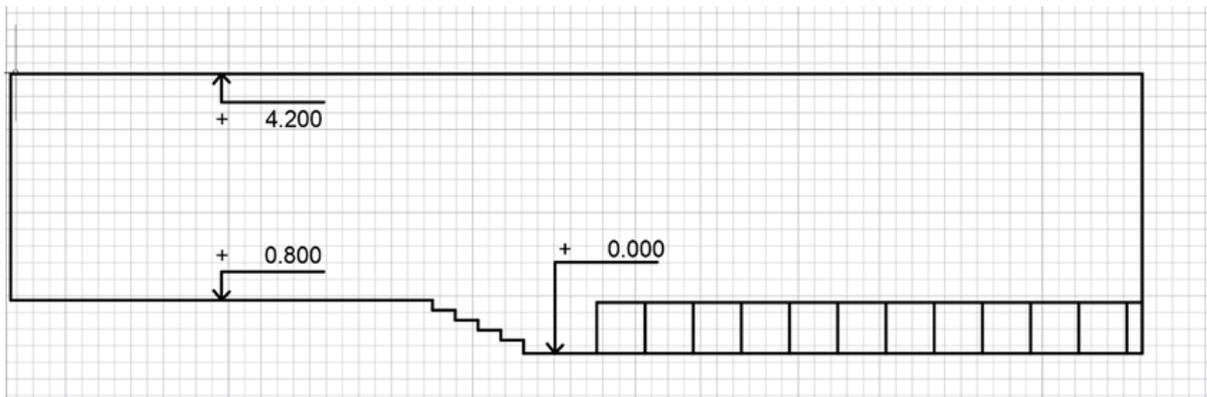


Рисунок 3.3. Схематичный разрез главного зала.

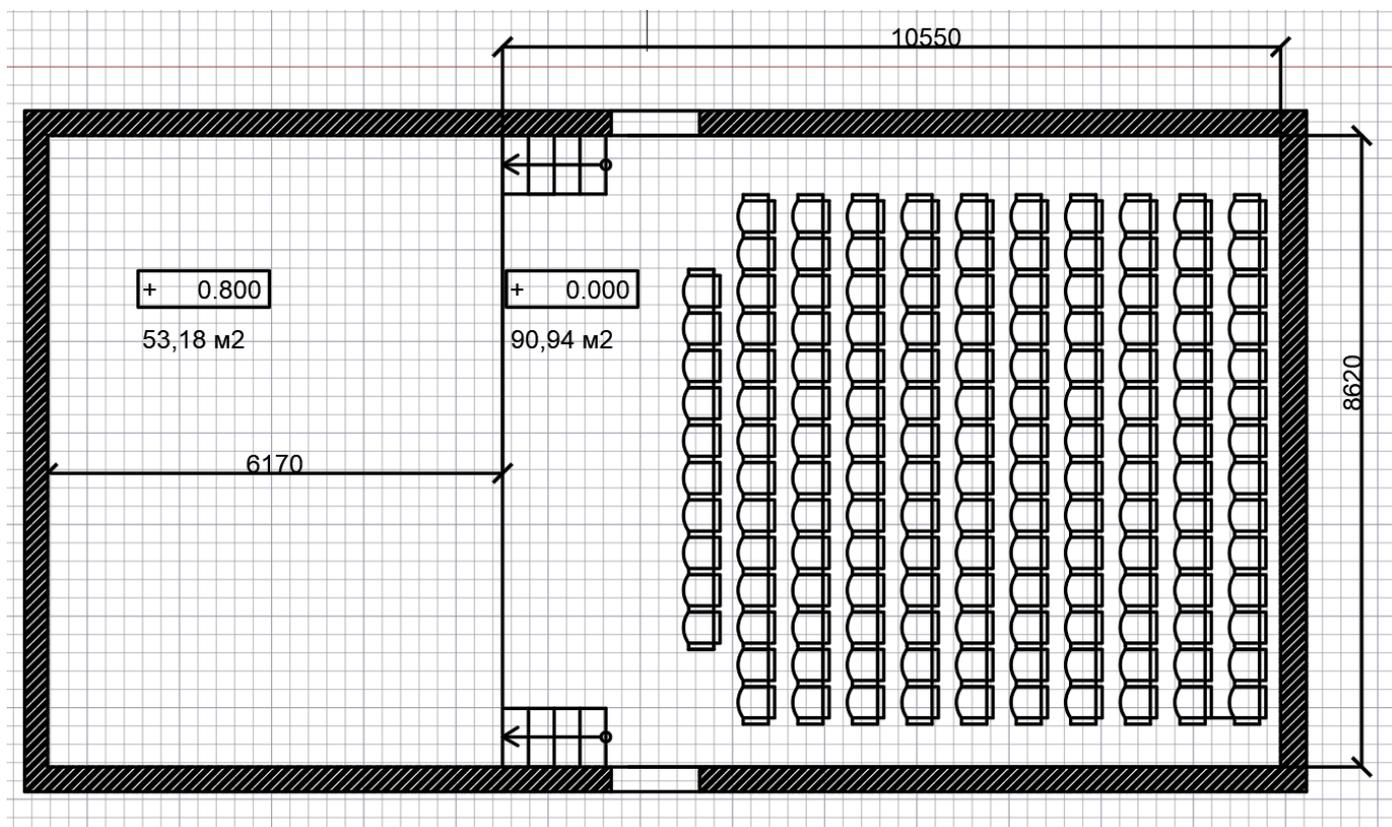


Рисунок 3.4. Схематичный план зрительного зала

Зрительные места не приподняты в плане, хотя конструктивная система здания позволяет это сделать, так как над ним не располагаются другие помещения. Более плоское размещение делает менее выгодным для зрителя зону осматриваемости сцены и снижает слышимость.

