

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»

на правах рукописи

ИВАНОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ВИБРОПОГЛОЩЕНИЕМ
ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ДВОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
член-корреспондент РААСН
Шубин Игорь Любимович

Москва
2023

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1. Конструктивные решения двойных звукоизолирующих ограждений.	11
1.2. Анализ теоретических и экспериментальных исследований двойных зву- коизолирующих конструкций.....	15
Выводы по главе 1 и определение основных направлений исследований	28
ГЛАВА 2. ПРОХОЖДЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА В ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	30
2.1. Определение звукового давления в воздушном зазоре, образованном двойным ограждением из слоистых элементов	30
2.2. Влияние собственных колебаний и инерционного прохождения звука на излучение слоистого элемента в составе двойных ограждений	36
2.3. Учет потерь звуковой энергии при прохождении звука через элементы слоистых ограждений	39
2.4. Влияние воздушного зазора на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением.....	50
2.5. Определение граничных частот расчетных областей	54
Выводы по главе 2.....	58
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	60
3.1. Методика проведения экспериментальных исследований звукоизоляции двойных ограждающих конструкций в больших реверберационных по- мещениях	60

3.2. Методика определения коэффициента потерь и динамического модуля упругости вибропоглощающих материалов и конструкций, используемых при экспериментальных исследованиях	63
3.3. Программа исследования факторов, влияющих на звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов	67
3.4. Экспериментальные исследования звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов	70
3.4.1. Влияние вида крепления слоистых элементов в ограждении на звукоизоляцию двойного ограждения	71
3.4.2. Влияние плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов.....	74
3.4.3. Влияние расстояния между слоистыми элементами на звукоизоляцию двойного ограждения	77
3.4.4. Влияние площади звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов.....	82
3.4.5. Влияние характеристик вибропоглощающей мастики слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения	85
3.4.6. Влияние поверхностной плотности слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения.....	87
Выводы по главе 3.....	92
ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВИБРОПОГЛОЩЕНИЕМ.....	95
4.1. Метод расчета звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением.....	95
4.1.1. Алгоритм расчета звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением.....	96
4.1.2. Расчет звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением	98

4.1.3. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением.....	101
4.2. Рекомендуемые конструктивные решения двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов для применения в гражданских зданиях	104
4.3. Практическое применение двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением.....	111
Выводы по главе 4.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Внедрение результатов исследований	139
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Патенты и свидетельство	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Свидетельства о поверке шумомера и калибратора	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Создание акустического комфорта в помещениях жилых и общественных зданий является одной из важнейших задач в области строительства. При ее решении во многих случаях необходимо обеспечивать изоляцию шума, проникающего в помещения через ограждающие конструкции. Одним из основных способов снижения проникающего шума является устройство звукоизолирующих конструкций. С целью экономии средств на их устройство конструкции должны иметь относительно небольшую массу и толщину, обеспечивая тем самым минимальный расход материалов. По этой причине в практике строительства в качестве звукоизолирующих конструкций широко применяются каркасно-обшивные перегородки. Практика применения таких перегородок показывает возможность повышения их звукоизолирующих свойств за счёт использования в них слоистых элементов и повышения поглощения звука во внутреннем пространстве перегородок. В этом случае, путём регулирования конструктивных параметров перегородок и целенаправленного изменения физико-механических характеристик их материалов, возможно, получать конструкции с более высокой звукоизолирующей способностью. Таким образом, разработка методики проектирования акустически эффективных двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов, путём регулирования их параметров и оценки влияния изменений этих параметров на звукоизолирующую способность является актуальной научно-практической задачей в области строительства.

Степень разработанности темы исследований. В настоящее время выполнены теоретические и экспериментальные исследования слоистых элементов с вибропоглощением, как отдельных ограждений, так и в составе легких конструкций. Авиловой Г.М., Наумкиной Н.И., Юлиным В.И. были исследованы слоистые конструкции из тонких металлических листов, склеенных вибропоглощающей мастикой. Исследования слоистых элементов с вибропоглощением, устроенных из различных строительных материалов были так же выполнены А.А. Кочкиным и Л.Э. Шашковой. Анализ выполненных исследований показал, что были рас-

смотрены не все возможные конструктивные приёмы и способы повышения звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением и звукопоглощающими материалами внутри ограждений. В связи с этим необходимо более широкое проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований влияния слоистых элементов и звукопоглощающих материалов на процессы прохождения звуковой энергии через двойные ограждения и, соответственно, на величину их звукоизоляции.

Целью диссертационной работы является разработка на основе теоретических и экспериментальных исследований методики регулирования параметров двойных звукоизолирующих ограждений из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой с пустым воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом.

Основные задачи работы. Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо было решить следующие задачи:

- разработать акустически эффективные двойные звукоизолирующие конструкции из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом;
- на основе теории самосогласования звуковых полей помещений и вибрационных полей исследовать прохождение и излучение звука двойными ограждающими конструкциями из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом;
- разработать метод расчета звукоизоляции, позволяющий на стадии проектирования оценить влияние различных параметров двойных ограждений из слоистых элементов на их акустическую эффективность;
- исследовать экспериментально влияние конструктивных и физико-механических параметров слоистых элементов на звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций;
- разработать рекомендации по применению двойных ограждений из сло-

стых элементов с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом с учетом обеспечения нормативных требований изоляции воздушного шума в гражданских зданиях различного назначения.

Научную новизну работы составляют:

- результаты теоретических исследований прохождения и излучения звука двойными ограждениями из слоистых элементов;
- результаты экспериментальных исследований влияния конструктивных и физико-механических параметров на звукоизоляцию двойных ограждений из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом;
- научно и экспериментально обоснованная методика разработки новых конструктивных решений двойных ограждений из слоистых элементов, имеющих более высокую акустическую эффективность за счет регулирования их параметров без увеличения поверхностной плотности и толщины ограждения;
- метод расчета звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов;
- теоретически и экспериментально обоснованные рекомендации по применению двойных звукоизолирующих ограждений из слоистых элементов в гражданских зданиях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложенная теоретически и экспериментально обоснованная методология проектирования повышения звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов позволяет оценить влияние различных физико-механических, конструктивных и геометрических параметров ограждения на их звукоизоляцию. Это дает возможность более целенаправленно проектировать эффективные звукоизолирующие конструкции;

- разработанные новые рациональные конструктивные решения двойных ограждений из слоистых элементов позволяют за счет повышения их звукоизоляции увеличить область их применения в жилых и общественных зданиях.

Научная методология решения задач и методы исследования.

В работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования прохождения звуковой энергии через двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов с вибропоглощением. Теоретические исследования выполнены на основе теории М.С. Седова о самосогласовании звуковых полей и вибрационных полей ограждений применительно к слоистым элементам с вибропоглощением. Экспериментальные исследования выполнены в больших реверберационных помещениях Вологодского государственного университета с применением прецизионной акустической аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер».

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические исследования прохождения звука через двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов с учетом физико-механических, конструктивных и геометрических параметров ограждения;
- результаты экспериментальных исследований двойных ограждений из слоистых элементов, выполненных с целью оценки влияния конструктивных и физико-механических параметров на звукоизоляцию ограждений;
- метод расчета звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов, учитывающий физико-механические характеристики материалов, конструктивные и геометрические параметры ограждения;
- рекомендации по применению двойных ограждений из слоистых элементов с учетом обеспечения нормативных требований изоляции воздушного шума в гражданских зданиях различного назначения.

Степень достоверности результатов. Теоретические исследования двойных ограждений из слоистых элементов выполнены на основе теории самосогласования волновых полей М.С. Седова, широко используемой при расчете и проектировании легких звукоизолирующих конструкций.

Допущения, использованные при теоретических исследованиях и разработке метода расчета, общеприняты в работах как российских, так и зарубежных авторов. Достоверность результатов подтверждается сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных. Расчетные значения звукоизоляции исследованных двойных ограждений получены путем компьютерной реализации разработанного в диссертации метода расчета.

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались на: международных научных конференциях – VII–X, XIII, XIV Академические чтения, посвященные памяти академика Г.Л. Осипова, «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность» (Москва, 2016–2019, 2022, 2023 гг.), Всероссийских научных конференциях – XIV–XVI «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2016–2018 гг.), Всероссийских научно-технических конференциях – «Актуальные вопросы развития строительной отрасли, экологической и промышленной безопасности» (Вологда, 2020, 2022 гг.), 4–7 международных научно-практических конференциях «Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт» (Тамбов, 2017–2020 гг.).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения: п. 8 «Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности»; п. 9 «Разработка и развитие теоретических основ и методов расчёта ограждающих конструкций зданий и сооружений с учётом природно-климатических, теплофизических, светотехнических, акустических и иных условий».

Реализация результатов работы. Исследования проводились совместно с Научно-исследовательским институтом строительной физики РААСН при выполнении госбюджетной НИР по направлению 7 «Развитие теоретических основ строительных наук», раздел 7.3 «Строительная физика и энергоэффективные ин-

женерные системы. Обеспечение безопасной и комфортной среды проживания населения», подраздел 7.3.4 «Создание комфортной звуковой среды в зданиях с использованием слоистых элементов с вибропоглощением». Запатентованные двойные ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением используются в качестве перегородок в помещениях жилых и общественных зданий. По разработанному алгоритму расчета выполнено проектирование конструктивных решений двойных ограждений с целью соблюдения нормативных значений звукоизоляции внутриквартирных перегородок в жилых домах и перегородок в смежных помещениях офисов различных фирм города Вологды. Программа для реализации расчета внедрена в практику проектирования в ООО «ВЦКПиО». Полученные результаты применяются в ВоГУ при обучении магистров, специалистов и бакалавров по направлению «Строительство».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из которых 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 1 статья в журнале, входящем в международную базу данных «Scopus», зарегистрировано 3 патента в федеральной службе по интеллектуальной собственности и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 136 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации – 154 страницы. Основной текст, включая рисунки и таблицы, изложен на 118 страницах, объем приложений – 16 страниц.

ГЛАВА 1. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Известно, что акустический режим в гражданских зданиях формируется как в системе акустически связанных между собой помещениях [17, 26, 56]. В этом случае распространение звуковой энергии в системе зависит от звукоизолирующих качеств разделяющих помещения ограждения. Поэтому разработка конструктивных решений ограждений, обеспечивающих высокую звукоизолирующую способность, ограждений при минимуме затрат на их устройство, во многом определяется точностью расчетов звукоизоляции ограждений, позволяющих выполнить анализ влияния различных параметров конструкций на их звукоизолирующие свойства.

В данной главе выполнен анализ методов оценки звукоизолирующих качеств лёгких ограждающих конструкций, выполняемых в виде двойных ограждений. Показано состояние теоретических и экспериментальных исследований по возможному увеличению звукоизоляции многослойных конструкций. В результате проведенного анализа определены основные направления исследований, выполненных в работе.

1.1. Конструктивные решения двойных звукоизолирующих ограждений.

В практике строительства в качестве внутренних перегородок в основном применяют однослойные ограждающие конструкции, повышение звукоизоляции которых обеспечивается увеличением их поверхностной плотности. Это приводит к росту нагрузки в здании и к дополнительному расходу материала. По этой причине в последние годы широкое распространение начинают находить легкие звукоизолирующие ограждающих конструкции, и в частности каркасно-обшивные

перегородки из гипсокартонных (ГКЛ) и гипсоволокнистых листов (ГВЛ). Перегородки, имея небольшую поверхностную плотность, существенно уменьшают нагрузку на несущие конструкции здания. Такие конструкции возводятся в короткие сроки и, соответственно, снижаются затраты на строительство. Для соблюдения нормативных требований по звукоизоляции в перегородках этого вида увеличивают количество слоев листовых обшивок и заполняют внутреннее пространство звукопоглощающим материалом. Это существенно повышает толщину и поверхностную плотность ограждения. Схемы подобных типовых решений представлены на рисунке 1.1.

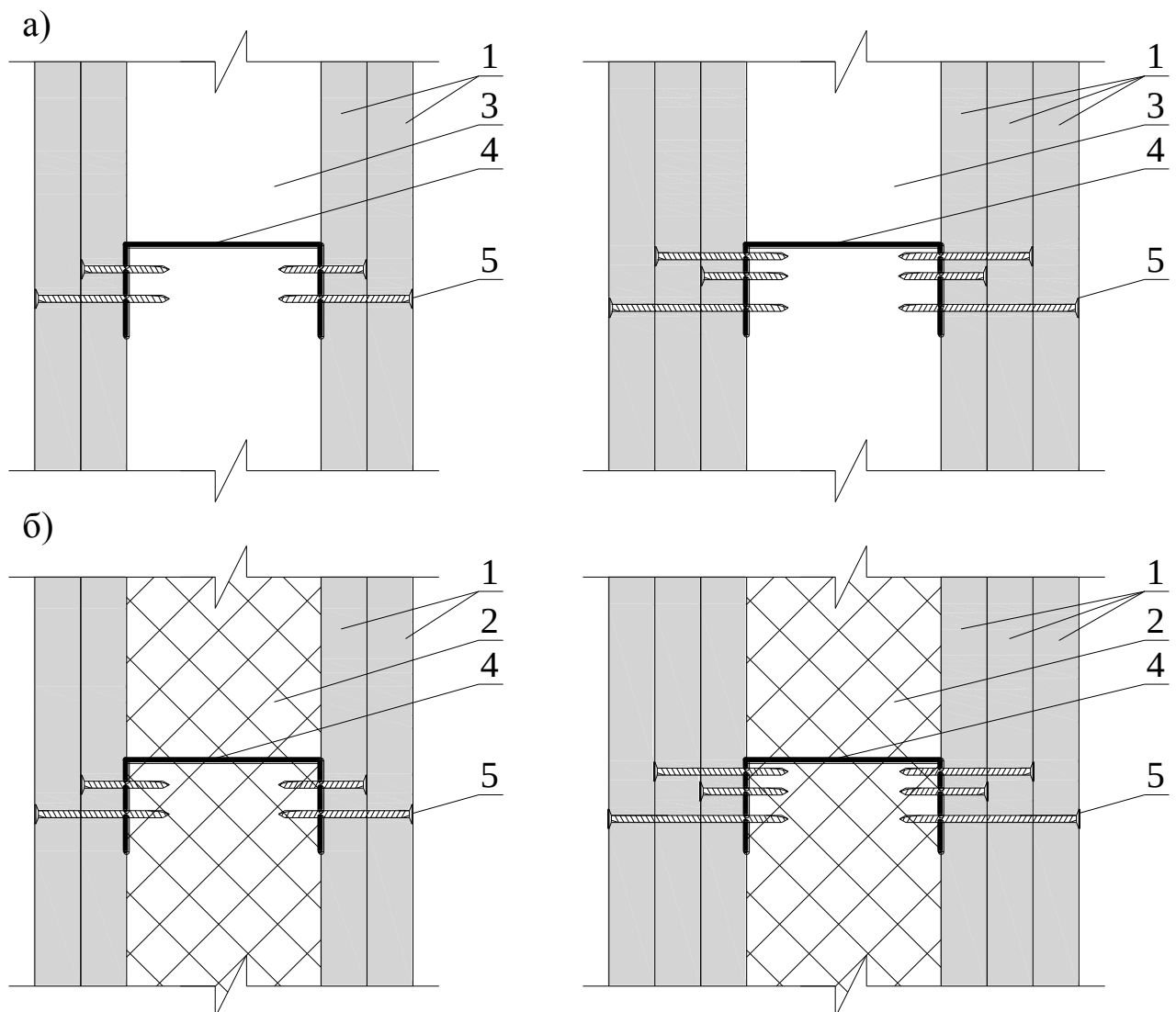


Рисунок 1.1 – Каркасно-обшивные перегородки: а – с воздушным зазором; б – с заполнение зазора звукопоглощающим материалом; 1 – обшивочные листы (ГКЛ, ГВЛ); 2 – звукопоглощающий материал; 3 – воздушный зазор; 4 – направляющий профиль каркаса; 5 – саморез

Анализ предложенных на данный момент легких ограждений и выполненная в работах [1, 32, 45, 46, 52, 53] оценка их акустической эффективности показывают возможность повышения их звукоизолирующих качеств за счёт совершенствования конструктивных решений, и в частности, путём использования в конструкциях лёгких двойных ограждений слоистых элементов с вибропоглощением, а так же путём более эффективного применения звукопоглощающего материала, располагаемого внутри двойной конструкции.

Акустическая эффективность таких конструкций возрастает за счёт внутренних потерь в слоистых элементах с вибропоглощением и за счёт повышения поглощения звука во внутреннем пространстве ограждения.

В настоящее время в ВоГУ разработаны двойные ограждения из легких слоистых элементов с вибропоглощением [36, 43, 44]. Слоистые элементы состоят из двух и более тонких листов, склеенных между собой вибропоглощающим материалом. Слоистые элементы с вибропоглощением дают возможность повысить акустическую эффективность двойных ограждений, в отличие от элементов с листами соединенными «насухо», приближая расчетную частотную кривую звукоизоляции к закону массы [41, 45].

Опыт применения таких конструкций показывает возможность повышения их звукоизоляции путём регулирования параметров слоистых элементов с вибропоглощением и эффективного заполнения зазора между ними звукопоглощающим материалом. При соответствующем соотношении характеристик вибропоглощающих и звукопоглощающих материалов, возможно, существенно повышать звукоизоляцию двойного ограждения.

В работе рассматриваются двойные ограждающие конструкции, выполненные из слоистых элементов с вибропоглощением, которые установлены через зазор, заполненный звукопоглощающим материалом с различными параметрами. Схемы перегородок приведены на рисунке 1.2. Перегородки с предлагаемыми конструктивными решениями могут использоваться в качестве внутренних ограждений в помещениях жилых и общественных зданий.

Указанные на рисунке 1.2 легкие конструкции имеют особенности процесса прохождения через них звуковой энергии. По этой причине при их разработке и оценке их звукоизолирующих качеств необходимо применять определенные теоретические модели.

Ниже выполнен обзор имеющихся теоретических и экспериментальных исследований звукоизоляционных характеристик двойных ограждающих конструкций и дана оценка возможности их применения при исследованиях, предложенных на рисунке 1.2. конструктивных решений.