Зал не оборудован местами для маломобильных групп населения, что делает его не доступным для посещения всех категорий населения.

### 3.2.2. Разработанный альтернативный вариант проекта зрительного зала

Главная задача изменения формы помещения музыкального зала – эффективное геометрическое построение с целью повышения акустических свойств зала и рациональное размещение зрительных мест, с точки зрения ресурсосбережения и экономии пространства.

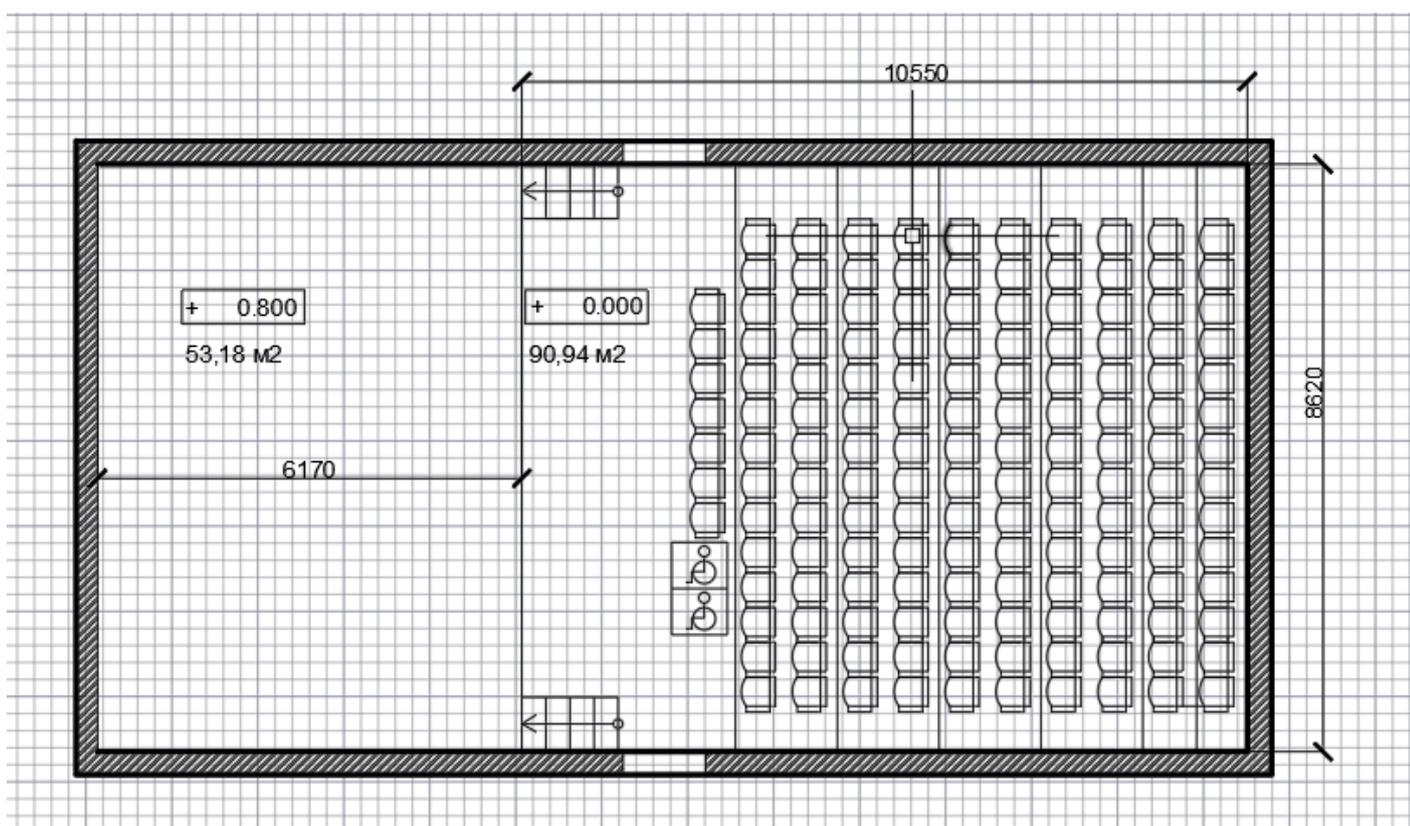


Рисунок 3.5. Представленный улучшенный схематичный вариант плана зрительного зала

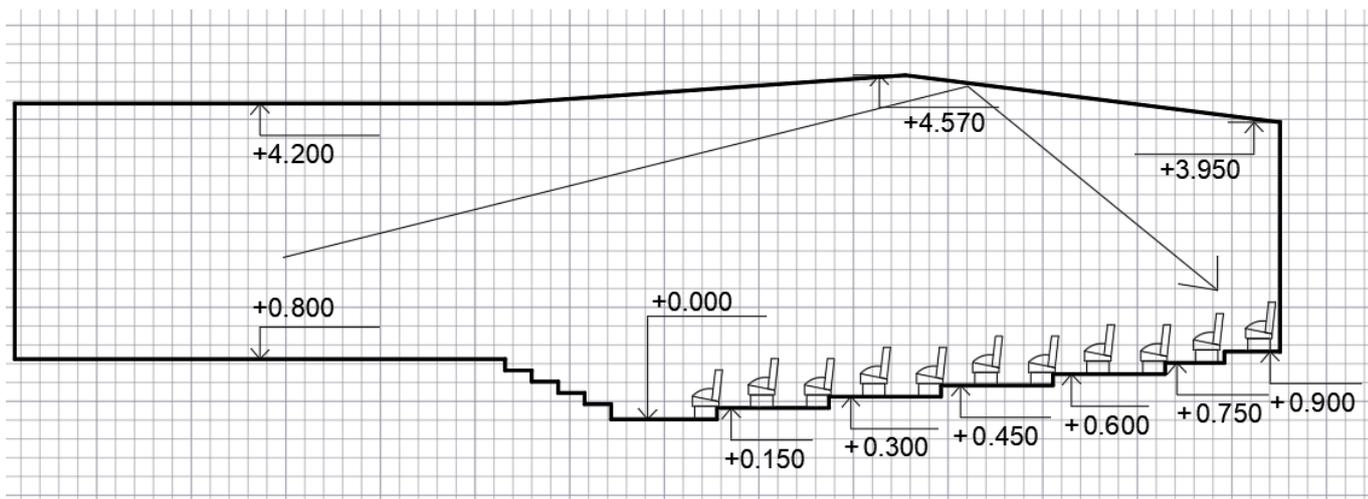


Рисунок 3.6. Представленный улучшенный схематичный вариант разреза зрительного зала

При разработке данного варианта зала, были применено следующее:

- Скос дальнего угла перекрытия потолка для более удачного отражения звуковой волны для повышения слышимости на дальних рядах зала.
- Ступенчатая приподнятость рядов для более удобного размещения мест с целью полной просматриваемости сцены.
- Добавлены зрительные места для МГН, доступ к которым выполнен беспрепятственно для передвижения.

### 3.3. Построение геометрической модели вариантов зала в программном комплексе COMSOL Multiphysics и расчет времени реверберации.

На данном этапе строится две геометрические модели зала, соответствующие п. 2.1. и п. 2.2.. Первый вариант зала - это реализованный проект дома культуры в п. Изыхские Копи, а второй разработанный предложенный альтернативный, в котором по упрощенной методике улучшена геометрическая форма зала.

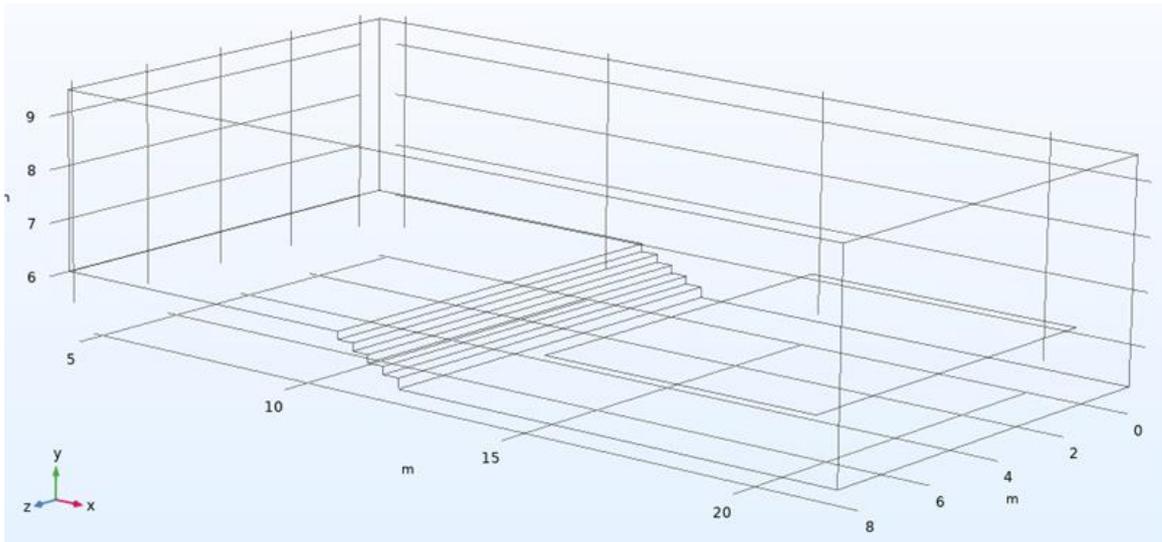
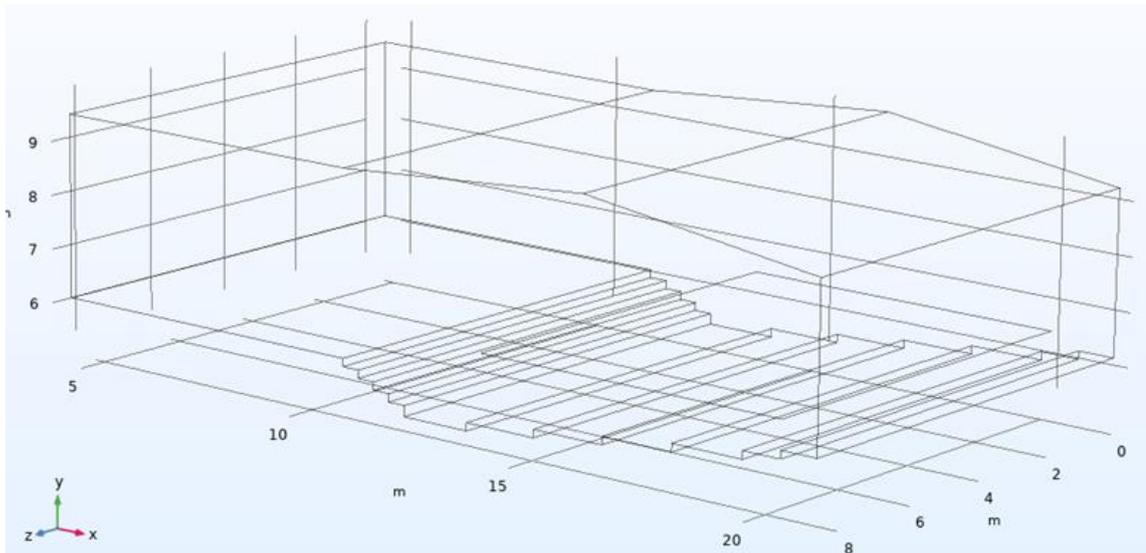


Рисунок 3.7. 3d-модель музыкального зала до реконструкции.