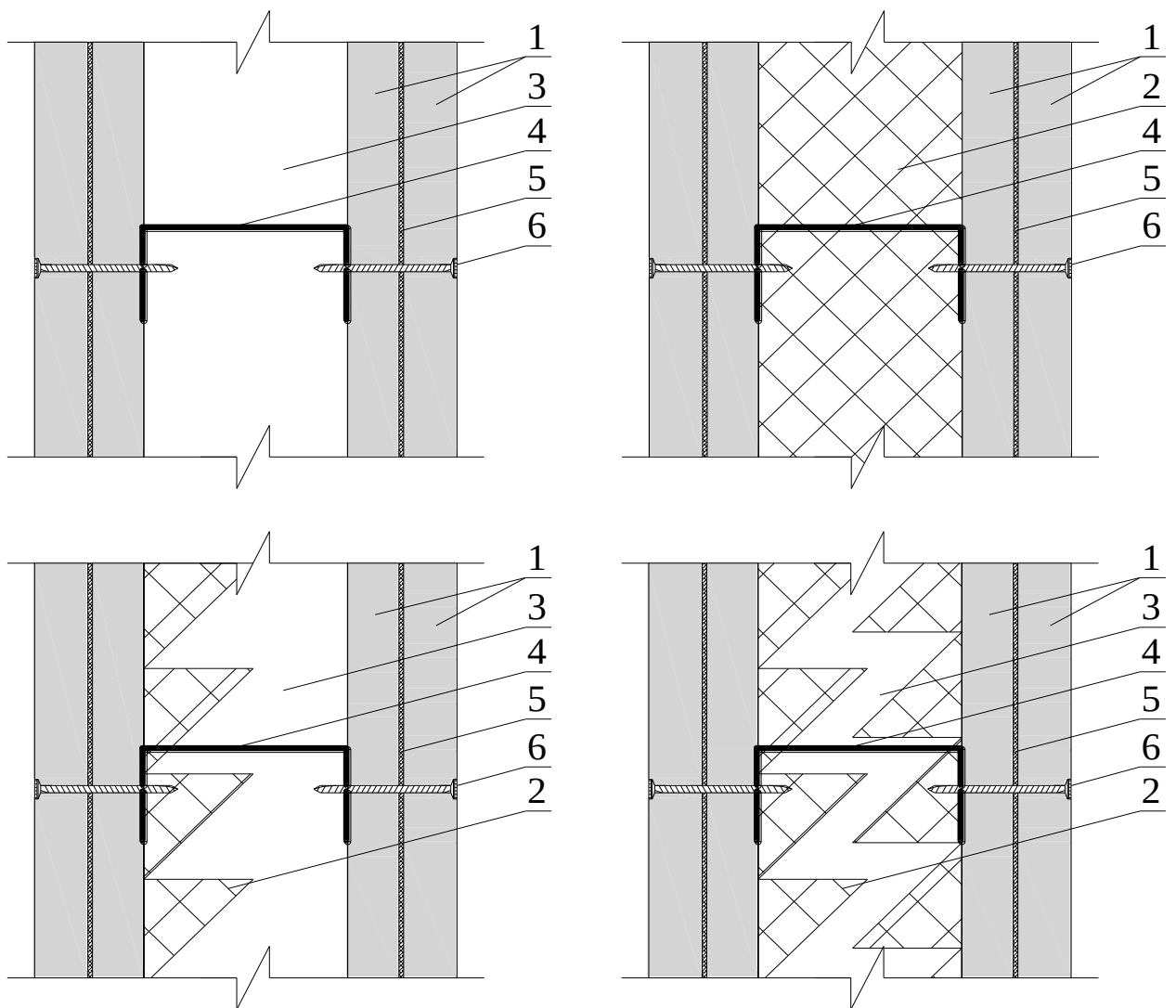


Рисунок 1.2 - Двойные звукоизолирующие конструкции из слоистых элементов с вибропоглощением с воздушным зазором и при различных вариантах его заполнения звукопоглощающим материалом: 1 – обшивочные листы (ГКЛ, ЦСП, ОСП); 2 – звукопоглощающий материал; 3 – воздушный зазор; 4 – направляющий профиль каркаса; 5 – вибропоглощающий материал; 6 – саморез

1.2. Анализ теоретических и экспериментальных исследований двойных звукоизолирующих конструкций

Исследования прохождения звука через ограждающие конструкции выполнялись достаточно давно. Первые исследования звукоизоляции были выполнены для однослойных конструкций, а после исследовалось прохождение звука через многослойные элементы.

Рэлей (Д.В. Стретт) первый рассмотрел прохождение звука через однослойную панель, которая была неограниченных размеров [78]. При исследованиях он предположил, что к плоскости конструкции звуковая волна падает нормально. С помощью отражения от конструкции воздушной звуковой волны образуется значительное количество звукоизолирующей способности ограждения, а оставшееся количество энергии создает колебания в конструкции. Таким образом, для создания колебаний в конструкции, меньше энергии понадобится для легкой конструкции, нежели для тяжелой. Из этого следует, что звукоизоляционные характеристики легкой конструкции будут хуже, чем у тяжелого ограждения при одних и тех же условиях. В закон массы вошли выводы, полученные в исследованиях Рэлея, который гласит, что увеличение поверхностной плотности конструкции в два раза ведет к росту индекса изоляции воздушного шума на 6 дБ.

Исследования Г. Рейснера были посвящены изучению полного прохождения звука, когда звуковые волны падают под конкретными углами и учитываются сдвиговые и продольные волны [126].

Позже в результате своих исследований Л. Кремером была разработана теория звукоизоляции неограниченных однородных панелей с учетом их изгибных колебаний [93]. В данной теории автор основывался на явлении волнового совпадения и установил, что при определенных углах падения звуковых волн их фазовая скорость и фазовая скоростью изгибных волн самой панели совпадают.

Согласно разработанной теории Л. Кремера следует, что на граничной частоте волнового совпадения весь диапазон частот представляет собой две области, каждая из которых имеет свой механизм прохождения звука.

Значение звукоизоляции в зоне, где отсутствует эффект волнового совпадения, определяется законом массы:

$$R = 20 \lg \mu \cdot f - 47,5 \quad (1.1)$$

На значение звукоизоляции в зоне частот выше граничной частоты будет влиять поверхностная плотность ограждения, частота звука и коэффициент потерь [93]:

$$R = 20 \lg \left(\frac{\pi \cdot f_{\Gamma} \cdot \mu}{\rho_0 \cdot c_0} \right) + 30 \lg \left(\frac{f}{f_{\Gamma}} \right) + 10 \lg \eta - 3. \quad (1.2)$$

Дж. Готц дополнил исследования Рейснера, объяснив, что звук полностью проходит через ограждение, только если совпадают фазовая скорость падающей звуковой волны и сдвиговых и продольных волн, распространяющихся вдоль конструкции [101].

Исследуя звукоизоляцию пластины ограниченных размеров, К. Лямюр и Р. Жосс пришли к выводу, что в зоне частот выше граничной частоты она так же зависит от массы, коэффициента потерь и частоты звука [105]. Они установили влияние размеров ограждения и коэффициента потерь на звукоизоляцию прямоугольной шарнирно опертой пластины:

$$R = 10 \lg \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot f^2}{\rho_0^2 \cdot c_0^2} - 10 \lg \left[\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lg \frac{2f}{\Delta f} \right) + \frac{2c_0^2}{\pi \cdot \eta \cdot f_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{\sqrt{f \cdot f_{\Gamma}}} \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^2 \cdot b^2} \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{2f}{f_{\Gamma}} + \frac{3f^2}{f_{\Gamma}^2} \right) \right], \quad (1.3)$$

где f_{Γ} - граничная частота волнового совпадения, f - текущая частота звука, η - коэффициент потерь, a, b - геометрические размеры панели в плане.

В зоне низких частот выявлены значительные расхождения между экспериментальными значениями и значениями, полученными по предложенной формуле (1.3).

В дальнейшем профессор М.С. Седов исследовал протекание звука через ограждения, которые имеют ограничения в размерах [69 - 73]. На основе полученных выводов была выдвинута теория звукоизоляции для однослойных пластин, учитывающая ограниченность их размеров. Одним из важным фактов является определенное и различное для отдельных областей частот совпадение звуковых волн в воздушном пространстве и волн в пластине. Согласно разработанной Седовым теорией частотная характеристика разделяется на пять областей: дорезонансная область, область простых резонансов, простых пространственных резонансов, неполных пространственных резонансов и полных пространственных резонансов. Все области разделены граничными частотами: основная резонансная частота f_0 , граничный простой пространственный резонанс $f_{\Gamma mono}$, граничный неполный пространственный резонанс $f_{\Gamma mno}$ и граничный полный пространственный резонанс $f_{\Gamma mn}$ [71].

На предложенной в соответствии с теорией М.Ю. Седова самосогласования волновых полей обобщенной частотной характеристике звукоизоляции однослойной ограждающей конструкции (см. рисунок 1.3) видно существенное отличие от предложенного деления частотного диапазона на две области Л. Кремером [93] и на три области Л. Беранеком [86-88].

М. С. Седов установил, что механизм прохождения и излучения звука в каждой области имеет свой характер и зависит от степени самосогласования воздушных звуковых полей и волнового поля собственных колебаний ограждения ограниченных размеров и коэффициента потерь в конструкции, что определяет резонансное прохождение звука. Габариты конструкции определяют инерционную составляющую прохождения энергии. Установлено, что ограждающие конструкции при конечных размерах имеют максимальную звукоизоляцию, которая определяется инерционным прохождением звука. Показано, что причиной повышения звукоизоляции конструкций ограниченных размеров является то, что в

области полных пространственных резонансов звук проникает полностью только на резонансных частотах конкретной панели, а не на каждой частоте.

Превышение звукоизоляции реальных конструкций над «законом массы» на низких частотах, полученное экспериментальным способом, поясняется снижением инерционного прохождения звука в этом диапазоне из-за конечности их геометрических параметров. Установлено, что регулирование звукоизоляции возможно за счет смещения этой области по частотной шкале, путем изменения размеров ограждения.

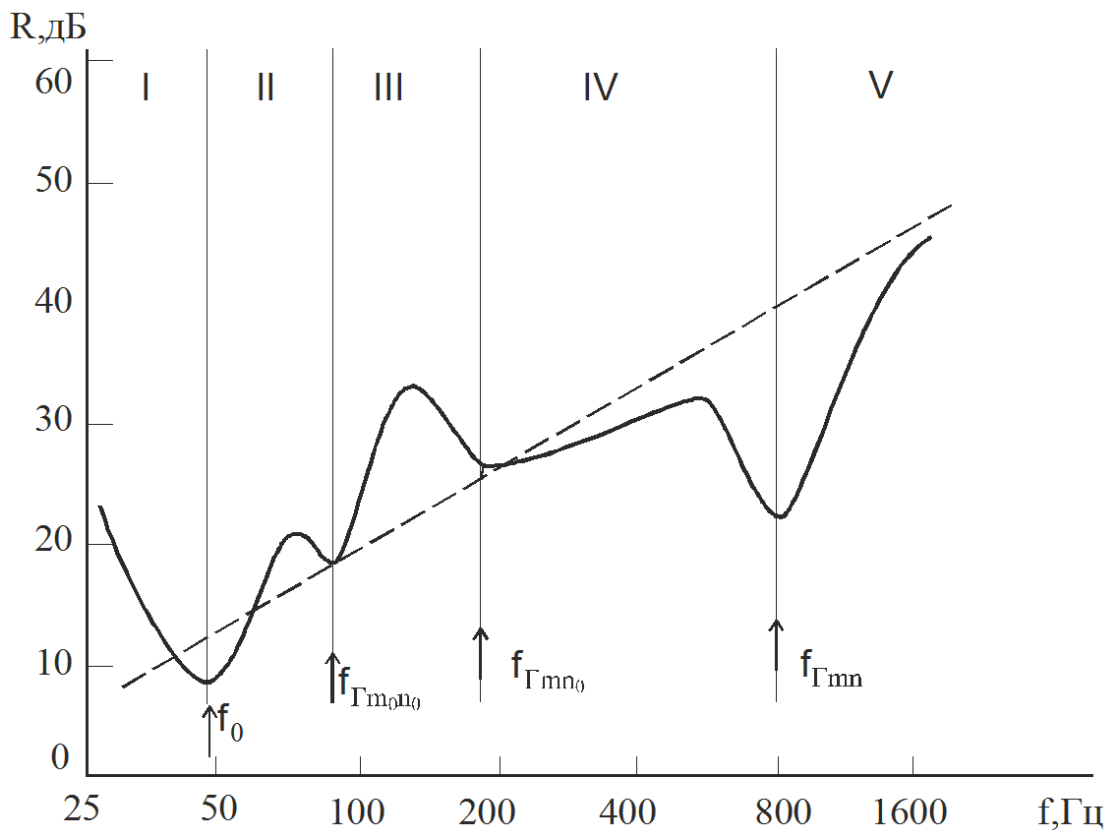


Рисунок 1.3 - Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров по теории самосогласования волновых полей М.С. Седова

На основе теории М. С. Седова были произведены различные исследования звукоизоляции ограждающих конструкций конечных размеров. Вопросом прохождения звука через ограждения на низких частотах (ниже граничной частоты полного пространственного резонанса) занимался В. Н. Бобылев. Его инженерный метод и теоретические выводы по расчету звукоизоляционных свойств

ограждений подтверждаются большим количеством экспериментальных исследований. [3-5, 7, 9].

Л. Беранек одним из первых занимался вопросом прохождения звука через многослойные конструкции [86-88]. Он использовал импедансный метод для изучения того, как нормально падающие звуковые волны проходят через чередующиеся слои. Для описания уравнения движения В. Томсон в своем исследовании использовал матричный метод [132]. Он показал, что уравнения для отдельных и смежных слоев должны быть связаны непрерывностью скорости частиц, нормальных и касательных напряжений на их границах, таким образом, потери энергии могут быть учтены в любом из слоев конструкции.

И. Кервин впервые рассмотрел колебания трехслойной панели с вибропоглощающим слоем для основного одномерного случая без учета граничных условий [109]. Им были выведены формулы для вычисления коэффициента потерь слоистого элемента с вибропоглощением при различных параметрах слоев.

В своих исследованиях М. Коббле решил задачу о продольных колебаниях неограниченной пластины, которая состоит из различного количества неоднородных слоев [91]. Решение волнового уравнения для смещения любого слоя представляет собой сумму двух функций, одна из которых – время, а другая – координаты, что позволяет разделить переменные.

И. Гиадера и С. Леже исследовали прохождение звука через многослойную пластину, для того чтобы определить влияние различных свойств (механических и вязкоупругих) материала пластины на снижение звука. Многослойная пластина при этом была заменена схожей однослойной пластиной [102, 103]. При решении уравнения движения использовался вариационный принцип для прямоугольной свободно опирающейся пластины и получены частоты и формы колебаний. Полученные потери при передаче звука представлены в работе [103]. Было установлено, что при повышении коэффициента потерь, резонансы на частотной характеристике звукоизоляции сглаживаются. Так же получено, что граничная частота волнового совпадения смещается в зону высоких частот при увеличении количества слоев в слоистом ограждении неизменной массой.

Е. Винтергерст один из первых исследовал прохождение звука через двойные конструкции с воздушным зазором. Им были изучены двойные ограждения как несоединенные между собой массы [134]. Он выявил, что увеличение поверхностной плотности слоев и толщины воздушного зазора ослабевают звук, проходящий через ограждение. Так же был выявлен провал в звукоизоляции ограждения по причине резонанса «масса – упругость – масса».

Модель двойного ограждения, которую предложил Е. Винтергерст, доработал К. Гезеле. Он рассматривал ее не как две несвязанные массы, а как эквивалентные поверхностные массы, обладающие жесткостью с граничными частотами волнового совпадения [100]. Он показал, что звукоизоляция двойного ограждения с воздушным зазором состоит из звукоизоляций отдельных пластин и слагаемого, которое учитывает жесткость слоя между этими пластинами. Прохождение звука через ограждение зависит от этого слагаемого, которое на низких частотах равно $\rho_0 c_0 / d$, где d - толщина воздушного промежутка, а на высоких частотах зависит от изгибных колебаний пластины и дает прибавку к звукоизоляции в 6 дБ.

Для расчета звукоизоляции неограниченных ограждений, выполненных из нескольких тонких панелей, установленных через воздушный зазор или через зазор, заполненный звукопоглощающим материалом, Л. Кремер использовал импедансный метод [93].

А. Лондон исследовал прохождение звука, падающего на двойное ограждение при любом угле [117]. Он принимает упрощение в виде таких ограничений как: ограждения неограниченны и одинаковы; не учитывается область волнового совпадения и влияние резонансных колебаний. Если экспериментально найти импеданс отдельной плиты, то можно определить прохождение звука в двойном ограждении. А. Лондон обнаружил, что на низких частотах двойное ограждение колеблется, как система сосредоточенных масс и упругости, где масса – это отдельная стенка, а упругость – воздушный зазор между ними. Резонанс «масса - упругость - масса» возникает в данной области.

Основная минимальная резонансная частота выражается в виде

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c_0^2 (M_1 + M_2)}{M_1 M_2 d}}, \quad (1.4)$$

где M_1, M_2 - поверхностные массы первой и второй пластины, кг/м²; d - величина воздушного зазора, м.

Подставляя значение плотности и скорости звука в воздухе в уравнение (1.4), его можно привести к более простому виду [132]

$$f_p = 60 \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2 d}}. \quad (1.5)$$

Индекс изоляции воздушного шума двойной конструкции из элементов, установленных через воздушный зазор, в зоне резонансной частоты может быть ниже, чем у однослойного ограждения с идентичной поверхностной плотностью. В частотном диапазоне $f > c_0 / 4d$ звукоизоляция двойного ограждения из пластин с воздухом между ними достигает максимального значения, которое складывается из значений звукоизоляции двух панелей, составляющих ограждение.

Л. Беранек и Дж. Уорк при исследовании установленных А. Лондоном зависимостей указали, что помимо поверхностной плотности, величины воздушного зазора и резонанса систем, звукоизоляционные характеристики двойного ограждения зависят от граничных частот волнового совпадения отдельно взятой пластины [87]. Они вывели соотношение для определения коэффициента передачи звука и установили, что звукоизоляция двойного ограждения, состоящего из двух пластин с воздухом между ними, имеет две нулевые частоты, одна из которых записывается в виде выражения

$$f = 1 / (2\pi \cdot \cos \theta) \sqrt{2\rho_0 c_0^2 / (m' d)}, \quad (1.6)$$

где θ - угол падения звуковой волны.

Основываясь на лучевой теории, А. Камминс и К. Малхолланд произвели расчеты потерь звуковой энергии при прохождении звука через воздушный зазор в двойном неограниченном ограждении [94].

В исследовании Е. Сьюэлла предполагается, что стенки двойного ограждения с воздушным зазором опирались шарнирно на жесткие экраны, которые не имеют между собой связей [127]. Математическая модель зазора в двойном ограждении представляется как неограниченное пространство, которое не учитывает отраженный звук от второй стенки. В расчете звукоизоляции учитывались две области (до граничной частоты волнового совпадения и после нее). Выполненные расчеты имели хорошую сходимость с экспериментальными данными по сравнению со многими имеющимися на тот момент расчетными моделями. Впоследствии Е. Сьюэлл доработал теоретическую модель, добавив внутреннее демпфирование в материале стенок.

В. Шарп теоретически вывел формулы для расчета звукоизоляционных характеристик двойных ограждений в трех зонах прохождения звука, которые разделяются частотой системы «масса-упругость-масса» и первым пространственным резонансом воздушного зазора [128]. В зоне ниже резонансной частоты «масса-упругость-масса» двойная конструкция проявляла себя идентично однослойной с такой же поверхностной плотностью, и с повышением звукоизоляции 6 дБ на октаву. В зоне между граничной частотой «масса – упругость – масса» и первым пространственным резонансом воздушного зазора повышение звукоизоляции было 18 дБ на октаву. В зоне выше первого пространственного резонанса воздушного зазора, на передачу звука сильно влияли физико-механические свойства стенок.

При изучении двойных ограждений, М. Крокер и А. Прайс применили статистический энергетический анализ (СЭА). На основе закона сохранения энергии, используя уравнения СЭА возможно вывести систему уравнений относительно значений механических энергий подсистем [96, 123]. Однако при использовании СЭА для расчета конкретной колебательной системы нет возможности определить коэффициенты взаимных потерь. Обычно их определяют экспериментально.

В своей работе В. И. Заборов при изучении прохождения звука в двойном ограждении и с жестким и упругим соединением между собой облицовок показал,

что дополнительная звукоизоляция ΔR двойной конструкции не схожа с однослойной и вычисляется по формуле [28]

$$\Delta R = -10 \lg(\tau_1 + \tau_2), \quad (1.7)$$

где τ_1 - коэффициент дополнительной звукопередачи при прохождении звука по периметру через жесткие связи; τ_2 - коэффициент дополнительной звукопередачи двустенной конструкции, не имеющей связей по периметру.

Наблюдается снижение звукоизоляции двойного ограждения при жестком соединении по периметру, особенно на частотах выше граничной.

Распространение звуковых волн в воздушном зазоре двустенной конструкции происходит под различными углами, если зазор не заполнен упругим материалом. В то же время, дополнительная звукоизоляция на низких частотах при $f \leq f_0 \sqrt{m_n / (2\rho_c \delta)}$ растет всего лишь на 6 дБ на октаву вместо 12 дБ на октаву при заполненном воздушном зазоре упругим материалом. Так же установлено, что увеличивая воздушный зазор в два раза, звукоизоляции ограждения повышается на 4 дБ. Величина воздушного зазора не влияет на звукоизоляцию ограждения на частотах $f > c_0 / 6d$ [26, 28].

При экспериментальных исследованиях звукоизоляции двойных ограждений с пластинами из стали и дерева без связи по периметру, установлено, что увеличение воздушного зазора на 15 см и более, не ведет к значительному изменению средней (в нормируемом диапазоне частот) величины дополнительной звукоизоляции [28].

В.И. Заборов и Л.Н. Клячко в своих последующих работах установили оптимальную величину стальной плиты [27].

На примере судовых конструкций И. И. Боголепов теоретически проанализировал прохождение звука через двойные ограждающие конструкции с воздушным зазором, учитывая такие конструктивные моменты как: вибропоглощение, звукопоглощение, ребра жесткости, звукоизоляционные мостики [18-20]. Он установил, что звукоизоляция на самых низких частотах вычисляется по формуле

$$R \approx 20 \lg(10^{R_1/20} + 10^{R_2/20}), \quad (1.8)$$

где R_1 и R_2 - звукоизоляция первой и второй плит с $\eta \ll 1$.

Таким образом, звукоизоляция двойного ограждения с воздушным зазором на нижних частотах равна звукоизоляции однослойной с суммарной массой двух плит.

Так же на низких частотах, но чуть выше в районе резонансной частоты системы “масса – упругость - масса” звукоизоляция двойного ограждения с воздушным зазором имеет провал, который определяется как

$$f_p = 85 \sqrt{\frac{1}{d_2} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}, \quad (1.9)$$

где d_2 - расстояние между плитами, м; m_1, m_2 - массы плит, кг/м².

В области резонансной частоты звукоизоляция двойного ограждения может быть и меньше, чем однослойной с суммарной массой двух плит. Анализ формулы (1.9) показывает, что изменение толщины воздушного зазора и поверхностной плотности двух плит в большую сторону приводит к смещению резонансной частоты системы «масса-упругость-масса» в зону более низких частот. Звукоизоляция двойных ограждений с воздушным зазором между панелями повышается на средних и высоких частотах практически через октаву от резонансной частоты системы “масса – упругость - масса”.

Увеличение частоты от резонансной частоты системы “масса – упругость - масса” для двойного ограждения с воздушным зазором между панелями в зону средних и высоких частот звукоизоляция принимает вид последовательно достаточно широких максимумов в области антирезонансных частот воздушного зазора, равных сумме звукоизоляций обеих панелей и узких минимумов на резонансных частотах воздушного зазора, равных звукоизоляции однослойного ограждения с суммарной массой двух панелей (первой и второй) [19]. Соответственно, в районе средних и высоких частот двойное ограждение имеет существенное преимущество перед однослойным ограждением с такой же поверхностной плотностью, и получается, что её звукоизоляция повышается из-за широких максимумов

в области антирезонансных частот воздушного зазора [19].

М. С. Седов и А. П. Юфев в своих исследованиях доказали, что на звукоизолирующие свойства двойных ограждающих конструкций оказывает влияние воздушный зазор и его толщина [74, 85]. Для очень тонких и больших конструкций в плане на низких и средних частотах $f_0 < f < f_{\Gamma mn/2}$ значимый вклад в прохождение звука вносят инерционные волны в наружных панелях с существенным влиянием резонансных явлений в воздушном зазоре между панелями и наоборот, для конструкций с большей изгибной жесткостью и малыми габаритами в плане звукоизоляция определяется резонансным прохождением звука. В зоне полных пространственных резонансов второй панели уменьшение звукоизоляции будет не таким существенным.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования прохождения звука в двустенных конструкциях так же еще рассмотрены в работах других авторов [54, 55, 89, 92, 97, 104, 105, 110, 111, 113, 116, 129, 130, 131, 133, 135].

В. Кроп и Е. Ребиллар исследовали варианты регулирования звукоизоляции двойных ограждений на низких частотах [111]. В своей работе авторы рассматривают выражение «низкие частоты» как область частот, имеющая граничную частоту волнового совпадения жестких однослойных пластин и частоты резонанса системы «масса-упругость-масса», которые снижают звукоизоляцию двойной конструкции. Проанализированы три варианта. В первом варианте резонансная частота двойного ограждения значительно превышает граничную частоту всего ограждения. При этом варианте двойное ограждение жестко соединено и принимается как однослойная конструкция. Во втором варианте наоборот, резонансная частота двойного ограждения намного ниже граничной частоты отдельных пластин, соответственно каждый слой работает самостоятельно. В третьем варианте резонанс двойного ограждения и граничные частоты находятся очень близко. В. Кроп и Е. Ребиллар разработали аналитическую модель для оптимизации всех трех вариантов.

А. А. Кочкин и Л. А. Борисов на основе теоретических исследований рассмотрели процесс протекания звуковых волн в двойных конструкциях, которые выполнены из двух трехслойных обшивок, установленных через воздушный зазор [37]. Выведенные теоретические выражения позволяют вычислять звукоизоляцию двойной конструкции.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по изучению звукоизоляционных характеристик многослойных ограждений выполнили ученые НИИСФ РААСН: Л. А. Борисов [57], М. А. Пороженко, Н. А. Минаева, В. Н. Сухов [51-53, 63].

В работах В. Л. Анджелова, Н. П. Умняковой и В. А. Смирнова представлены исследования звукоизоляции двойных ограждающих конструкций и многослойных обшивок, выполненных из ГВЛ, ГКЛ и пазогребневых блоков при заполнении воздушного зазора между двумя пластинами звукопоглощающими материалами [2, 82]. Результаты лабораторных испытаний сравнивались с фактическими данными по звукоизоляции в натурных условиях.

Выполненные Ю. А. Щелоковым обобщения существующих многочисленных результатов исследований двойных ограждений из двух плит с зазором между ними, были применены в методе расчета частотной характеристики и индекса изоляции воздушного шума каркасных перегородок [83].

В. Л. Анджелов, А. А. Климухин, Н. А. Минаева, М. А., Пороженко выполнили серию экспериментальных исследований звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок [1, 52]. Ими установлено, что незначительное увеличение поверхностной плотности звукопоглощающего материала не дает увеличения звукоизоляции двойных конструкций. Авторами получено повышение индекса изоляции воздушного шума двойных ограждений с помощью увеличения поверхностной плотности облицовок. При этом влияние их поверхностной плотности на звукоизоляцию двойных ограждений заметно снижается, когда собственная звукоизоляция ограждения выше. Таким образом, увеличение количества листов в обшивках уже не так значительно влияет на повышение изоляции воздушного шума.

Н. А. Минаева рассматривала звукоизоляционные качества каркасно-обшивных перегородок на металлическом каркасе, который обшит листами ГКЛ или ГВЛВ в один и в два слоя, установленных через зазор, заполненный звукопоглощающими материалом толщиной 50 и 100 мм [51]. Дано сравнение частотных характеристик звукоизоляции перегородок в зависимости от поверхностной плотности их обшивок и толщины звукопоглощающего материала, которым заполнялся воздушный промежуток перегородок

В. Н. Бобылев, В. А. Тишков и В. В. Дымченко выполнили экспериментальные исследования акустической эффективности каркасно-обшивной перегородки, в которых получили повышение звукоизоляции в большей части диапазона средних частот, применяя переменный шаг ребер жесткости [16]. Получено максимальное повышение, которое составило 5 дБ и рост звукоизоляции по индексу изоляции воздушного шума на 3 дБ. На основе полученных значений сделан вывод, что ребра жесткости, установленные с переменным шагом, «забирали» часть собственных колебаний каркасно-обшивной перегородки, что позволило рассогласовать работу воздушного звукового поля с вибрационным полем двойной конструкции. В. Н. Бобылев, В. А. Тишков и В. В. Дымченко для каркасно-обшивных перегородок разработали новые конструкции стоечного профиля каркаса в виде профиля Σ -образного сечения и профиля с радиусной перфорированной стенкой. Доказано, что оптимизация геометрических характеристик стоечных профилей каркасно-обшивных перегородок по сравнению со стандартными профилями «П-образного» сечения, позволяет повышать собственную звукоизоляцию ограждающей конструкции без увеличения её массы [10, 11, 14, 15, 80]. Теоретические исследования каркасно-обшивных перегородок с оптимизированным стоечным профилем проводились с использованием теории самосогласования волновых полей [6, 12].

Результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований звукоизоляционных характеристик двойных ограждающих конструкций с воздушным зазором и с его заполнением звукопоглощающим материалом представлены в работах С. Н. Овсянникова и О. В. Старцевой [76,77]. Выполняя расчет двойных

ограждающих конструкций с воздушным зазором, они применяют импедансный метод. Полученные экспериментальным и теоретическим способом значения индекса изоляции воздушного шума имеют расхождение между собой в 3 дБ.

Метод расчета изоляции воздушного звука двухслойных перегородок с учетом волновых параметров материала заполнения воздушного пространства между наружными слоями из минерального волокна предложен в работе А.И. Герасимова и Е.В. Никоновой [21].

Применяя теорию самосогласования волновых полей, В. А. Тишков и Д.В. Мурыгин изучили протекание звука в двойной светопрозрачной ограждающей конструкции [79, 81]. В своей работе авторы вывели инерционные и резонансные колебания [81]. Полученные теоретические и экспериментальные исследования графиков частотных характеристик звукоизоляции двойных ограждающих конструкций, выполненных из силикатного стекла при толщине 4 мм, установленных через воздушный зазор с толщиной 20 мм, 40 мм, 60 мм, 80 мм представлены в работах [79, 81]. Сравнение графиков показало, что кривые частотных характеристик имеют сходный между собой характер и могут быть использованы в дальнейшем для оценки нормируемых параметров изоляции воздушного шума.

Выводы по главе 1 и определение основных направлений исследований

Результаты выполненного анализа показали следующее.

1. Конструктивные решения и параметры лёгких двойных ограждений возможно обосновать на основе теоретических исследований, используя для этого теорию самосогласования М.С. Седова.

2. Звукоизоляция двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов зависит от физико-механических характеристик слоев и конструктивных решений ограждения (способа соединения элементов друг с другом, способов соединения листовых материалов между собой, толщины воздушного зазора и его заполнения звукопоглощающим материалом).

3. Для изучения зависимости звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов от различных параметров и подтверждения достоверности теоретической модели необходимо выполнение экспериментальных исследований, которые обеспечат надежной информацией о влиянии на звукоизоляцию ограждений их физико–механических и конструктивных параметров.

Основные направления исследования определены в соответствии с поставленной целью работы, и выполненным анализом в области исследований двойных звукоизолирующих конструкций:

- теоретические исследования прохождения звука через двойное ограждение из слоистых элементов с учетом их геометрических и физико-технических параметров;
- проведение экспериментальных исследований двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов в больших акустических помещениях для выявления зависимости их звукоизоляции от конструктивных и физико-технических параметров слоев конструкции;
- разработка метода расчета звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов с учетом их геометрических, конструктивных и физико-технических параметров;
- разработка рекомендаций по применению двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с рациональными конструктивными решениями, с учетом обеспечения нормативных требований изоляции воздушного шума в гражданских зданиях различного назначения.

ГЛАВА 2. ПРОХОЖДЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА В ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Любая механическая система, в том числе и слоистая строительная конструкция, представляет набор различных жестких элементов, обладающих своими собственными свойствами. Одним из этих свойств является то, что каждый элемент может определенным образом реагировать на внешнее воздействие. В случае воздействия на него звукового поля помещения, имеющего достаточно широкий спектральный состав, элемент будет откликаться на это воздействие путем появления в нем колебаний определенной частоты и амплитуды. Наиболее заметный отклик на внешнее воздействие будет в случае совпадения волновых характеристик звукового поля и вибрационных параметров колеблющейся конструкции.

В данной главе представлена оценка прохождения и излучения звука в двойных ограждающих конструкциях из слоистых элементов. Полученные выражения позволяют определять звукоизоляцию ограждения.

2.1. Определение звукового давления в воздушном зазоре, образованном двойным ограждением из слоистых элементов

В качестве исследуемого образца возьмем строительную конструкцию, состоящую из двух параллельных трехслойных пластин разделенных воздушным зазором. Проведем анализ прохождения звука через такую конструкцию. Предполагаем, что звуковые волны из верхнего полупространства падают на поверхность пластины в плоскости " $xoy=0$ " под некоторым углом " θ " (рисунок 2.1). Для дальнейшего анализа необходимо иметь сведения о коэффициенте отражения звука " A " и коэффициенте прохождения " B ". С энергетической точки зрения они соответственно будут определяться как

$$A^2 = \frac{W_{omp}}{W_{nad}} \text{ и } B^2 = \frac{W_{прош}}{W_{nad}}. \quad (2.1)$$

По закону сохранения энергии $A^2 + B^2 = 1$

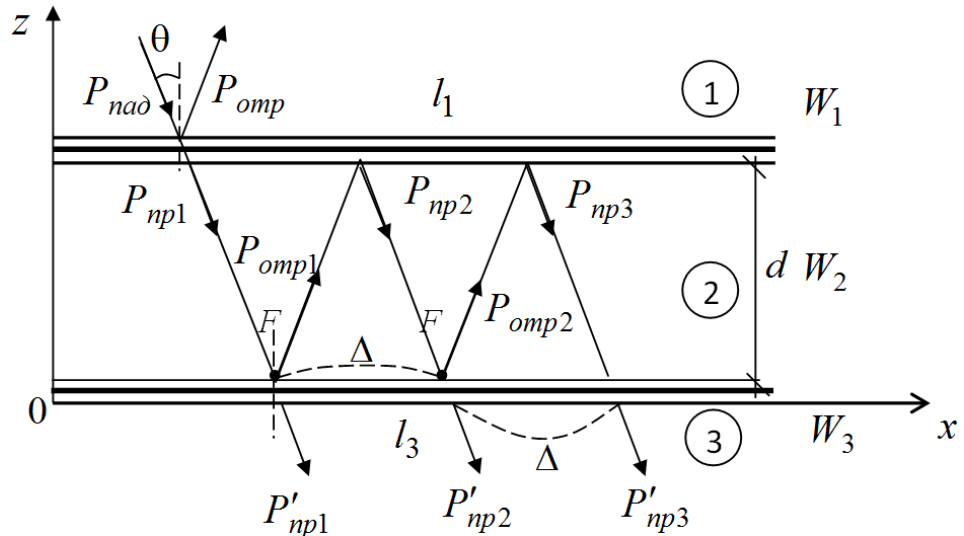


Рисунок 2.1 – Схема прохождения звука через двойное ограждение

Согласно, рисунка 2.1, обозначим величину амплитуд звуковых волн в соответствующих средах следующим образом:

P_{nad} - амплитуда звукового давления в падающей волне верхнего полупространства (среда 1);

P_{np1} - амплитуда звукового давления в первой прошедшей волне внутрь воздушного зазора;

P_{omp} - амплитуда звукового давления в волне отраженной в верхнее полупространство;

P_{np2}, P_{np3} - амплитуды «вторичных» прошедших волн;

P_{omp1}, P_{omp2} - амплитуды давлений звуковых волн, отраженных от второго элемента (отражения внутри воздушного зазора);

P'_{np1}, P'_{np2} - амплитуды давлений звуковых волн, прошедших в нижнее полупространство.