Далее производится геометрический расчет акустики залов в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Смотрим как изменение формы зала сказалось на качестве акустической среды. Обозначаем общие принципы, которыми можно руководствоваться, не прибегая к точному



компьютерному моделированию, упрощая процесс реконструкции малых музыкальных залов.

Рисунок 3.8. 3d-модель музыкального зала, предложенная версия.

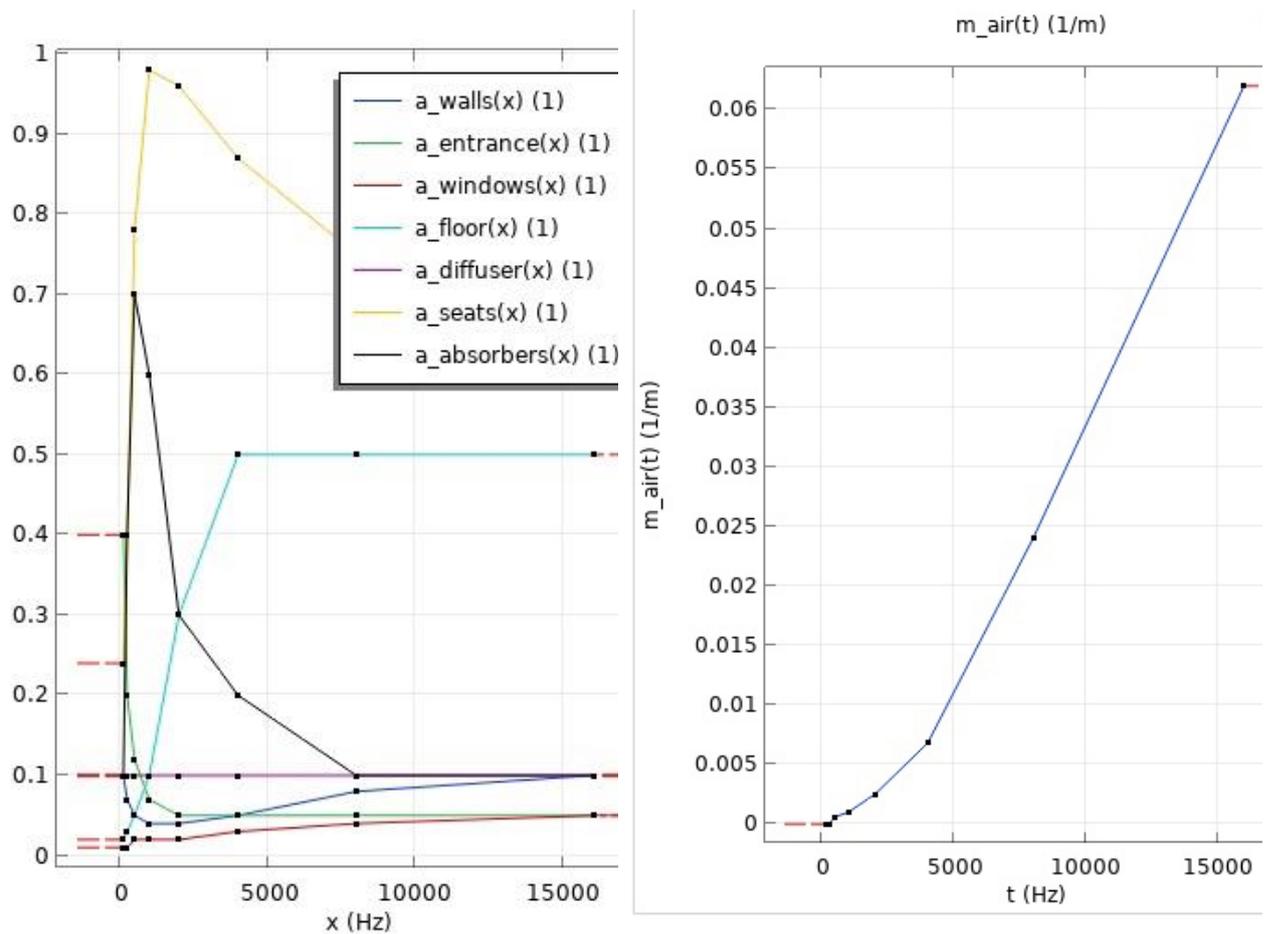


Рисунок 3.9. Представлены графики зависимости коэффициентов поглощения звука поверхностями зала и поглощения объемом воздуха.

Оптимальное время реверберации для зала такого назначения, объема и количества посетителей составило  $T=0,6$  с.

В первом варианте зала до модернизации (рис 3.7) время реверберации составило  $T=0,75$  с. Что превышает оптимальное значение на 25% - это не допустимо.

Во втором варианте зала (рис 3.8) время реверберации составило  $T=0,66$ %. Что удовлетворяет требованиям с допустимым превышением на 10%.

Таким образом, мы видим значительную разницу в качестве акустической среды помещения.

### **3.4. Экономическое сравнение однословной и двуслойной конструкции, с точки зрения звукоизоляционных характеристик**

В настоящее время существует огромное количество зданий с особым акустическим режимом, в которых излишний объем, не правильные габариты, формы потолка, пола играют плохую роль в общем акустическом комфорте помещений. Но также, главным фактором, влияющим на качество помещения-это материалы, используемые при строительстве, капитальном ремонте и отделке помещений.

Звукоизоляция между зрительным залом и прочими помещениями, зависит от расположения этих помещений и может быть различной.

Очевидно, что смежные помещения передают шумовое воздействие друг другу более явно, если бы, например они были рассредоточены. Поэтому стоит обратить внимание на функциональную схему здания, оценить и расположить максимально выгодно, с точки зрения шума, помещения, которые потребуют определенного внимания в решении вопроса звукоизоляции и акустики в плане применения типа звукоизоляционных материалов.