Величина смещения звукового луча вдоль оси «х» (рисунок 2.1) в плоскости пластины определяется соотношением вида $\left| \frac{\partial(\sqrt{k_0^2 - k_x^2})}{\partial k_x} \right| = 2dtg\theta$.

Из геометрических построений согласно рисунку 2.1 $\Delta = 2dtg\theta$, что полностью совпадает с выводами, полученными в работах А.П. Юферева [85] и А.Л. Беранека [86].

$$\text{Согласно построениям } \Delta = \frac{l_1}{n}, \quad \frac{l_1}{n} = 2dtg\theta,$$

где l_1 - размеры ограждения; n - число длин звуковых полуволн, укладываемых на поверхности данного ограждения.

$$\text{Далее имеем } \theta = \arctg \frac{l_1}{zdn}, \quad d = \frac{l_1}{2ntg\theta}.$$

Из полученного выражения видно, что при выбранной толщине воздушного зазора « d », существует такой угол падения звуковых волн « θ », при котором все $P'_{отр}$ попадают в узлы колебаний пластины (рисунок 2.1) и, следовательно, усиленный колебаний пластины не произойдет. Падающая в узел колебаний пластины звуковая волна полностью отражается (в воздушном зазоре) с той же амплитудой и фазой.

Величина плотности звуковой энергии в воздушном зазоре возрастает, то есть происходит самосогласование полей пластины и воздушной среды. В воздушном зазоре образуются стоячие волны, и происходит просто перекачка энергии, то есть проявляется некоторое резонансное явление. Это явление можно использовать для повышения звукоизоляции, помещая в воздушный зазор элементы звукопоглощающего материала.

Изменяя толщину воздушного зазора (d) можно перемещать точку отражения « F » вдоль пластины и тем самым можно влиять на прохождение звуковых волн в плоскости пластины ($z = d$).

В условиях интерференции звуковых волн в нижнем полупространстве (среда 3) с учетом набега фаз при прохождении воздушного зазора амплитуды соответствующих волн запишутся в виде:

$$\begin{aligned} p'_{np1} &= B^2 p_o \cdot e^{i \cdot k_o (z-d) \cdot \cos \theta} \\ p'_{np2} &= B^2 A^2 p_o \cdot e^{i \cdot k_o (z-3d) \cdot \cos \theta} \\ p'_{np3} &= B^2 A^4 p_o \cdot e^{i \cdot k_o (z-5d) \cdot \cos \theta} \\ &\dots\dots\dots \\ p'_{npn} &= (AB)^2 A^{n-1} p_o \cdot e^{i \cdot k_o [z-(2n-1)d] \cos \theta} . \end{aligned} \quad (2.2)$$

Амплитуду суммарного звукового давления в нижнем полупространстве рассмотрим как сумму бесконечно убывающей геометрической прогрессии.

$$S = \frac{a_1}{1-q}, \quad (2.3)$$

$$\text{где } a_1 = B^2 p_o \cdot e^{i \cdot k_o (z-d) \cdot \cos \theta} \quad (2.4)$$

$$q = A^2 \cdot e^{-2i \cdot kd \cdot \cos \theta} \quad (2.5)$$

Тогда для нижнего полупространства с учетом (2.4), (2.5) суммарное звуковое давление представится выражением

$$S_{(p)} = \frac{B^2 p_o e^{ik(z-d) \cos \theta}}{1 - A^2 e^{-2ikd \cos \theta}} . \quad (2.6)$$

Введем новые обозначения $B^2 = \tau$ и $A^2 = 1 - B^2 = 1 - \tau$.

После подстановки получаем

$$S = \frac{p_o \cdot \tau \cdot e^{ik(z-d) \cos \theta}}{1 - (1 - \tau) e^{-2ikd \cos \theta}} . \quad (2.7)$$

Нас интересует величина звукового давления в плоскости пластины. После преобразований получаем выражение вида:

$$S = \frac{p_o \tau e^{-2ikd \cos \theta}}{1 - (1 - \tau) e^{2ikd \cos \theta}} . \quad (2.8)$$

Рассматривая действительную часть соотношения (2.8) можем определить значения амплитуды звукового давления нижнего полупространства.

Приведем (2.8) к более компактному виду

$$S_{(p)} = \frac{p_0 \tau}{(\tau - 1) + e^{2ikd \cos \theta}} = \frac{p_0 \tau}{e^{2ikd \cos \theta} - A^2}. \quad (2.9)$$

Используя формулу Эйлера [57]

$$e^{2i \cdot kd \cdot \cos \theta} = \cos(2kd \cos \theta) + i \sin(2kd \cos \theta), \quad (2.10)$$

получаем

$$\begin{aligned} S_{(p)} &= \frac{p_0 \tau}{[\cos(2kd \cos \theta) - A^2] + i \sin(2kd \cos \theta)} = \\ &= \frac{p_0 \tau \{ [\cos(2kd \cos \theta) - A^2] - i \sin(2kd \cos \theta) \}}{\{ [\cos(2kd \cos \theta) - A^2] + i \sin(2kd \cos \theta) \} \{ [\cos(2kd \cos \theta) - A^2] - i \sin(2kd \cos \theta) \}} = \\ &= p_0 \tau \frac{[\cos(2kd \cos \theta) - A^2] - i \sin(2kd \cos \theta)}{[\cos(2kd \cos \theta) - A^2] + \sin^2(2kd \cos \theta)}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Применяя действительную часть, данное выражение примет вид:

$$\begin{aligned} S_{(p)} &= \frac{p_0 \tau [\cos(2kd \cos \theta) - A^2]}{\cos^2(2kd \cos \theta) - 2A^2 \cos(2kd \cos \theta) + A^4 + \sin^2(2kd \cos \theta)} = \\ &= \frac{p_0 \tau [\cos(2kd \cos \theta) - A^2]}{1 + A^4 - 2A^2 \cos(2kd \cos \theta)}. \end{aligned}$$

Для удобства расчета проведем обратную замену, учитывая, что $B^2 = \tau$ и $A^2 = 1 - \tau$, имеем

$$S_{(p)} = \frac{p_0 \tau [\cos(2kd \cos \theta) - 1 + \tau]}{2 - 2\tau + \tau^2 - 2(1 - \tau) \cos(2kd \cos \theta)}. \quad (2.12)$$

Подсчитаем амплитудное значение звукового давления в отсутствии второго элемента ($d = 0$). Согласно выражению 2.12 имеем

$$S_{(p)} = \frac{\tau p_0 [\cos \theta - 1 + \tau]}{2 - 2\tau + \tau^2 - 2(1 - \tau) \cos \theta} = \frac{\tau^2 p_0}{2 - 2\tau + \tau^2 - 2 + 2\tau} = p_0 \quad (2.13)$$

Найдем координаты второго элемента ($z = d$) для которых амплитуда звукового давления в плоскости этого элемента будет минимальной.

Для удобства расчета приведем формулу (2.13) к виду

$$S = \frac{\tau \cdot p_0 [\cos(2kd \cos \theta) - A^2]}{1 + A^4 - 2A^2 \cos(2kd \cos \theta)} = \frac{\tau \cdot p_0 (\cos x - A^2)}{1 + A^4 - 2A^2 \cos x}. \quad (2.14)$$

Экстремальное значение данной функции определим как $\frac{dS}{dx} = 0$. Для этого произведем вычисления

$$\frac{dS}{dx} = p_0 \frac{-\sin x(1 + A^4 - 2A^2 \cos x) - 2A^2 \sin x(\cos x - A^2)}{(1 + A^3 - 2A^2 \cos x)^2}. \quad (2.15)$$

Дробь равняется нулю, когда её числитель равен нулю, то есть $-\sin x + A^4 \sin x = 0$. Откуда получаем решения. $\sin x(A^4 - 1) = 0$.

Рассмотрим возможные решения:

1) $A^4 - 1 = 0$; $A^2 = \pm 1$. Решение этого уравнения в области действительных чисел будет $A^2 = 1$, то есть имеем дело с полностью отражающей поверхностью, а это значит, что при падении звуковой волны из верхнего полупространства на элемент конструкции проходит полное отражение волны назад в верхнее полупространство. Следовательно, звуковая волна в воздушном зазоре не возникает и, соответственно, не попадает в нижнее полупространство.

2) $\sin x = 0$ или $\sin(2kd \cos \theta) = 0$. Это возможно, когда $2kd \cos \theta = m\pi$. Анализ этого решения дает возможность определить положение плоскостей с минимальным давлением.

Амплитуда результирующего давления в прошедшей волне вычисляется через амплитуду давления в падающей звуковой волне. Квадрат колебательной скорости определяет излучаемую энергию колеблющейся конструкции. Колебательная скорость любой точки конструкции, определяемая через собственные функции, пропорциональна давлению в падающей звуковой волне.

Рассмотрим коэффициент проницаемости, который представим как

$$\tau = B^2 = \frac{W_{np}}{W_{nad}},$$

где W_{np} - энергия звуковой волны, прошедшая через ограждение, W_{nad} - энергия в падающей звуковой волне.

Тогда, согласно рисунку 2.1, $\tau = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_3}{W_2}$. Откуда $W_2 = \sqrt{W_1 W_3}$. Согласно

этому выражению, зная значения энергий в средах «1» и «3» (W_1 и W_3), можно определить значение энергии звукового поля в воздушном зазоре. Это позволяет предсказать ожидаемый уровень звуковой мощности в заданной области и даёт возможность регулировать распределение уровней звуковой мощности в рассматриваемом пространстве путем внесения в определенные места звукопоглощающего материала.

2.2. Влияние собственных колебаний и инерционного прохождения звука на излучение слоистого элемента в составе двойных ограждений

В результате воздействия внешнего звукового поля в ограждающей конструкции возникают собственные колебания, определяемые свойствами ограждения. Колеблущаяся система в этом случае, входя в резонанс, излучает звуковую энергию в режиме собственных колебаний.

Расчет акустической мощности излучаемой ограждением в выбранном диапазоне частот, как и в работе [35] определяется выражением

$$W_{zp} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{\bar{V}_{0mn}^2}{\cos \theta \cos \theta_{zp}} \frac{A_2^2}{ab}, \quad (2.16)$$

где A_2 - рассматривается, как характеристика самосогласования, указывающая на степень связи волн звукового поля и вибрационного поля собственных колебаний ограждения.

$$A_2 = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m_2 \pi x}{a} \sin \frac{n_2 \pi y}{b} \sin \frac{m_{02} \pi x}{a} \sin \frac{n_{02} \pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{m_{02} \pi x}{a} \sin^2 \frac{n_{02} \pi y}{b} dx dy}. \quad (2.17)$$

Представим квадрат колебательной скорости, входящей в (2.16), в виде

$$\bar{V}_{0mn}^2 = \frac{\rho_0^2 A_2^2}{8\pi^2 \mu^2 \Delta f \cdot f \eta}. \quad (2.18)$$

Амплитуда результирующего звукового давления нижнего полупространства для этого случая вычисляется как

$$S_{(p_0)} = \frac{B^2 p_0 X e^{ik(z-d)\cos\theta}}{1 - A^2 e^{-2ikd\cos\theta}}. \quad (2.19)$$

Действительная форма этого выражения представится в виде

$$S_{(p_0)} = \frac{\tau p_0 [\cos(2kd\cos\theta) - 1 + \tau]}{2 - 2\tau + \tau^2 - 2(1 - \tau)\cos(2kd\cos\theta)}, \quad (2.20)$$

Здесь, в случае резонансного прохождения звука, коэффициент проницаемости ограждения « τ » согласно [57] определяется выражением

$$\tau_p = \frac{(\rho_0 c_0)^2 A^4}{2,3\pi \mu^2 f^2 \eta \cos\theta_{cp} \cos\theta_{cp} + (\rho_0 c_0)^2 A^4}. \quad (2.21)$$

Выражения (2.16), (2.18) и (2.19) определяют резонансное прохождение звука. Согласно полученным соотношениям, видно, что изменяя величину коэффициента потерь « η », возможно влиять на величину звукоизоляции. В связи с этим, коэффициент потерь необходимо учитывать в расчетах более целенаправленно и подтвердить его значимость экспериментально.

При анализе процесса прохождения звука следует учитывать также и инерционное прохождение звуковой энергии, то есть учитывать энергию движения инерционных волн. Инерционная волна существует на каждой частоте, включая частоты собственных колебаний. На частоте собственных колебаний инерционная и свободная волны, хотя и имеют одинаковую частоту, но отличаются разными начальными фазами при возникновении движения. При увеличении разме-

ров ограждения в плане, частотная область пониженного прохождения звука уменьшается.

Согласно [57] изучаемая мощность рассматриваемой конструкции определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^a \int_0^b P \cdot V \, dx dy \right), \quad (2.22)$$

Из выражения (2.22) следует, что мощность излучаемой ограждением энергии инерционных волн можно определить по формуле

$$W_{2н} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{V_0^2 m_0 n_0 A_{2н}^2}{\cos \theta \cos \theta_{2н}} ab. \quad (2.23)$$

В случае изгибных колебаний, когда число следов звуковых полуволен падающей волны совпадает с числом полуволен на поверхности пластины имеем: $m_u = m_0$; $n_u = n_0$, $A_{2н} = 1$. Здесь $V_{0m_0n_0}$ - амплитуда колебательной скорости.

Величина амплитуды колебательной скорости связана с амплитудой звукового давления соотношением

$$V_{0m_0n_0}^2 = \tau_n^2 \frac{p_{0m_0n_0}^2}{\mu^2 \omega^2}. \quad (2.24)$$

Согласно [57] коэффициент инерционного прохождения звука « τ_n » определяется выражением

$$\tau_n = \frac{F_n^2 \rho_0^2 c_0^2}{\pi^2 \mu^2 f^2 \cos \theta \cos \theta_{2н} + F_n^2 \phi_0^2 c_0^2}. \quad (2.25)$$

Используя выражение (2.25) для определения амплитуды звукового давления в волнах, распространяющихся в нижнем полупространстве, имеем

$$S_{(p)} = \frac{\tau_n p_0 [\cos(2kd \cos \theta) - (1 - \tau_n)]}{2 - 2\tau_n + \tau_n^2 - 2(1 - \tau_n) \cos(2kd \cos \theta)}. \quad (2.26)$$

Из выражения (2.26) видно, что инерционные волны являются определяющими в формировании звукового поля в нижнем полупространстве. Отсюда сле-

дует вывод, что в этом случае звукоизоляция не зависит от внутренних потерь и степени вибропоглощения.

Повышение звукоизоляции на низких и средних частотах связано с уменьшением $F_{\text{н}}$. В работе [73] показано, что использование вибропоглощающего материала (ВПМ) для поглощения собственных колебаний ограждения повысило его звукоизоляцию во всем диапазоне частот вплоть до предельных значений.

Используя соотношение (2.26), возможно определить предельные значения для амплитуды звукового давления в волнах нижнего полупространства:

1) Звуковая энергия проходит через ограждение совершенно свободно, т.е. $\tau_{\text{н}} = 1$, тогда имеем

$$S_{(P)} = \frac{p_0[\cos(2kd \cos \theta) - 0]}{2 - 2 + 1 - 0} = p_0 \cos(2kd \cos \theta). \quad (2.27)$$

Из формулы (2.27) следует, что звуковое давление в нижнем полупространстве определяется набегом фазы волны на расстоянии $z = d$ и начальным углом падения звуковых волн θ .

2) Для другого крайнего случая, когда $\tau_{\text{н}} = 0$, из формулы (2.26) имеем $S_{(P)} = 0$.

В этом случае звуковые волны в нижней среде отсутствуют, что соответствует полной звуковой непрозрачности ограждения.

2.3. Учет потерь звуковой энергии при прохождении звука через элементы слоистых ограждений

Проанализируем процесс излучения звука одной из сторон слоистой конструкции (см. l_3 на рисунке 2.1). Для этого свяжем с излучаемой стороной декартову систему координат. Систему координат выбираем так, чтобы ось “ ox ” совпала со срединной плоскостью стороны l_3 . Начало отсчета совпадает с левым краем пластины, а ось “ oy ” направлена перпендикулярно вверх (см. рисунок 2.1).

Выражение, определяющее звуковое давление в среде ($z < 0$), представим в виде разложения в ряд по собственным функциям

$$p_{(x,z,t)} = \sum_{m=0}^{\infty} p_0 \sin \frac{m\pi x}{l} e^{i\left[\omega t - K_2 \left(z + \frac{h}{2}\right)\right]}. \quad (2.28)$$

Здесь K_2 - составляющая волнового вектора вдоль оси z ; $K_2 = \sqrt{K_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}$;

p_0 - амплитуда звукового давления в падающей волне; h - толщина пластины, участвующей в процессе излучения.

Из условия неразрывности параметров на границе раздела двух сред, амплитуда звукового давления для каждого вероятного направления находится из граничных условий на поверхности пластины

$$\left[\frac{\partial p_{(x,z,t)}}{\partial z} \right]_{z=-\frac{h}{2}} = i\omega\rho V(x,t). \quad (2.29)$$

Здесь $V_{(x,t)}$ - величина колебательной скорости; ω - круговая частота; ρ - плотность внешней среды.

Для простоты расчета колебательную скорость перепишем в виде разложения в бесконечный ряд по собственным функциям

$$V(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} V_m \xi(x) \cdot e^{i\omega t}, \quad (2.30)$$

После нескольких преобразований получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} &= i \sum_{m=0}^{\infty} p_0 \sin \frac{m\pi}{l} x K_2 e^{i\left[\omega t - K_2 \left(z + \frac{h}{2}\right)\right]}, \\ \left[\frac{\partial p}{\partial z} \right]_{z=-\frac{h}{2}} &= i \sum_{m=0}^{\infty} p_0 \sin \frac{m\pi}{l} K_2 e^{i\omega t}. \end{aligned}$$

Подставляя численные значения $z = -\frac{h}{2}$, находим

$$i \sum_m p_0 \sin \frac{m\pi}{l} x K_2 = i \omega \rho \sum_m V_m \xi(x), \quad (2.31)$$

При определении амплитуды звукового давления « p_0 » воспользуемся свойством ортогональности нормальных функций, предварительно умножив обе части уравнения (2.31) на $\sin \frac{m\pi}{l} x$ и взяв интеграл по пространственному периоду $\int_{l_2}^{l_3}$.

После соответствующих преобразований, амплитуда звукового давления в нижней среде представится в виде

$$p_0 = \frac{k_0 \rho_0 c_0 V_m \int_{l_2}^{l_3} \xi_3(x) \sin \frac{m\pi}{l} x dx}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 \int_{l_2}^{l_3} \sin^2 \frac{m\pi}{l} x dx}}, \quad (2.32)$$

где ρ_0 - плотность среды; c_0 - скорость звука в среде;

$$K_2 = \sqrt{K_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}.$$

Акустическую мощность, излучаемую на единицу ширины выбранной стороны данного образца, найдем как усредненную за период

$$W_{изл} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\int_{l_2}^{l_3} P_{(x)} V_{(x)} dx \right] \quad (2.33)$$

Заменяя в (2.33) соответствующие значения $P_{(x)}$ и $V_{(x)}$, определяем величину $W_{изл}$ в виде

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\int_{l_2}^{l_3} \sin^2 \frac{m\pi}{l} x dx} \operatorname{Re} \frac{k_0}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}} \times \\ \times \sum_{m=1}^{\infty} V_m \left[\int_{l_2}^{l_3} \xi_3(x) \sin \frac{m\pi}{l} x dx \right]^2. \quad (2.34)$$

В формировании собственных колебаний принимают участие два типа волн. Один тип волн имеет волновые параметры $(kl)_m = m\pi$; и при $m = m'$ следует

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} V_m^2 \frac{0,25abk_0}{2\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}}, \quad (2.35)$$

Учитывая направления излучения в обе стороны, имеем

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} V_m^2 \frac{0,25abk_0}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}}, \quad (2.36)$$

В случае, когда волновые параметры излучаемых волн определяются как $(kl)_m = m\pi + 2,225$, $m = m'$ выражения (2.36), при $m = m'$ после ряда преобразований запишется в следующем виде

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{V_m^2 k_0 ab}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}} \frac{2 \left[\frac{0,175}{1 + \frac{2,225}{m\pi}} + \frac{1,275}{4,45 + 2m\pi + \frac{4,951}{m\pi}} \right]^2}{l} \quad (2.37)$$

Для волн, частота которых достаточно велика, то есть для достаточно больших “ m ” выражения (2.37) можно предоставить в виде

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,062abV_m^2 k_0}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}}. \quad (2.38)$$

В силу симметрии излучения в направлениях “ $\pm \theta$ ”, излучаемая мощность определяется соотношением

$$W_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,124k_0 abV_m^2}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}} \quad (2.39)$$

Формулы (2.35) и (2.39) позволяют рассчитать возможную звукоизоляцию ограждающей конструкции на отдельных дискретных частотах. Практически же

измерения звукоизоляции обычно производят в третьоктавных или октавных частотных интервалах.

Для общности расчета рассмотрим излучение элемента строительной конструкции при возбуждении его произвольной полосой шума шириной $\Delta f = f_1 - f_2$. Далее, заменяя произвольную полосу “ Δf ” октавным или третьоктавными частотными интервалами, можно перейти к практическому расчету звукоизоляции в стандартных полосах частот.

Излучаемую акустическую мощность представим в виде

$$\overline{W}_{изл} = \sum_{m_n}^{m_e} \overline{W}_m. \quad (2.40)$$

Здесь $\overline{W}_{изл}$ - суммарная излучаемая акустическая мощность в рассматриваемом интервале частот $\Delta f = f_1 - f_2$; $m_e; m_n$ - номера форм собственных колебаний соответствующих нижней и верхней границе интервала.

Рассмотрим процесс излучения акустической мощности в области частот выше граничной, учитывая, что в процессе формирования собственных колебаний принимают участие волны, волновые параметры которых определяются соотношением вида $(kl)_m = m\pi$.

В результате подстановки имеем для излучаемой энергии в полосе частот

$$\overline{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \sum_{m_e}^{m_n} \overline{V}_m^2 \frac{0,25ab}{\Delta K_{om}} \int_{K_{om1}}^{K_{om2}} \frac{K_{om} dK_{om}}{\sqrt{K_{om}^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}}, \quad (2.41)$$

где $\tilde{V}_m^2$ - усредненный квадрат колебательной скорости для заданного интервала частот.

Тогда, для заданного интервала частот Δf с учетом нумерации квадратов колебательной скорости $\tilde{V}_m^2$ можем записать

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,25 \bar{V}_m^2 ab}{\Delta K_{om}} \int_{K_{om1}}^{K_{om2}} \frac{K_{om} dK_{om}}{\sqrt{K_{om}^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}} \quad (2.42)$$

Переходя к более удобной форме записи, имеем

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,25 ab \tilde{V}^2}{\Delta f} \left(f_{\epsilon} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\epsilon}}} - f_{\eta} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\eta}}} \right) \quad (2.43)$$

Для энергии, излучаемой в области частот выше граничной, следует учесть волны, волновые параметры которых определяются соотношением $(kl)_m = m\pi + 2,225$. В этом случае для определения $\bar{W}_{изл}$ выражение будет иметь вид

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \sum_{m_{\epsilon}}^{m_{\eta}} \bar{V}_m^2 \frac{0,124 ab}{\Delta K_{om}} \int_{K_{om1}}^{K_{om2}} \frac{K_{om} dK_{om}}{\sqrt{K_{om}^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}} \quad (2.44)$$

Выражение (2.44) после раскрытия знака суммы можно переписать в виде

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,124 ab \tilde{V}^2}{\Delta K_{om}} \int_{K_{om1}}^{K_{om2}} \frac{K_{om} dK_{om}}{\sqrt{K_{om}^2 - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}}, \quad (2.45)$$

Далее его можно представить в еще более удобной форме

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{0,124 ab \tilde{V}^2}{\Delta f} \left(f_{\epsilon} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\epsilon}}} - f_{\eta} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\eta}}} \right) \quad (2.46)$$

Обозначив коэффициент излучения “S” как

$$S = \frac{0,124}{\Delta f} \left(f_{\epsilon} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\epsilon}}} - f_{\eta} \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_{\eta}}} \right), \quad (2.47)$$

Рассмотрим, как изменится коэффициент излучения “S” в зависимости от изменения ширины частотного диапазона. Предположим, что выбранный частотный интервал лежит в области $f_{zp} \leq f \leq 2f_{zp}$. Значение коэффициента излучения в октавных полосах частот, при $f_{\eta} = f_{zp}$ и $f_{\epsilon} = 2f_{zp}$, будет равно $S = 0,175$. В случае

третьоктавных интервалах частот при $f_n = f_{ep}$ и $f_s = 1,25 f_{ep} - S = 0,278$. Видно, что коэффициент звукоизлучения увеличивается с уменьшением ширины частотного интервала Δf .

Учитывая общую мощность, излучаемую обоими типами волн $(Kl)_m = m\pi$ и $(kl)_m = m\pi + 2,225$ в заданном диапазоне частот, можно записать

$$\bar{W}_{изл} = \frac{\rho_0 c_0}{2} \bar{S} ab[0,25 \bar{V}_m^2(m\pi) + 0,124 \bar{V}_m^2(m\pi + 2,225)], \quad (2.48)$$

$$\text{где } \bar{S} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_s \sqrt{1 - \frac{f_{ep}}{f_s}} - f_n \sqrt{1 - \frac{f_{ep}}{f_n}} \right) \quad (2.49)$$

Любая механическая система определенным образом реагирует на внешнее воздействие. Наиболее сильным этот отклик будет в том случае, когда частота вынуждающей силы совпадает с частотой собственных колебаний выбранной механической системы. Такое явление называется резонансом. В этом случае амплитуда колебаний каждой точки системы многократно возрастает. Колебательный процесс при отсутствии внешнего воздействия не может продолжаться бесконечно долго. Запасенная энергия расходуется на преодоление внутреннего трения. Величина работы сил внутреннего трения может быть определена из соотношения

$$R = \frac{\nu}{2} \int_0^l W(x) dx, \quad (2.50)$$

где l - размер участка, на который производилось воздействие; ν - коэффициент внутреннего трения $\nu = \eta \omega_m^2 m'$; η - коэффициент потерь.

Экстремальные свойства колеблющейся пластины с учетом энергии потерь и сдвига фаз между упругой и неупругой циклическими деформациями связаны соотношением

$$\frac{\partial}{\partial A_m} \left\{ \frac{m'}{2} [\omega^2 - \omega_m^2 (1 + i\eta)] \int_0^{l_4} \xi^2(x) dx + \int_0^{l_1} p(x) \xi(x) dx \right\} = 0. \quad (2.51)$$

Величина смещения любой материальной точки колеблющейся конструкции для каждого конкретного “ m ” определяются из выражения

$$\xi_m = \frac{2p_m \int_0^{l_1} p(x) \xi(x) dx}{\left[\omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2 \right] \left[m'_1 \int_0^{l_1} x^2 dx + m'_3 \int_{l_2}^{l_3} x^2 dx \right]}. \quad (2.52)$$

Учитывая, что в формировании собственных колебаний рассматриваемой конструкции, участвуют волны двух типов с разными волновыми параметрами, определим величину смещения каждой материальной точки конструкции для соответствующего типа волн.

Для волн с волновыми параметрами $(kl)_m = m\pi$ соотношение (2.52) преобразуется к виду

$$\xi_m = \frac{2p_m}{(m'_1 + m'_3) [\omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2]}. \quad (2.53)$$

Для волн типа $(kl)_m = m\pi + 2,225$ имеем

$$\xi_m = \frac{0,424 p_m}{(0,176 m'_1 + 0,306 m'_3) [\omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2]}. \quad (2.54)$$

В случае, когда массы пластин одинаковы, т.е. $m'_1 = m'_3$, выражения (2.53) и (2.54) соответственно будут иметь вид

$$\xi_m = \frac{p_m}{m' [\omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2]}, \quad (2.53a)$$

$$\xi_m = \frac{0,88 p_m}{m' [\omega_m^2 (1 + i\eta) - \omega^2]}. \quad (2.54a)$$

Излучаемая акустическая мощность определяется величиной колебательной скорости каждой материальной точки. Колебательная скорость материальных точек участвующих в процессе гармонических колебаний однозначно определяется выражением

$$V = i\omega \xi \quad (2.55)$$

Для расчета излучаемой мощности требуется определить квадрат колебательной скорости. Величина квадрата колебательной скорости определяется для обоих типов волн, участвующих в процессе собственных колебаний.

Для $(kl)_m = m\pi$; при $m'_1 = m'_3 = m'$, имеем

$$V_m^2 = \frac{p^2 \omega^2}{m'^2 \left[-\omega^2 \eta - i(\omega^2 - \omega_m^2) \right]^2} \quad (2.56)$$

Применив выражение (2.56) для единичного интервала частот, при замене $[M] = m'_1 + m'_3$; и $m'_1 = m'_3 = m'$ имеем

$$\bar{V}_m^2 = \frac{4\bar{p}_m^2}{\Delta\omega[M]^2} \int_0^\infty \frac{\omega^2 d\omega}{\left[-\omega^2 \eta - i(\omega^2 - \omega_m^2) \right]^2} \quad (2.57)$$

При возбуждении конструкции диффузным звуком в интервале “ $\Delta\omega$ ” усредненный квадрат колебательной скорости определится выражением

$$\bar{\bar{V}}_m^2 = \frac{4}{\Delta\omega[M]^2} \sum_{m_n}^{m_e} \bar{p}_m^2 \int_0^\infty \frac{\omega^2 d\omega}{\left[-\omega^2 \eta - i(\omega^2 - \omega_m^2) \right]^2} \quad (2.58)$$

После раскрытия интеграла величина усредненного квадрата колебательной скорости имеет вид

$$\bar{\bar{V}}_m^2 = \frac{2\pi \tilde{\bar{p}}_e^2}{[M]^2 \eta \omega_m \Delta\omega}, \quad (2.59)$$

где ω_m - среднегеометрическая круговая частота; η - коэффициент потерь;

$$\tilde{\bar{p}}_e^2 = \sum_{m_n}^{m_e} \bar{p}_m^2.$$

Из соотношения (2.59) видно, что квадрат колебательной скорости и коэффициент потерь имеют между собой обратно пропорциональную связь.

Излучаемая акустическая мощность пропорциональна квадрату звукового давления. Считая квадрат звукового давления, как сумму давлений падающих на

элемент конструкции звуковых волн в пределах телесного угла между конусами, образующие которых наклонены к нормали под углами θ_n и θ_s , можно определить

$$\tilde{p}_s^2 = 2p^2 \int_{\theta_s}^{\theta_n} \cos\theta \sin\theta d\theta = p^2 (\cos 2\theta_s - \cos 2\theta_n) \quad (2.60)$$

В формуле (2.60), так как рассматривается диффузное звуковое поле, p – звуковое давление диффузного поля.

Для случая, когда $(kl)_m = m\pi + 2,225$, имеем

$$\bar{V}_m^2 = \frac{0,18\omega^2 p_m^2}{[\mu]^2 [-\eta\omega^2 - i(\omega^2 - \omega_m^2)]^2}, \quad (2.61)$$

где $[\mu] = 0,176m'_1 + 0,306m'_3 = 0,482m'$; $m'_1 = m'_3 = m'$.

Для произвольного частотного интервала “ $\Delta\omega$ ” – можно получить

$$\bar{\bar{V}}^2 = \frac{0,18}{\Delta\omega[\mu]^2} \sum_{m_s} \bar{p}_m^2 \int_0^\infty \frac{\omega^2 d\omega}{[-\omega\eta - i(\omega^2 - \omega_m^2)]^2} \quad (2.62)$$

Избавляясь от знака суммы и раскрывая значение интеграла для высокочастотного диапазона, находим величину квадрата колебательной скорости

$$\bar{\bar{V}}^2 = \frac{0,18\pi \tilde{p}_s^2}{[\mu]^2 2\eta\Delta\omega\omega_m}. \quad (2.63)$$

Учитывая, что $\tilde{p}_s^2 = p^2 (\cos 2\theta_s - \cos 2\theta_n)$, имеем

$$\bar{\bar{V}}^2 = \frac{0,09\pi p^2 (\cos 2\theta_s - \cos 2\theta_n)}{[\mu]^2 \eta\Delta\omega\omega_m}. \quad (2.64)$$

Произведя аналогичные вычисления для другого типа волн, когда $(kl)_m = m\pi$ имеем

$$\bar{\bar{V}}^2 = \frac{2\pi p^2 (\cos 2\theta_s - \cos 2\theta_n)}{[\mu]^2 \eta\Delta\omega\omega_m}. \quad (2.65)$$

Понятие диффузного звукового поля, согласно теоретическим выводам и экспериментальной проверке, выполненной в [85], не распространяется на звуко-

вые поля плоских воздушных объёмов для нормируемого по требованиям звукоизоляции диапазона частот при толщине воздушного зазора менее 0,2 м. В этом случае прохождения звука через двойное ограждение следует рассматривать с точки зрения ослабления звукового давления из-за наличия воздушного зазора.

Давление в волне, прошедшей через воздушный зазор определяем с использованием расчетной схемы на рисунке 2.1.

Величина давления в прошедшей звуковой волне определяется выражением $p = p_0 \cos(2kd \cos \theta)$.

Суммарная излучаемая звуковая энергия изменится на определенную величину, связанную с изменением звукового давления из-за сдвига фаз колебаний звуковых волн при прохождении воздушного зазора. При этом суммарная излучаемая мощность с заданной стороны определяется соотношением

$$W_{изл} = \frac{(p_0 c_0)^2 \bar{S} ab \pi^2 (\cos 2\theta_v - \cos 2\theta_n)}{4 \cdot 2\eta \omega \Delta \omega} Q \cdot D_d^2, \quad (2.66)$$

$$\text{Здесь } Q = \frac{1}{[M]^2} + \frac{0,022}{[\mu]^2}; \quad (2.67)$$

$$D_d = \cos(2kd \cos \theta); \quad (2.68)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{\Delta f} \left(f_v \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_v}} - f_n \sqrt{1 - \frac{f_{zp}}{f_n}} \right). \quad (2.69)$$

В формуле (2.66) D_d - численная добавка, величина которой зависит от изменения звукового давления при прохождении волн через воздушный промежуток.

Рассмотрим подробнее значение этой добавки.

Из рисунка 2.1 видно, что $\cos \theta$ в формуле (2.68) будет равен $\cos \theta = \frac{d}{l_{cp}}$, где

l_{cp} - средняя длина свободного пробега волны в воздушном зазоре. Величина l_{cp}

равна $l_{cp} = T_{cp} c_0 = \frac{c_0}{f_{cp}} = \frac{c_0}{\sqrt{f_n \cdot f_v}}$, тогда $\cos \theta$ определяется как:

$$\cos \theta = \frac{d \sqrt{f_n \cdot f_s}}{c_0}.$$

В случае если $k = \frac{\omega_0}{c_0} = \frac{2\pi f_{cp}}{c_0} = \frac{2\pi \sqrt{f_n \cdot f_s}}{c_0}$, величина D_d будет определяться выражением

$$D_d = \cos \left(4\pi \frac{f_n \cdot f_s}{c_0^2} d^2 \right)$$

И, следовательно, добавка к звукоизоляции ограждения будет иметь вид

$$\Delta = 10 \lg \cos^2 \left(\frac{4\pi f_n \cdot f_s}{c_0^2} d^2 \right).$$

Видно, что величина добавки “ Δ ” определяется границами выбранного частотного диапазона и зависит от ширины воздушного зазора.