Звукоизоляция репетиционных залов и классов очень важна и должна быть хорошо продумана. Вместе с этим простая обшивка стен, звуко-, виброизоляция полов, перегородок, звукоизоляция потолков и полов может быть не достаточной. В совокупности важно не количество и толщина звукоизолирующего акустического материала, но и исполнение соединений, примыканий и исполнения узлов в местах сопряжения различных конструкций, подвергаемых процедуре увеличения звукоизоляции. Правильное решение узлов и контроль монтажа повышает качество звукоизоляции, уменьшает траты на применяемый акустический материал и не «съедает» полезную площадь помещения.

Таким образом, видно, что первым шагом является выбор акустических материалов, зависящий от типа их работы и требований по шумоизоляции и акустическим характеристикам.

Правильный и рациональный подбор материала в будущем поможет сэкономить на переобустройстве и дополнительной модернизации помещений с помощью других конструкций и устройств.

### **3.4.1. Экономический расчет**

В ходе расчета индекса звукоизоляции были предложены два варианта перегородок между основным музыкальным залом и гримерками, удовлетворяющих требования СП 51.13330.2011 «Защита от шума» для здания «Дома культуры»:

- Вариант А – перегородка из стеновых бетонных блоков КП-ПС-39-150-1500 (ГОСТ 6133-99) толщиной 90 мм со слоем штукатурки и облицовкой гипсокартоном 12,5 мм (ГОСТ 6266-97)
- Вариант Б – перегородка из тяжелого бетона 2400 кг/м<sup>3</sup> (ГОСТ 26633-2015) толщиной 160 мм.

Локальные сметные расчеты составлены в базисных ценах 2000 г., с учетом индексов пересчета на второй квартал 2020 года.

Локальный сметный расчет по варианту А представлен в приложении А. Сметная стоимость возведения перегородок из легкогобетонных камней с облицовкой гипсокартонными листами составила 146 735,77 руб., в том числе стоимость на оплату труда 25 436,85 руб.

По варианту Б локальный сметный расчет представлен в приложении Б.

Сметная стоимость возведения монолитных перегородок составила 228 419,34 руб., в том числе стоимость на оплату труда 20 726,84 руб.

Норма сметной прибыли принята согласно МДС 81-25.2001 «Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве». Приложение №3 «Рекомендуемые нормативы сметной прибыли по видам строительных и монтажных работ». Значения приведены в таблице 3.5.

Таблица.3.5. Рекомендуемые нормативы сметной прибыли

Виды строительных и монтажных работ	Нормативы сметной прибыли в % к фонду оплаты труда рабочих (строителей и механизаторов)
Конструкции из кирпича и блоков	80
Отделочные работы	55
Бетонные и железобетонные монолитные конструкции в строительстве: жилищно-гражданском	77

Норма накладных расходов принята согласно МДС 81-33.2004 «Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве». Приложение №4 «Нормативы накладных расходов по видам строительных и монтажных работ». Значения приведены в таблице 3.6.

Таблица.3.6. Нормативы накладных расходов.

Виды строительных и монтажных работ	Нормативы накладных расходов % к фонду оплаты труда рабочих (строителей и механизаторов)
Конструкции из кирпича и блоков	122
Отделочные работы	105
Бетонные и железобетонные, монолитные конструкции в строительстве: жилищно-гражданском	155

Резерв средств на непредвиденные работы и затраты (заказчика) - 2 % для объектов социальной сферы.

Средства на возведение и разборку титульных временных зданий и сооружений. Вид строительства: Школы, детские сады, ясли, магазины, административные здания, кинотеатры, театры, картинные галереи и другие здания гражданского строительства - 1,8%.

### **3.4.2. Выбор оптимального варианта**

Из расчетов следует, что более выгодным является вариант А - перегородка из стеновых бетонных блоков КП-ПС-39-150-1500 (ГОСТ 6133-99) толщиной 90 мм со слоем штукатурки и облицовкой гипсокартоном 12,5 мм (ГОСТ 6266-97).

Анализируя полученные значения стоимостей возведения перегородок, можно сделать вывод о эффективности применения многослойных конструкций, с точки зрения звукоизоляции и экономии средств.

Из экономических расчетов можно сделать вывод о том, что увеличение толщины конструкции не самый эффективный способ решения звукоизоляции, с точки зрения экономии. Так же минусом можно назвать уменьшение площади помещений, за счет увеличения объемов конструкции.

Были определены предпосылки повышения ресурсосбережения при выборе строительных акустических материалов и технологий строительства. Основными факторами в данном случае стали: объемно-планировочные решения, которые направлены на рассредоточение «тихих» и «громких» помещений; рациональный выбор материалов по принципу работы «на звук».

### **3.5. Комплексное рациональное решение вопросов звукоизоляции и акустического комфорта залов многоцелевого назначения при капитальном ремонте и реконструкции**

#### Методы улучшения звукоизоляции:

- Выбор звукоизоляционного материала должен исходить из его принципа работы на определенные виды шума и специфику применения.
- Применение преимущественно двухслойных и более конструкций перегородок, облицовок.
- Уход от жесткого каркаса в пользу подвесных потолков, плавающих полов, упругое закрепление стен.
- Допустимое уменьшение жесткости узла сопряжения перегородок с перекрытием и элементов перегородок друг с другом. Повышение звукоизоляции элементов возможно за счет уменьшения изгибной жесткости, что повышает звукопоглощение конструкции.
- Объемно-планировочное решение должно учитывать расположение помещений, требующих особые значения звукоизоляции. Рассредоточение «шумных» и «тихих»

#### Методы улучшения акустической среды зала:

- соблюдение необходимого относительного объема помещения на одного зрителя исходя из назначения зала;
- выбор рациональной формы поверхностей зала;
- выбор соответствующих звукопоглотителей и правильное расположение их на поверхности зала;
- обеспечение необходимой звукоизоляции зала, как от внешних, так и от внутренних шумов.