2.4. Влияние воздушного зазора на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением

По определению, звукоизоляция любого ограждения характеризуется разницей между звуковой энергией, падающей на данное ограждение, и энергией, переизлученной ограждением в режиме собственных колебаний. Численно величина звукоизоляции вычисляется по известной формуле

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2}, \quad (2.70)$$

где W_1 - величина звуковой мощности в падающих волнах; W_2 - излучаемая мощность за счет собственных колебаний ограждения.

Как было ранее показано, излучаемая мощность определяется величиной амплитуды собственных колебаний пластины и степенью согласования вибрационных колебаний пластины с характеристиками внешнего звукового поля. Расчеты показывают, что степень согласования этих характеристик различна для

разных частотных диапазонов. С учетом этих различий расчет звукоизоляции следует производить конкретно для каждого выбранного интервала частот. Весь нормируемый диапазон частот делится на отдельные частотные интервалы: 1) область простых пространственных резонансов; 2) область неполных пространственных резонансов; 3) область полных пространственных резонансов. Учитывая, что механизм самосогласования вибрационных и звуковых полей различен для каждой области, звукоизоляцию следует рассчитывать отдельно для каждой из указанных выше частотных интервалов.

1) Область простых пространственных резонансов. Характерной особенностью этой частотной области является тот факт, что формы распределения звукового давления на поверхность слоистого элемента не совпадают ни с одной из форм собственных колебаний этого элемента.

Согласно с [71], падающая на ограждение звуковая мощность и излучаемая акустическая мощность в данной области определяются выражениями

$$W_1 = \frac{abp^2}{4\rho_0 c_0}, \quad (2.71)$$

$$W_2 = \frac{\rho_0 c_0 \pi}{64} ab \left[1 - \left(\frac{f_{cp}}{f_s} \right)^2 \right] \frac{\bar{S} p^2 D_d^2}{\eta m' \Delta \omega \omega_{m_0 n_0 cp}}, \quad (2.72)$$

где $\rho_0 c_0 = 420 \text{ кг/м}^2$; $\omega = 2\pi f$.

Звукоизоляцию ограждения в этом случае можно записать в виде

$$R = 10 \lg \frac{1,14 m'^2 \eta \Delta f \cdot f}{\left[1 - \left(\frac{f_{cp}}{f_s} \right)^2 \right] \bar{S} \cdot D_d^2}. \quad (2.73)$$

Для третьоктавного диапазона частот, соответственно, имеем

$$R = 10 \lg \frac{5,7 m'^2 \eta \Delta f \cdot f}{10^3 \bar{S}} - \Delta. \quad (2.74)$$

Коэффициент звукоизлучения $\bar{S}$ в формуле (2.74) определяется выражением

$$\bar{\bar{S}} = 0,027\Delta N \frac{m_{cp}^2 n_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2 (n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2}, \quad (2.75)$$

где $\Delta N = \frac{a\beta}{4\pi} (K_{ne}^2 - K_{nn}^2)$ - число учитываемых резонансов в заданном диапазоне частот.

Расчетная формула (2.73) при использовании октавных интервалов частот принимает вид:

$$R = 10 \lg \frac{2,83}{10^3} \frac{m'^2 \eta f \Delta f}{\bar{\bar{S}}} - \Delta. \quad (2.76)$$

Соответственно $\bar{\bar{S}}$ определяется по выражению

$$\bar{\bar{S}} = 0,016\Delta N \frac{m_{cp}^2 n_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2 (n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2}. \quad (2.77)$$

2) Область неполных пространственных резонансов.

К этой области относится диапазон частот в пределах $f_{\Gamma mn_0} \leq f < f_{\Gamma mn}$.

Переизлученная акустическая мощность для этого интервала частот рассчитывается по формуле

$$\bar{W}_2 = \frac{\rho_0 c_0}{2} \frac{4 f_b a b \cos \theta_b}{\Delta f \pi^2} \left[\tilde{V}_{mn_0}^2 \frac{m_b n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} + \tilde{V}_{m_0 n}^2 \frac{n_b m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2} \right] \cdot D_d^2 \quad (2.78)$$

С учетом выражения (2.78), звукоизоляция двойной конструкции из слоистых элементов определится соотношением

$$R = 10 \lg \frac{4 m'^2 \eta \omega m_{(n)} \Delta \omega}{\pi (\rho_0 c_0)^2 \left[1 - \left(\frac{f_{cp}}{f_s} \right)^2 \right] \bar{\bar{S}} \cdot D_d^2}. \quad (2.79)$$

Заменяя в (2.79) $\omega = 2\pi f$, $\rho_0 c_0 = 420 \text{ К}^2/\text{М}^2$, получаем

$$R = 10 \lg \frac{2,8 m'^2 \eta f_{mn_0 cp} \Delta f}{10^4 \bar{\bar{S}} \left[1 - \left(\frac{f_{cp}}{f_s} \right)^2 \right]} - \Delta, \quad (2.80)$$

$$\text{где } \bar{S} = \frac{0,28}{\pi^2} \frac{f_{\epsilon} \cos \theta_{\epsilon}}{\Delta f} \left[m_{\epsilon} \frac{n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} + n_{\epsilon} \frac{m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2} \right] \quad (2.81)$$

При расчете в третьоктавных полосах частот выражение (2.80) будет иметь вид

$$R = 10 \lg \frac{1,4}{10^3} \frac{m'^2 \eta f \Delta f}{\bar{S}} - \Delta, \quad (2.82)$$

$$\text{Здесь } \bar{S} = 0,07 \left[m_{\epsilon} \frac{n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} + n_{\epsilon} \frac{m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2} \right]. \quad (2.83)$$

Для октавных полосах частот величина R будет определяться по выражению

$$R = 10 \lg \frac{5,8 m'^2 \eta f \Delta f}{10^4 \bar{S}} - \Delta, \quad (2.84)$$

а коэффициент звукоизлучения вычисляться по формуле

$$\bar{S} = 0,04 \left[m_{\epsilon} \frac{n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} + n_{\epsilon} \frac{m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2} \right]. \quad (2.85)$$

3) Область полных пространственных резонансов. Акустическая мощность, излучаемая строительной конструкции в области полных пространственных резонансов, рассчитывается по формуле

$$W_2 = \frac{(\rho_0 c_0) \bar{S}}{4} \frac{\pi a b p^2 (\cos 2\theta_{\epsilon} - \cos 2\theta_{\eta})}{2 \eta \Delta \omega \omega_{mn}} \cdot Q \cdot D_d^2 \quad (2.86)$$

В этом случае величина звукоизоляции определяется выражением

$$R = 10 \lg \frac{2 \eta \Delta \omega \omega_{mn}}{\pi (\rho_0 c_0)^2 \bar{S} (\cos 2\theta_{\epsilon} - \cos 2\theta_{\eta}) \cdot Q \cdot D_d^2}, \quad (2.87)$$

$$\text{где } Q = \left(\frac{1}{M^2} + \frac{0,022}{m'^2} \right); \quad M = m'_1 + m'_3.$$

Так как $m'_1 = m'_3 = m'$; $M = 2m'$, величина Q будет равна $Q = \frac{0,272}{m'^2}$ и формула (2.87) определится выражением

$$R = 10 \lg \frac{7,353 \eta \omega \Delta \omega m'^2}{\rho_0^2 c_0^2 \pi S (\cos 2\theta_s - \cos 2\theta_n)} - \Delta \quad (2.88)$$

Величина добавки Δ равна, $\Delta = 10 \lg \cos^2 \left(4\pi \frac{f_n f_s}{c_0^2} d^2 \right)$ учитывает волновые процессы в воздушном зазоре.

Формулу (2.88) можно использовать при расчете звукоизоляции в области полных пространственных резонансов с достаточной для практики точностью.

2.5. Определение граничных частот расчетных областей

Для определения и построения частотных характеристик звукоизоляции в областях простых, неполных и полных пространственных резонансов необходимо знать граничные частоты этих расчетных областей.

Граничная частота полного пространственного резонанса

Анализ уравнения колебаний слоистого элемента [75] показывает, что граничная частота полного пространственного резонанса расположена в высокой области частот, где спектр частот собственных колебаний ограждающей конструкции достаточно плотный. Граничный полный пространственный резонанс считается с достаточной точностью равным граничной частоте волнового совпадения.

Волновое совпадение определится из уравнения [75], при выполнении условия $c_u = \frac{c_0}{\sin \theta}$ с углом $\theta = \frac{\pi}{2}$, и значение граничной частоты вычисляется по формуле

$$f_{\Gamma} = f_{\Gamma mn} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{Nm_3'c_0^2 - (F+T)S + \sqrt{[Nm_3'c_0^2 - (F+T)S]^2 + 4m_3'c_0^2S(FN - TLh_3)}}{2(FN - TLh_3)}}. \quad (2.89)$$

Граничная частота неполного пространственного резонанса

Определяется низшая частота, соответствующая неполному пространственному резонансу. Этот резонанс соответствует числу $n'_{mn_0} = \frac{1}{2}$ или числу $m'_{m_0n} = \frac{1}{2}$. Точное значение частоты неполного пространственного резонанса можно найти из рассмотрения степени совпадения форм собственных колебаний элемента и форм распределения звукового давления в плоскости ограждения

$$\lambda_0 = \frac{2a}{m} \sin \alpha_{mn} \cdot \sin \theta_{mn'}, \quad (2.90)$$

где угол $\alpha_{mn'}$ определится по [75] как

$$\alpha_{mn'} = \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi_{mn'}; \quad \varphi_{mn'} = \arctg \frac{an'}{bm}. \quad (2.91)$$

Отсюда наименьшее значение частоты, которое соответствует условию неполного пространственного резонанса, будет равно $f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0}{\lambda_0}$, где λ_0 – наибольшая проекция длины волн, что возможно при $\theta_{mn'} = \frac{\pi}{2}$ и $m' = m = 1$.

Тогда
$$f'_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0}{2a \sin \alpha_{mn'}}. \quad (2.92)$$

Аналогично при условии, когда $n = n' = 1$, $m' = \frac{1}{2}$, m – произвольно, формула имеет вид

$$f'_{\Gamma m_0n} = \frac{c_0}{2b \sin \alpha_{m'n}}. \quad (2.93)$$

Формулы (2.92) и (2.93) могут использоваться для определения приближенного значения низшей частоты неполного пространственного резонанса. В них не учтен дискретный характер собственных колебаний элемента.

Подставляя значение частоты (2.92) в уравнение (2.5) [75], определим выражение волнового числа $k'_{\Gamma mn_0}$:

$$k'^2_{\Gamma mn_0} = 2r \cos(60 - \phi/3) - \frac{(F+T)S}{3(FN - TLh_3)}, \quad (2.94)$$

где $r = \sqrt{|P|}$; $P = \frac{(TLh_3 - FN)Nm_3' \omega^2 - (F+T)^2 S^2}{3(TLh_3 - FN)}.$

Тогда $k'^2_{\Gamma mn_0}$ запишется как

$$k'_{\Gamma mn_0} = \pi^2 \left(\frac{n'^2}{b^2} + \frac{1}{a^2} \right). \quad (2.95)$$

Приравнивая правые части выражений (2.94) и (2.95) между собой, определим значение n'' , соответствующее частоте $f'_{\Gamma mn_0}$ и $m=1$

$$n'' = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{a^2}{\pi^2} \left[2r \cos(60 - \phi/3) - \frac{(F+T)S}{3(FN - TLh_3)} \right]} - 1. \quad (2.96)$$

Целочисленное значение находим как

$$n = n'' + O_n(f'_{\Gamma mn_0}), \quad (2.97)$$

где $O_n(f'_{\Gamma mn_0})$ – нерегулярная ступенчатая функция, положительная по значению и равная порядку единицы по величине.

Точное значение частоты граничного неполного пространственного резонанса находится из выражения:

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{k'^2_{\Gamma mn_0}}{2\pi} \sqrt{\frac{(FN - TLh_3)k'^2_{\Gamma mn_0} + (F+T)S}{m_3'(Nk'^2_{\Gamma mn_0} + S)}}, \quad (2.98)$$

где $k'^2_{\Gamma mn_0} = \pi^2 \left(\frac{b^2 + a^2 n^2}{a^2 b^2} \right)$; n – величина, определяемая по зависимости (2.97).

Для другого случая неполного пространственного резонанса аналогично определим выражение числа m'' , соответствующего частоте $f'_{\Gamma m_0 n}$ и $n=1$. Получим:

$$m'' = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{b^2}{\pi^2} \left[2r \cos(60 - \phi/3) - \frac{(F+T)S}{3(FN - TLh_3)} \right]} - 1. \quad (2.99)$$

Отсюда точное значение граничной частоты неполного пространственного резонанса при $m = m'' + O_m(f'_{\Gamma m_0 n})$ запишется:

$$f_{\Gamma m_0 n} = \frac{k_{\Gamma m_0 n}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{(FN - TLh_3)k_{\Gamma m_0 n}^2 + (F + T)S}{m_3'(Nk_{\Gamma m_0 n}^2 + S)}}, \quad (2.100)$$

$$\text{где } k_{\Gamma m_0 n}^2 = \pi^2 \left(\frac{a^2 + b^2 m^2}{a^2 b^2} \right). \quad (2.101)$$

Тогда за значение частоты неполного пространственного резонанса принимается наименьшее значение частоты, определенное по формулам (2.98) и (2.100).

На данных частотах есть провал масса-упругость-масса, который практически совпадает с неполным пространственным резонансом.

Граничная частота простого пространственного резонанса

Для случая, когда составляющие характеристик волновых полей не согласуются, но при этом амплитуда вынужденных колебаний ограждения максимальна, резонансные частоты определяются при рассмотрении совместной картины звуковых и вибрационных полей с распределением звукового давления на площади ограждения с формой $m' = 1/2; n' = 1/2$.

Имеем

$$\frac{\lambda_0}{2 \sin \theta_{m'n'}} = \frac{a}{m'} \sin \alpha_{m'n'}. \quad (2.102)$$

Получаем длину звуковой волны

$$\lambda_0 = \frac{2a}{m'} \sin \alpha_{m'n'} \sin \theta_{m'n'}, \quad (2.103)$$

где угол $\alpha_{m'n'}$ равен

$$\alpha_{m'n'} = \frac{\pi}{2} - \varphi_{m'n'}; \quad (2.104)$$

$$\varphi_{m'n'} = \arctg \frac{a}{b} \frac{n'}{m'}. \quad (2.105)$$

Граничная частота для заданных углов падения звуковых волн $\theta_{m'n'}$ и размеров ограждения равна

$$f'_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0 m'}{2a \sin \alpha_{m'n'} \sin \theta_{m'n'}}. \quad (2.106)$$

Для низшей частоты, когда $\theta_{m'n'} = \frac{\pi}{2}$ $m' = \frac{1}{2}$,

$$f_{\Gamma m_0 n_0} = \frac{c_0}{4a}. \quad (2.107)$$

Полученные значения граничных частот расчетных областей определяют три частотные участка, в каждом из которых звукоизоляция управляется поверхностной плотностью, частотой звука, коэффициентом потерь и зависит от размеров ограждающей конструкции и её жесткостных параметров.

Выводы по главе 2

1. Предлагаемый волновой метод при исследовании процессов излучения слоистыми элементами в двойных ограждающих конструкциях даёт возможность рассчитать излучаемую мощность колеблющейся конструкции.

2. При решении задачи о собственных колебаниях волновой подход показывает, что механизм излучения слоистого элемента различен для простых, неполных и полных пространственных резонансов. В связи с этим, при расчете звукоизоляции необходимо учитывать разделение нормируемого диапазона частот на соответствующие области.

3. Показано, что в случае сдвиговых деформаций в промежуточном вибропоглощающем слое прирост скорости изгибных волн при повышении частоты существенно замедляется и смещает граничную частоту волнового совпадения в область более высоких частот.

4. Установлено, что величина добавки “Δ” определяется границами выбранного частотного диапазона и зависит от ширины воздушного зазора двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов.

5. Оценка прохождения звука через двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов в условиях согласования вибрационного поля колеблющего-

ся ограждения и звукового поля окружающего пространства показала возможность регулирования звукоизоляции ниже и выше граничной частоты волнового совпадения с помощью изменения коэффициента потерь, жесткости и размеров ограждения в плане.

6. Полученные выражения для определения звукоизоляции и граничных частот расчетных областей могут быть применены для расчёта предельной звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов с вибропоглощением, что позволит проектировать данные конструкции более рационально. Подтверждение полученных расчетных формул представлено в главе 3.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В качестве внутренних перегородок в гражданских зданиях в настоящее время используются двойные ограждающие конструкции с применением в их составе слоистых элементов из листов гипсокартонных или гипсоволокнистых, соединенных "насухо" с воздушным зазором (ВЗ) и при его заполнении звукопоглощающим материалом (ЗПМ). Данные конструкции можно использовать более эффективно, применяя слоистые элементы с вибропоглощением и заполняя воздушный зазор звукопоглощающим материалом с увеличенной площадью поверхности. При соответствующем соотношении перечисленных параметров можно получить увеличение звукоизолирующих характеристик двойных ограждающих конструкций. Для получения конструкций с улучшенными звукоизолирующими характеристиками необходимо проведение экспериментальных исследований, позволяющих оценить влияние различных факторов на их звукоизоляцию. В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований звукоизолирующих характеристик двойных ограждений из слоистых элементов, выполненных в реверберационных помещениях Вологодского государственного университета с целью установления степени влияния различных факторов на изоляцию воздушного шума этими конструкциями.

3.1. Методика проведения экспериментальных исследований звукоизоляции двойных ограждающих конструкций в больших реверберационных помещениях

Экспериментальные исследования звукоизолирующих характеристик двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов производились в ревербе-

рационных помещениях Вологодского государственного университета. Конструктивное решение помещений представлено на рисунках 3.1 и 3.2.