Таблица 3.7. Комплексное рациональное решения вопросов звукоизоляции и акустического комфорта залов

Этап	Действия
1	На этом этапе определяется: функциональная схема здания, количество посадочных мест в зале, рассчитывается объем и определяется специфика его использования, требования к акустическому и звуковому режиму.
2	Строится геометрическая модель распространения звуковых волн в помещении, определяется время реверберации, наиболее выгодные положения для установки отражателей звука. Определяется положение сцены и зрительных мест в плане по высоте.
3	Выполняется подбор материалов и конструкций по принципу «работы на звук». Предпочтение отдается многослойным конструкциям с уменьшением жесткости сопряжения узлов.

## **Вывод**

Был проведен анализ здания «Дома культуры» в п. Изыхские Копи в Алтайском районе Хакасии. Выявлены проблемы и недостатки реализованного проекта, предложен альтернативный.

В ходе работы был подобран экономически выгодный вариант перегородок, с точки зрения эффективной звукоизоляции помещения: перегородка из стеновых бетонных блоков КП-ПС-39-150-1500 (ГОСТ 6133-99) толщиной 90 мм со слоем штукатурки и облицовкой гипсокартоном 12,5 мм (ГОСТ 6266-97). Сделан вывод, о эффективности применения многослойных конструкций. Увеличение толщины конструкции не самый эффективный способ решения звукоизоляции, с точки ресурсосбережения. Так же минусом можно назвать уменьшение площади помещений, за счет увеличения объемов конструкции.

Так же было рассчитано время реверберации. Произведена технико-экономическая оценка примененных проектных решений, с помощью которых удалось повысить качество акустической среды.

## Заключение

В данной работе был проведен анализ планировочных решений, форм поверхностей и объемов музыкальных залов целевого назначения. Сделаны выводы о применении различных способов, повышающих уровень звукоизоляции. Рассмотрено влияние функциональной схемы здания на требуемые уровни шумовой изоляции смежных помещений.

Выявлена последовательность принципиальных решений при выборе материалов, с точки зрения работы «на звук» и специфику их применения.

Оценена экономическая эффективность применения однослойных и двухслойных конструкций перегородок. Составлены локальные сметы, результаты которых подтверждают целесообразность применения многослойных, с точки зрения экономии средств и избежания перерасхода материалов.

Предложены методики повышения звукоизоляции и акустической среды помещений. Была обозначена последовательность принципиальных решений при выборе материалов.

Итогом работы стала разработка комплексного метода, позволяющего рационально подойти к решению вопросов звукоизоляции и созданию акустического комфорта в зданиях с музыкальными залами при капитальном ремонте и реконструкции.

## Список источников

1. Архитектурная физика. Учебник для вузов. Коллектив авторов под ред. Оболенского Н. В. М., 2005/
2. Соловьев А.К. Физика среды. М., 2009
3. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. - 2-е изд.- М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
4. Стретт Дж. В. (лорд Рэлей), Теория звука, пер. с англ., 2 изд., М., 1955;
5. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. -М.: СИ, 1981.
6. Бабаян С., Иванов С., Янин И. Измерение акустических характеристик музыкальных залов. «Звукорежиссер» №6, 2003.
7. Физическая акустика. Том 2. Часть А. Свойства газов, жидкостей и растворов. - М.: Мир, 2006.
8. Гурбатов, Руденко редакторы. Акустика в задачах. 1996.
9. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.- Министерство Регионального развития РФ, 2011.
10. ГОСТ 27296-2012. Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций
- 11.
12. Рудник В.М. и др. Звукопоглощающие материалы и конструкции. Справочник. М.: Связь, 1970.
13. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учебное пособие для студентов вузов/ Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылева. - М: ООО «Издательство Астрель».
14. Проектирование акустики зрительных залов. Учебно-методические указания. Коллектив авторов под ред. Климухин А.А. М., 2012.
15. Климухин А.А., Киселева Е.Г. Проектирование акустики зрительных залов: учебно-методические указания к курсовой расчетно-графической работе / А.А. Климухин, Е.Г. Киселева. — М.: МАРХИ, 2012.
16. Гельфонд А.Л. Архитектурное проектирование общественных зданий:

- учебник / А.Л. Гельфонд. - М.: ИНФРА-М, 2016.
17. Удлер Е.М. Проектирование акустики зрительных залов: методические указания (дополненные и переработанные) к выполнению расчетно-графических и курсовых работ по курсу «Архитектурная акустика» для студентов специальностей 270114.65 «Проектирование зданий», 070603.65 «Искусство интерьера» / Е.М. Удлер. – Казань: КазГАСУ, 2013.
  18. СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».
  19. Канев Н.Г. Затухание звука в прямоугольном помещении с импедансными стенками // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5.
  20. Городские многоцелевые залы (Обзор) / Ю.П. Гнедовский, И.Д. Рябышева. – М., ЦНТИ по гражд. строительству и архитектуре.
  21. Кнудсен Верн О., Архитектурная акустика., пер. с англ.: изд.5: 2010/
  22. Соловьев А.К. Физика среды. М., 2009/
  23. Сергейчук О.В. учебное издание «Строительная физика. Акустика». Темплан 1992.
  24. Боев Н.В., Сумбатян М.А. Коротковолновая дифракция на телах, ограниченных произвольной гладкой поверхностью // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 5
  25. Иофе, В. К. Электроакустика / В.К. Иофе. - М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 2016.
  26. Рекомендации по проектированию концертных залов.: Москомархитектура:, 2004.
  27. ГОСТ Р 56769-2015 (ИСО 717-1:2013) Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума.
  28. Блацерна, П. Теория звука в приложении к музыке / П. Блацерна. - М.: Либроком, 2015.
  29. Канев Н.Г. Об аномальном времени реверберации некоторых помещений // Материалы Международной акуст. конф, посвященной