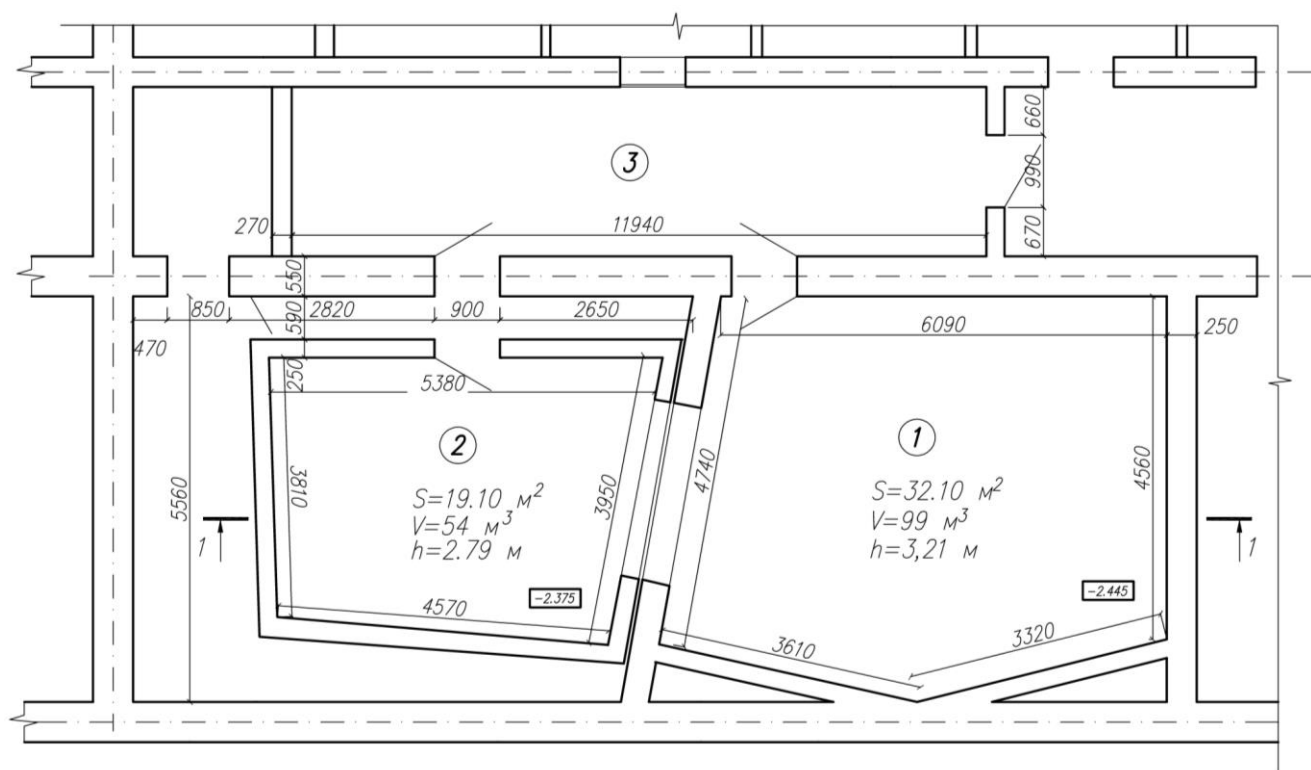


Рисунок 3.1 – План больших реверберационных помещений ВоГУ: 1 - помещение высокого уровня (ПВУ); 2 - помещение низкого уровня (ПНУ); 3 – аппаратная

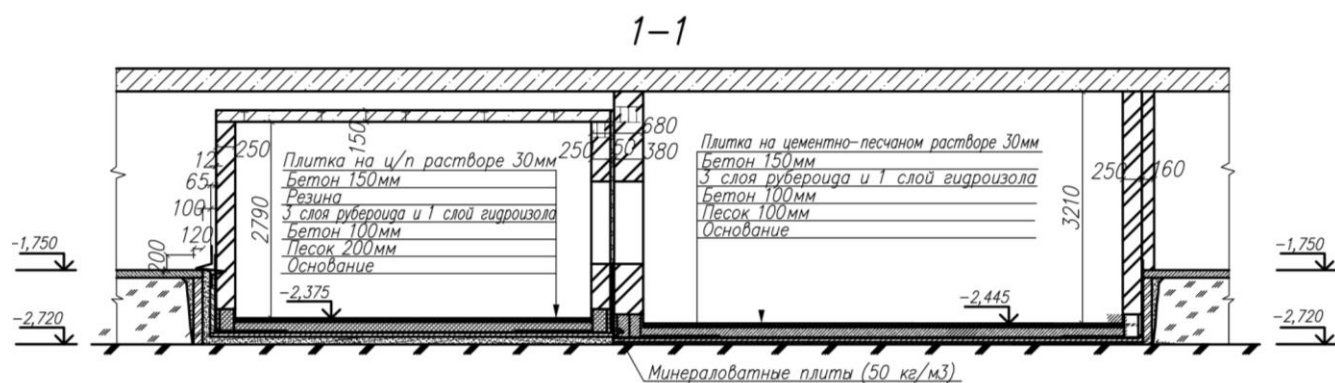


Рисунок 3.2 - Разрез больших реверберационных помещений ВоГУ

Реверберационные помещения для исследования ограждающих конструкций в лабораторных условиях отвечают требованиям ГОСТ 27296-2012 [24], а именно:

- состоят из двух смежных по горизонтали помещений, разделенных ограждением с проемом для монтажа образцов испытываемых конструкций;
- исключают возможность косвенной передачи звука;
- не имеют различия между собой по габаритам и объему более чем на 10%;
- время реверберации в испытываемых помещениях изменяется по частотам от 6,5 до 1,8 с, что свидетельствует о малом звукопоглощении в ПНУ;
- уровень собственного шума в ПНУ составляет 17 дБ;
- площадь проёма для испытываемой конструкции составляет 9,0 м²;
- собственная звукоизоляция больших испытательных (реверберационных) помещений составляет 93дБ;
- для обеспечения диффузного звукового поля, ПВУ и ПНУ выполнены не-правильной формы.

Реверберационные помещения оборудованы акустической аппаратурой:

- двухканальный модульный анализатор 2260 фирмы “Брюль и Кьер” со встроенным генератором шума;
- три усилителя MAKRO 1400;
- всенаправленный источник звука 4292-L фирмы “Брюль и Кьер”.

Измерения выполнялись в 6 точках объема ПВУ и ПНУ. В каждой точке определялся уровень звука (L_{m1} в ПВУ и L_{m2} в ПНУ), а так же уровень фоновых шумов в ПНУ (уровень B_2), который требуется для коррекции уровня L_{m2} при расчетах воздушной изоляции. Так же при измерениях в ПНУ определялось время реверберации.

Изоляция воздушного шума ограждающими конструкциями (R , дБ) рассчитывалась по формуле [22]

$$R = L_{m1} - L_{m2} + 10 \lg \frac{S}{A_2}, \quad (3.1)$$

где L_{m1} и L_{m2} - средние уровни звукового давления в третьоктавной полосе частот в помещениях высокого и низкого уровней соответственно, дБ; S - площадь испытуемой конструкции со стороны помещения низкого уровня, м²; A_2 - общее звукопоглощение в помещении низкого уровня, м².

Выполненные исследования характеристик звуковых полей в реверберационных помещениях ВоГУ свидетельствуют о наличии необходимых условий, обеспечивающих достаточную точность и надежность измерений при исследовании звукоизоляции конструкций [40].

При исследовании двойных конструкций из слоистых элементов ограждение устанавливалось в проем с креплением, которое имитирует шарнирное соединение. Для этого зазор между ограждением и проемом заделывался гипсовым раствором, что позволяло исключить существенное демпфирование по краям исследуемой конструкции [47].

3.2. Методика определения коэффициента потерь и динамического модуля упругости вибропоглощающих материалов и конструкций, используемых при экспериментальных исследованиях

При расчёте звукопоглощающих ограждающих конструкций с вибропоглощением необходимо учитывать динамические характеристики вибропоглощающего материала. К таким характеристикам относятся динамический модуль упругости и коэффициент потерь.

В работе для определения динамических характеристик использован резонансный метод. Метод применен при исследованиях коэффициента потерь и динамического модуля упругости материалов и конструкций, использованных в работе при экспериментальных исследованиях. Измерения проводились с помощью прибора изгибных волн фирмы «Брюль и Кьер» типа 3930 на испытательном стенде, который разработан доктором Оберстом. На рисунке 3.3 представлен из-

мерительный тракт, состоящий из измерительного усилителя, прибора изгибных волн типа 3930, самописца уровня и генератора сигналов [58].

Прибор изгибных волн типа 3930 представляет собой точное механическое приспособление, имеющее два зажима для фиксации исследуемых образцов и два электромагнитных преобразователя. Синусоидальный сигнал подается с генератора на электромагнитный преобразователь и возбуждает в образце изгибные колебания. Второй датчик улавливает изгибные колебания стержня, затем преобразует их в электрический сигнал, который потом усиливается и подается на самописец уровня. На ленте самописца отображаются изгибные колебания стержня в соответствии с частотой возбуждения. С помощью измерительного тракта частота генератора синхронизируется с сеткой частот, которая нанесена на ленту самописца уровня. Это позволяет точно определять частоты пиков и спадов резонансной кривой. Далее по соответствующим формулам рассчитывается коэффициент потерь материала.

Недостатком данной методики является трудность определения частоты колебания исследуемого образца с ленты самописца, так как лента имеет логарифмический масштаб частоты (рисунок 3.4). Еще имеются трудности работы с самописцем уровня, связанные с изменением длины ленты из-за ее влажности и возможным несоответствием частоты возбуждения образца с частотной сеткой на ленте самописца в процессе работы и др.

Для исключения указанных недостатков, к измерительному тракту были добавлены частотомер, чтобы точно определять частоты возбуждения образца и электронный вольтметр, чтобы находить пик и спад на 3 дБ резонансной кривой. За счет добавленных устройств измерительный тракт может определять частоты резонансной кривой с точностью до 0,1 Гц на всех частотных диапазонах.

Так как в процессе измерения исследуемый образец возбуждается синусоидальным сигналом, и исследуется линейный процесс его возбуждения, еще дополнительно использован электронно-лучевой осциллограф для визуального кон-

троля возможных искажений в тракте. На рисунке 3.3 изображена схема измененного тракта. За счет внесения дополнительных устройств в состав измерительного тракта достигается необходимая точность измерений, и исключаются ошибки, которые связаны с нелинейными процессами возбуждения исследуемого образца.

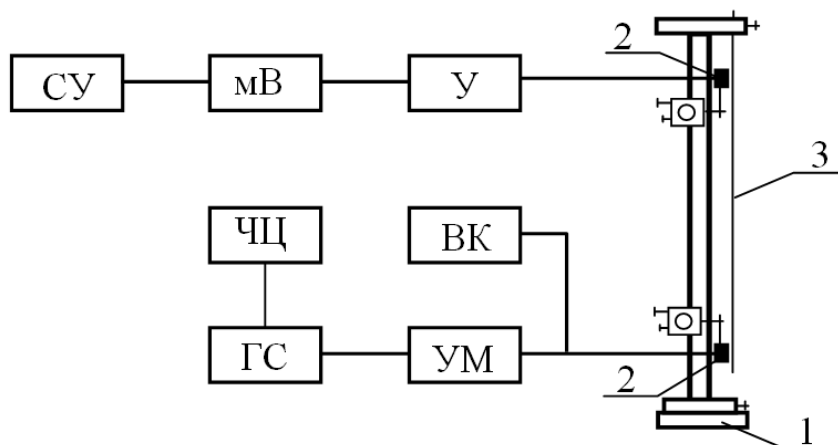


Рисунок 3.3 - Схема установки для измерения динамических характеристик слоистых элементов с вибропоглощением: ГС – генератор сигналов 03008; ЧЦ – частотомер цифровой; УМ – усилитель мощности УМ-50А; ВК – вольтметр контрольный; У – усилитель М60Т; мВ – милливольтметр ВМ-512; СУ – самописец уровня 02013; 1 – прибор изгибных волн типа 3930; 2 – магнитные преобразователи М0002; 3 – исследуемый образец

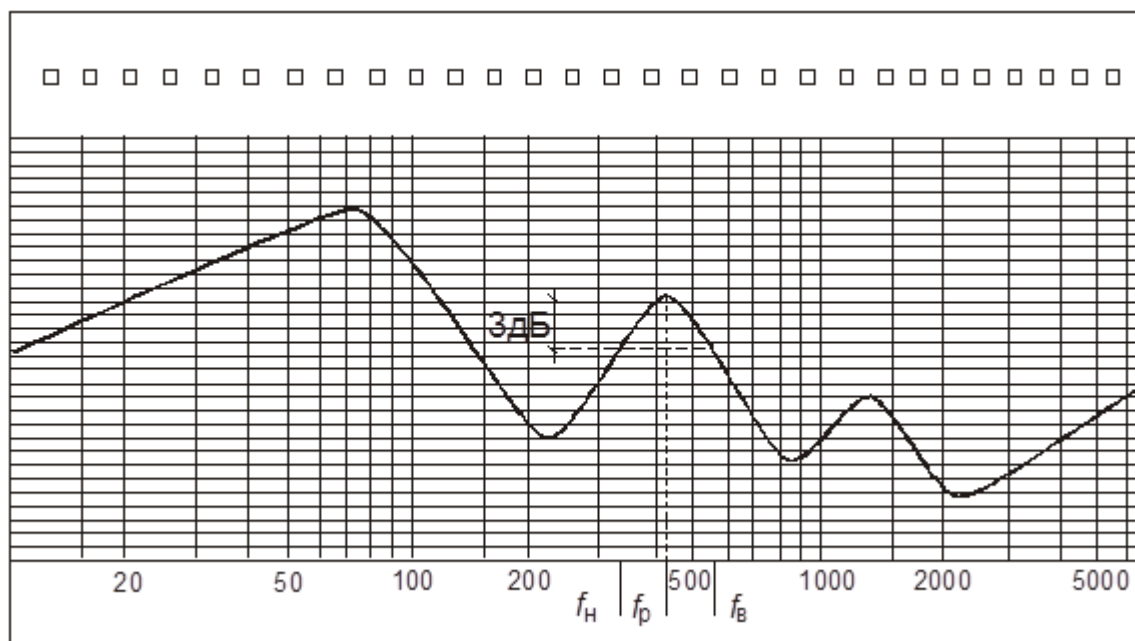


Рисунок 3.4 - Полная кривая резонансов исследуемого образца f_H – нижняя граничная частота, Гц; f_P – частота резонансов, Гц; f_B – верхняя граничная частота, Гц

Образцы материалов в форме стержней с прямоугольным поперечным сечением при максимальной ширине 12 мм и свободной длине до 380 мм исследовались на описанной выше установке.

Динамический модуль упругости определялся по формуле [58]

$$E_q = \left(\frac{f_n}{\beta_n} \right)^2 \times \left(4\pi\sqrt{3\rho} \frac{\ell^2}{h} \right)^2, \quad (3.2)$$

где ℓ - длина стержня; h - толщина стержня; ρ - плотность материала стержня; f_n - резонансная частота n -й моды колебаний стержня; β_n - число, зависящее от номера моды (табл. 13 [58]).

По резонансной кривой на ленте самописца (рисунок 3.4) находится коэффициент потерь с применением формулы

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n}, \quad (3.3)$$

где Δf_n - ширина резонансной кривой на 3 дБ ниже резонанса, Гц.

Так же динамические характеристики материалов определялись с помощью приборов российского производства по методике, изложенной в ГОСТ 16297-80 [23].

На установке, блок-схема которой изображена на рисунке 3.5, исследовали динамический модуль упругости и коэффициент потерь.

Динамический модуль упругости E_q , H/m^2 , для материалов и конструкций определялся по формуле [58].

$$E_q = \frac{4\pi^2 f^2 M h}{F}, \quad (3.4)$$

где f - частота резонанса, Гц; M - масса груза, кг; h - высота образца под нагрузкой, м; F - общая площадь одновременно испытываемых образцов, m^2 .

Коэффициент потерь в этом случае определялся по формуле

$$\eta = \frac{1}{\left[\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^{0,5}}, \quad (3.5)$$

где a_1 - амплитуда ускорения, м/с^2 (или скорости, м/с , или смещения, м) столика вибратора при частоте колебания 5 Гц; a_2 - амплитуда ускорения, м/с^2 (или скорости, м/с , или смещения, м) при частоте резонанса f .

Исследования динамических характеристик вибропоглощающих материалов, использованных при эксперименте, представлены в п. 3.7.

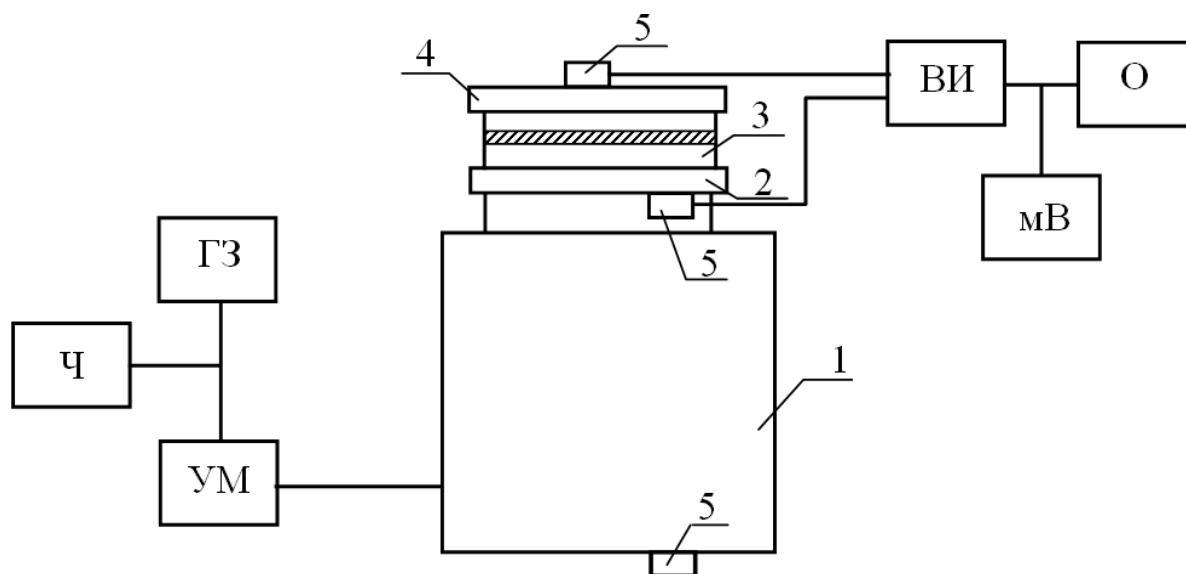


Рисунок 3.5 - Блок-схема для определения динамических характеристик материалов: 1 - электродинамический вибратор 11015 RFT; 2 - столик вибратора; 3 - исследуемый образец; 4 - груз; 5 - вибродатчик KD-35; ГЗ - генератор звука ГЗ-34; УМ - усилитель мощности LV-103; Ч - частотомер ЧЗ-34; О - осциллограф; ВИ - виброизмеритель; мВ - милливольтметр

3.3. Программа исследования факторов, влияющих на звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов

В практике строительства для обеспечения нормативных требований звукоизоляции двойных ограждающих конструкций существует несколько конструктивных приемов:

1) увеличение количества листов обшивки, что приводит к дополнительному расходу материала и к повышению поверхностной плотности конструкции;

2) использование двойного каркаса из стоечных профилей, который увеличивает поперечное сечение ограждения, в результате уменьшается площадь помещений;

3) применение слоистых элементов с вибропоглощением без значительного увеличения поверхностной плотности и толщины ограждающей конструкции.