- 100-летию со 110 АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 62 № 1 2016 КАНЕВ  
дня рождения Е.Я. Юдина. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
30. Першина И.Л. Систематизация концепций философии архитектурной  
формы // Вестник Белгородского государственного технологического  
университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4/
31. Генерация хаоса / А.С. Дмитриев и др. - М.: Техносфера, 2012.
32. Parcodellamusicauditoria. [Электронный ресурс] –Режим доступа  
[http://www.projectclassica.ru/v\\_o/09\\_2003/09\\_2003\\_v\\_01a.htm#top](http://www.projectclassica.ru/v_o/09_2003/09_2003_v_01a.htm#top)
33. Анерт В., Файстель С., Шмитц О. Современные инструменты  
акустического проектирования концертных залов и театров –  
возможности применения и пределы возможностей компьютерного  
моделирования и компьютерной аурализации. В сб.: Труды 13\_й сессии  
РАО. Т. 5. М.: ГЕОС, 2003.
34. Звук. Восемь лекций, читанных в королевском институте  
Великобритании Джоном Тиндалем. - М.: Типография В. Демакова,  
2010.
35. ГОСТ Р 56770-2015 (ИСО 717-2:2013) Здания и сооружения. Оценка  
звукоизоляции ударного шума.
36. ГОСТ Р ИСО 10140-4-2012 Акустика. Лабораторные измерения  
звукоизоляции элементов зданий. Часть 4. Методы и условия измерений
37. ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 Акустика. Лабораторные измерения  
звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции  
воздушного шума.
38. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 4. Кинетика.  
Теплота. Звук / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. - М.: Едиториал УРСС,  
Либроком, 2015.
39. Кок, У. Видимый звук: моногр. / У. Кок. - М.: Мир, 2006.
40. Смирнова Е.В., Васютина Д.И. Результаты сравнительного анализа  
акустических свойств строительных материалов // Вестник БГТУ им.  
В.Г. Шухова, 2013. №1.

41. Дидковський В.С., Луньова С.А., Богданов О.В. Архитектурная акустика. – Киев: НТУУ «КПІ», 2012.
42. Шишелова Т.И., Шепотько Н.А. СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 8.

# Приложение А.

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № 01  
(локальная смета)

на

Перегородки

(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание: чертежи

№

	Сметная стоимость	146 735,77	тыс. руб.
	Средства на оплату труда	25 436,85	тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2020 г.

№ п.п.	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы			Общая стоимость			Затраты труда рабочих, чел.-ч., не занятых обслуживанием машин		
				всего	эксплуатация машин	материал	Всего	оплаты труда	эксплуатация машин	на единицу	всего	
					оплаты труда							в т.ч. оплаты труда
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Перегородки												
1	ФЕР08-03-002-01	Кладка стен из легкобетонных камней без облицовки при высоте этажа до 4 м	6,00	77,46	38,02	1,16	464,76	229,68	228,12	6,96	4,43	26,58
		м3		38,28	5,94				35,64			
2	ФССЦ 04.3.01.12.0003	Раствор кладочный, цементно-известковый, М50 объем = 0,11*6	0,66			519,80				343,07		
3	ФССЦ-05.2.03.01.0001	Камни бетонные стеновые из легкого бетона, пустотелые Объем = 0,92*6	5,52			509,00				2 809,68		
4	ФЕР15-02-015-01	Штукатурка поверхностей внутри здания известковым раствором простоя по камню и бетону стен	1,00	1 379,95	65,21	810,45	1 379,95	504,29	65,21	810,45	55,60	55,60
		100 м2		504,29	39,64				39,64			
5	ФЕР10-05-009-02	Облицовка стен по одинарному металлическому каркасу из направляющих и стоечных профилей гипсокартонными листами в один слой: с дверным проемом	0,50	4 296,02	40,92	3 647,41	2 148,01	303,85	20,46	1 823,71	67,00	33,50
		100 м2		607,69	5,02				2,51			
	ФССЦ-01.6.01.02.0006	Листы гипсокартонные ГКЛ, толщина 12,5 мм, Объем= 112*0,5	56,00			15,00				840,00		
		Прямые затраты по разделу в базисных ценах				руб.	7 985,47					
		стоимость материалов, изделий и конструкций				руб.	6 633,86					
		стоимость ЭММ				руб.	313,79					
		всего оплата труда				руб.	1 037,82					
		всего трудоёмкость				чел-ч	115,68					
		Накладные расходы:				руб.	1 216,49					
		Конструкции из кирпича и блоков 122% от 265,68				руб.	323,69					
		Отделочные работы 105% от 850,36				руб.	892,80					
		Сметная прибыль				руб.	679,91					
		Конструкции из кирпича и блоков 80% от 265,68				руб.	212,26					
		Отделочные работы 55% от 850,36				руб.	467,66					
		ВСЕГО				руб.	9 881,87					
		Сметная трудоёмкость:				чел-ч						115,68
		Средства на оплату труда				руб.		1 037,82				
		Итого прямые затраты по смете с учётом индексов пересчёта в том числе с учётом индексов пересчёта ФЕР2020										
		Прямые затраты по смете				руб.	71 281,62					
		стоимость материалов, изделий и конструкций	6,38			руб.	42 324,05					
		стоимость ЭММ	11,22			руб.	3 520,72					
		всего оплата труда	24,51			руб.	25 436,85					
		всего трудоёмкость				чел-ч						115,68
		Накладные расходы	24,51			руб.	29 816,16					
		Сметная прибыль	24,51			руб.	16 664,66					
		ВСЕГО по смете				руб.	117 762,44					
		Сметная трудоёмкость:				чел-ч						115,68
		Средства на оплату труда				руб.		25 436,85				
120	ГСН 81-05-01-2001, Приложение 1 п.4.2.	Средства на возведение и разборку титульных временных зданий и сооружений Вид строительства: Школы, детские сады, ясли, магазины, административные здания, кинотеатры, театры, картинные галереи и другие здания гражданского строительства - 1,8%					2 119,72 Р					
		Итого					119 882,16 Р					
122	МДС 81-35.2004 П4.96	Резерв средств на непредвиденные работы и затраты (заказчика) - 2 % для объектов социальной сферы					2 397,64 Р					
123		Всего					122 279,81 Р					
124		Налог на добавленную стоимость (НДС) - 20 %					24 455,96 Р					
125		Всего с налогом на добавленную стоимость					146 735,77 Р					

## Приложение Б.

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № 02  
(локальная смета)

на

Перегородки  
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание: чертежи

№

	Сметная стоимость	228 419,34	тыс. руб.
	Средства на оплату труда	20 726,84	тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2020 г.

№ п.п.	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы			Общая стоимость				Затраты труда рабочих, чел.-ч., не занятых обслуживанием машин		
				всего	эксплуатация машин	материал	Всего	оплаты труда	эксплуатация машин	материал	на единицу	всего	
													оплаты труда
Перегородки													
1	ФЕР06-12-006-02	Устройство прямоугольных стен и перегородок сооружений в горизонтально-скользящей опалубке при толщине стен: более 150 мм  100 м3	0,08	37 216,38 4 266,98	21 386,77 2 786,38	11 562,63	2 977,31	341,36	1 710,94 222,91	925,01	481,60	38,53	
2	ФССЦ 01.7.16.04-0011	Опалубка для перекрытий (амортизация) крупнощитовая разборно-переставная из стальных балок, с палубой из ламинированной фанеры толщиной 18 мм  м2	100,00			2,30				230,00			
3	ФССЦ-08.4.03.03-0006	Горячекатанная арматурная сталь класса А500 С, диаметром:  Объем = 14,05*0,08  т	1,12			5 488,69				6 169,29			
4	ФССЦ-04.1.02.05-0009	Смеси бетонные тяжелого бетона (БСТ), класс В25 (М350)  Объем = 101,5*0,08  м3	8,12			725,69				5 892,60			
5	ФЕР15-02-015-01	Штукатурка поверхностей внутри здания известковым раствором простая по камню и бетону стен  100 м2	1,00	1 379,95 504,29	65,21 39,64	810,45	1 379,95	504,29	65,21 39,64	810,45	55,60	55,60	
		Прямые затраты по разделу в базисных ценах					руб.			16 649,15			
		стоимость материалов, изделий и конструкций					руб.			14 027,35			
		стоимость ЭММ					руб.			1 776,15			
		всего оплата труда					руб.			845,65			
		всего трудоёмкость					чел-ч			94,13			
		Накладные расходы:					руб.			1 435,57			
		Бетонные и железобетонные монолитные конструкции в жилищно-гражданском строительстве 105% от 564,27					руб.			592,48			
		Отделочные работы 155% от 543,93					руб.			843,09			
		Сметная прибыль					руб.			733,65			
		Бетонные и железобетонные монолитные конструкции в жилищно-гражданском строительстве 77% от 564,27					руб.			434,49			
		Отделочные работы 55% от 543,93					руб.			299,16			
		ВСЕГО					руб.			18 818,37			
		Сметная трудоёмкость:					чел-ч					94,13	
		Средства на оплату труда:					руб.		845,65				
		Итого прямые затраты по смете с учётом индексов пересчёта в том числе с учётом индексов пересчёта ФЕР2020											
		Прямые затраты по смете					руб.			130 149,76			
		стоимость материалов, изделий и конструкций	6,38				руб.			89 494,50			
		стоимость ЭММ	11,22				руб.			19 928,42			
		всего оплата труда	24,51				руб.			20 726,84			
		всего трудоёмкость					чел-ч					94,13	
		Накладные расходы	24,51				руб.			35 185,91			
		Сметная прибыль	24,51				руб.			17 981,72			
		ВСЕГО по смете					руб.			183 317,40			
		Сметная трудоёмкость:					чел-ч					94,13	
		Средства на оплату труда:					руб.		20 726,84				
120	ГСН 81-05-01-2001, Приложение 1 п.4.2.	Средства на возведение и разборку титульных временных зданий и сооружений Вид строительства: Школы, детские сады, ясли, магазины, административные здания, кинотеатры, театры, картинные галереи и другие здания гражданского строительства - 1,8%								3 299,71			
		Итого								186 617,11			
122	МДС 81-35.2004 П4.96	Резерв средств на непредвиденные работы и затраты (заказчика) - 2 % для объектов социальной сферы								3 732,34			
123		Всего								190 349,45			
124		Налог на добавленную стоимость (НДС) - 20 %								38 069,89			
125		Всего с налогом на добавленную стоимость								228 419,34			

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно – строительный институт  
институт  
Проектирование зданий и экспертиза недвижимости  
кафедра

Утверждаю

Заведующий кафедрой

 Р.А.Назирова  
подпись инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Реконструкция музыкальных залов целевого назначения.

тема

Строительство

08.04.01

Код наименования направления

08.04.01.04 Проектирование зданий. Энерго-и ресурсосбережение

Код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

 11.06.2021 г. д.с.с. - к.т.н.  
подпись, дата должность, ученая степень

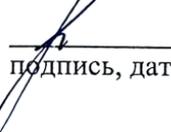
Е.М.Сергуничева  
инициалы, фамилия

Выпускник

 11.06.21  
подпись, дата

В.И.Моисеева  
инициалы, фамилия

Рецензент

 \_\_\_\_\_  
подпись, дата доцент, к.т.н.  
должность, ученая степень

Е.Г.Плюснова  
инициалы, фамилия

Красноярск 2021