В настоящее время применение слоистых элементов с вибропоглощением в двойных ограждениях имеет незначительный опыт использования, связано это с недостаточным объёмом исследований по влиянию вибропоглощения на звукоизоляцию двойных ограждений с учётом их конструктивных параметров и физико-механических характеристик материалов. В связи с этим, для выявления всех факторов, влияющих на звукоизолирующие характеристики двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением, выполнен комплекс взаимосвязанных экспериментальных исследований.

Первыми выполнялись исследования по влиянию способа крепления слоистых элементов между собой на звукоизоляцию двойных ограждений. Результат этих исследований позволил подобрать оптимальное конструктивное решение для крепления слоистых элементов в ограждении, которое использовалось при всех дальнейших измерениях.

Для оценки влияния параметров слоистых элементов с вибропоглощением и элементов без вибропоглощения, на звукоизоляцию двойного ограждения исследования производились со слоистыми элементами, которые выполнены из таких материалов как ГКЛ, ЦСП, ОСП, различающихся между собой поверхностной плотностью, толщиной и физико-механическими характеристиками. Выполнялись исследования влияния на звукоизоляцию двойного ограждения плотности и площади звукопоглощающего материала, а также влияния расстояния между слоистыми элементами на звукоизоляцию двойного ограждения. При оценке звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением, выполнены исследования влияния вибропоглощающих характеристик мастик, которые соединяют листы. Все экспериментальные исследования выполнялись с неза-

полненным воздушным зазором (ВЗ) и при заполнении его звукопоглощающим материалом (ЗПМ).

Программа исследований влияния параметров двойных ограждающих конструкций и физико-механических характеристик их элементов на величину звукоизоляции ограждений представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Программа исследования влияния параметров двойных ограждений из слоистых элементов на величину звукоизоляции

№ п/п	Исследуемые параметры двойных ограждающих конструкций	Вид измерений звукоизоляции
1	2	3
1	Оценка влияния вида крепления слоистых элементов в ограждении на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения при жестком линейном креплении слоистых элементов из листов, соединенных "насухо" или склеенных вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом; - измерение звукоизоляции ограждения при виброизолированном линейном креплении слоистых элементов из листов, соединенных "насухо" или склеенных вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом.
2	Оценка влияния плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения из слоистых элементов с листами, соединенными "насухо" или склеенными вибропоглощающей мастикой с заполнением зазора между ними звукопоглощающим материалом различной плотности.
3	Оценка влияния расстояния между слоистыми элементами на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения из слоистых элементов с листами, соединенными "насухо" или склеенными вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом.

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
4	Оценка влияния площади звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения из слоистых элементов с листами, соединенными "насухо" или склеенными вибропоглощающей мастикой с заполнением зазора между ними звукопоглощающим материалом с различной площадью поверхности.
5	Оценка влияния характеристик вибропоглощающей мастики слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения из слоистых элементов при листовых материалах склеенных различными вибропоглощающими мастиками с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом.
6	Оценка влияния поверхностной плотности слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения	- измерение звукоизоляции ограждения при листовых материалах различной поверхностной плотности, соединенных «насухо» или склеенных вибропоглощающей мастикой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом.

3.4. Экспериментальные исследования звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов

Экспериментальные исследования проводились на фрагментах двойных ограждений из слоистых элементов. Элементы состояли из двух листов, соединенных «насухо» или склеенных вибропоглощающей мастикой. Соединение элементов между собой в ограждении выполнялось через металлический каркас. Пространство между элементами в одном случае было без заполнения (воздушный зазор), в другом заполнялось звукопоглощающим материалом. Слоистые элементы выполнены из гипсокартонных листов (ГКЛ), цементно-стружечных плит (ЦСП) и ориентированно-стружечных плит (ОСП) с различной толщиной и поверхностной плотностью. В качестве вибропоглощающего материала

использовались мастики Акцент-117, Грин Глу, а в качестве звукопоглощающего материала использовались минераловатные плиты Rockwool акустик баттс и Isover «Тихий Дом» с объемной плотностью 45 и 15 кг/м³ соответственно.

3.4.1. Влияние вида крепления слоистых элементов в ограждении на звукоизоляцию двойного ограждения

Известно, что на звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций влияет наличие линейной связи из стоечных профилей между слоистыми элементами [11, 15, 66]. Крепление слоистых элементов между собой может быть двух видов: жестким или упругоподатливым [51, 52, 58, 59, 63, 66].

Для исследования влияния вида крепления слоистых элементов на звукоизолирующую способность двойных ограждений были проведены измерения с линейным соединением при жестком и податливом креплении. При жестком линейном креплении использовались стандартные гнутые профили (рисунок 3.6 а). При податливом креплении нами был предложен виброизолированный профиль, представленный на рисунке 3.6 б. Данный профиль обеспечивает разобщение слоистых элементов. Слоистые элементы крепятся к профилю саморезами в соответствии с существующим технологическим регламентом. Профили монтировались с шагом 0,6 м.

Эксперименты проводились на ограждении размером 2,5 х 1,2 м. из листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 толщиной 1 мм и листов ГКЛ без мастики, соединенных «насухо» с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом Rockwool акустик баттс толщиной 50 мм, плотностью 45 кг/м³.

На рисунках 3.7-3.8 приведены полученные при эксперименте частотные характеристики звукоизоляции двойных ограждающих конструкций с жестким линейным и виброизолированным линейным креплением слоистых элементов в ограждении. На основании частотных характеристик звукоизоляции, определены индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ двойных ограждений из слоистых

элементов и установлена степень влияния вида линейного крепления слоистых элементов в ограждении на звукоизоляцию.

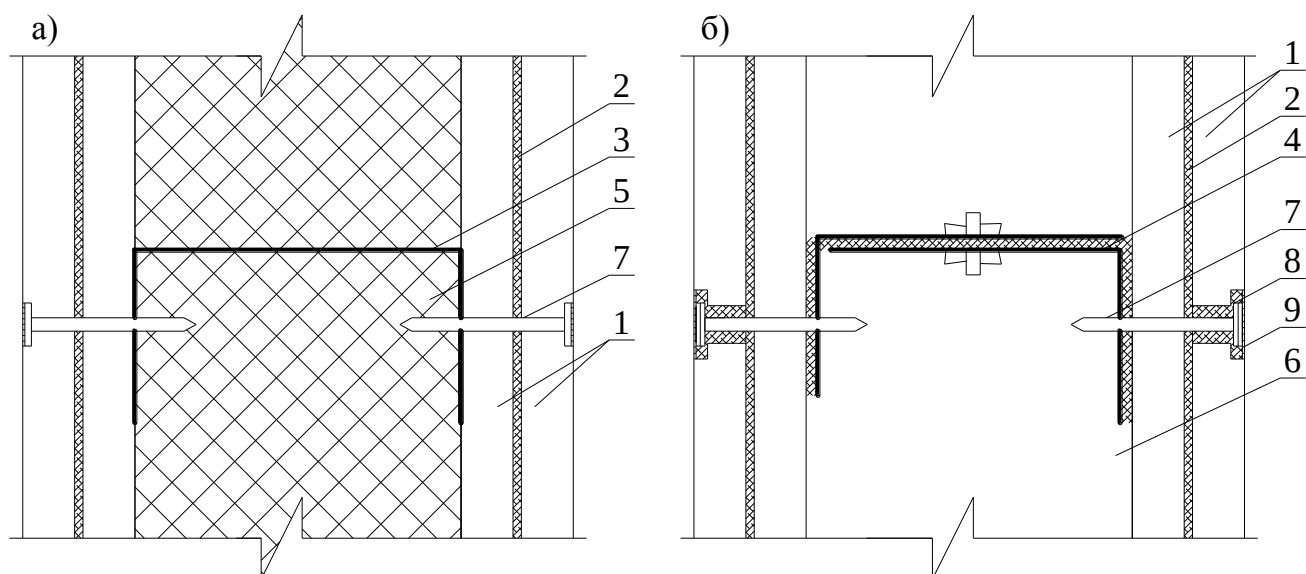


Рисунок 3.6 – Виды крепления слоистых элементов между собой в двойном ограждении: а – жесткое линейное; б – виброизолированное линейное; 1 – обшивочные листы; 2 – вибропоглощающий материал; 3 – направляющий профиль каркаса; 4 – виброизолированный профиль; 5 – звукопоглощающий материал; 6 – воздушный зазор; 7 – саморез; 8 – шайба; 9 – гипсовый раствор

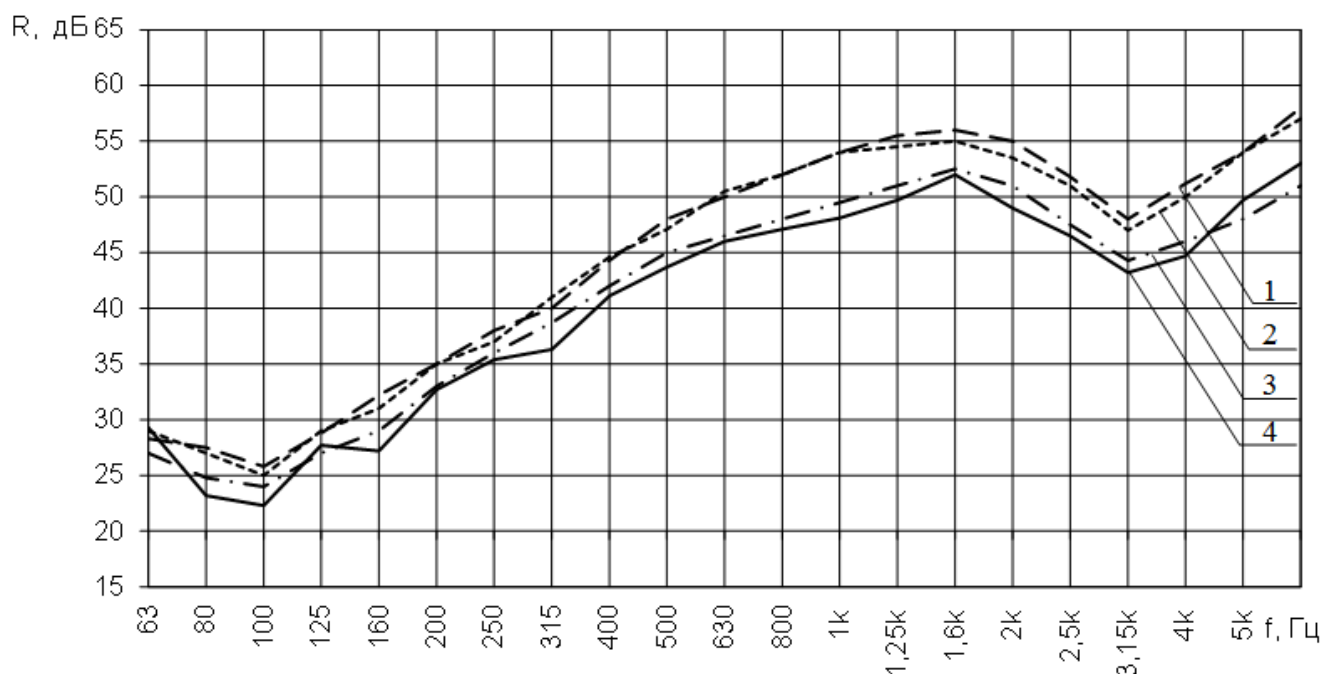


Рисунок 3.7 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – виброизолированное линейное крепление, листы склеены Акцент-117, $R_w = 48$ дБ; 2 – жесткое линейное крепление, листы склеены Акцент-117, $R_w = 48$ дБ; 3 – виброизолированное линейное крепление, листы соединены «насухо», $R_w = 46$ дБ; 4 – жесткое линейное крепление, листы соединены «насухо», $R_w = 45$ дБ

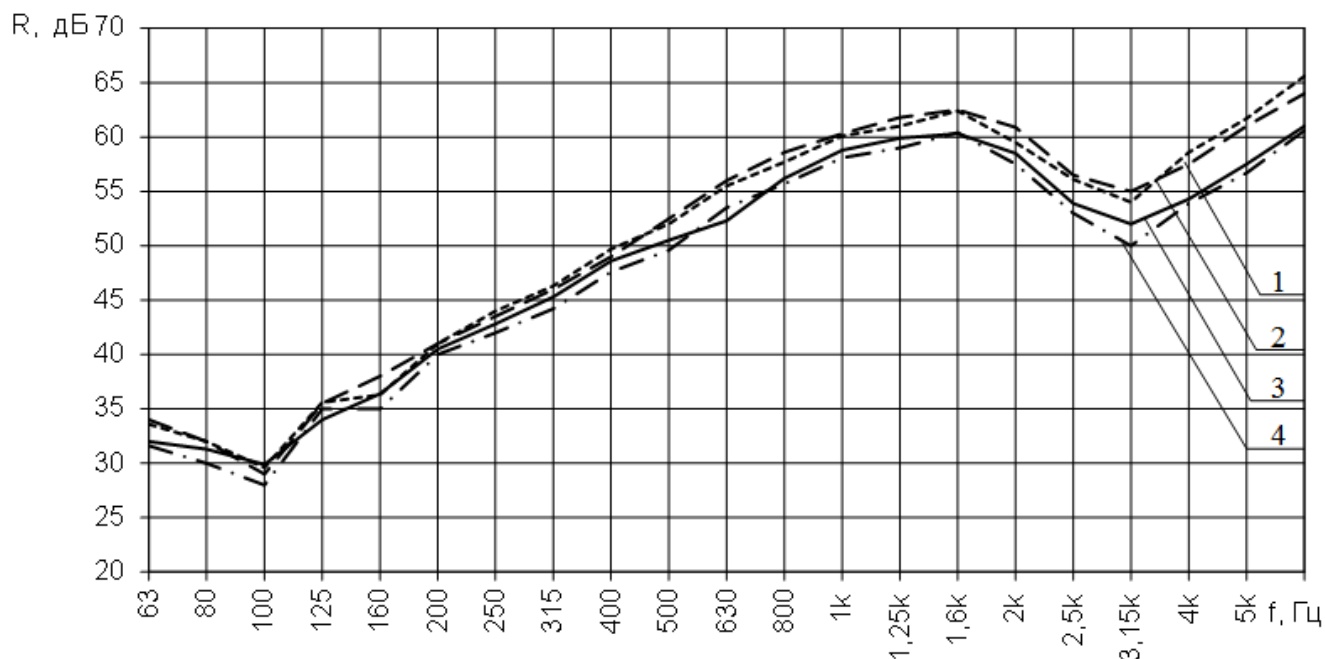


Рисунок 3.8 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ЗПМ толщиной 50 мм: 1 – виброизолированное линейное крепление, листы склеены Акцент-117, $R_w = 53$ дБ; 2 – жесткое линейное крепление, листы склеены Акцент-117, $R_w = 53$ дБ; 3 – виброизолированное линейное крепление, листы соединены «насухо», $R_w = 52$ дБ; 4 – жесткое линейное крепление, листы соединены «насухо», $R_w = 51$ дБ

Результаты влияния вида крепления на звукоизоляцию ограждения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Влияние вида линейного крепления слоистых элементов в ограждении на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

№ п/п	Вид крепления слоистых элементов в ограждении	Размер зазора между слоистыми элементами, мм	Вид заполнения зазора	Индекс изоляции воздушного шума R _w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с листами:	
				соединенными «насухо»	склеенными ВПМ
1	Жесткое линейное крепление	50	ВЗ	45	48
			ЗПМ	51	53
2	Виброизолированное линейное крепление		ВЗ	46	48
			ЗПМ	52	53

Анализируя представленные частотные характеристики и результаты таблицы 3.2, можно видеть, что использование виброизолированного линейного крепления в сравнении с традиционным жестким креплением незначительно ока-

зывает влияние на звукоизоляцию двойных ограждений. Индекс изоляции воздушного шума увеличивается на 1 дБ за счёт виброизолированного линейного крепления только у двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо». Данное изменение звукоизоляции происходит за счет устранения звуковых мостиков между слоистыми элементами в ограждении.

Так как в работе исследуются конструкции из слоистых элементов с вибропоглощением, поэтому все дальнейшие экспериментальные исследования выполнялись на образцах двойных ограждений с жестким линейным креплением, что позволит лучше выявить его характеристики при меньших погрешностях, которые могут возникать при виброизолированном креплении.

3.4.2. Влияние плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

В двойных ограждающих конструкциях важную роль имеет звукопоглощающий материал, находящийся между слоистыми элементами. Одним из параметров звукопоглощающего материала является объёмная плотность. Плотность звукопоглощающего материала может влиять на звукоизоляцию двойного ограждения с одинарными и слоистыми обшивками [50, 51, 52]. Для оценки влияния плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением были выполнены экспериментальные измерения звукоизоляции двойных конструкций, в которых использовались два вида звукопоглощающего материала: Rockwool акустик баттс и Isover «Тихий Дом» с плотностью 45 и 15 кг/м³ соответственно.

Исследования проводились на ограждениях размером 2,5 x 1,2 м. из слоистых элементов, состоящих из листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 и листов без мастики, соединенных «насухо» при заполнении воздушного зазора звукопоглощающими материалами

Rockwool акустик баттс и Isover «Тихий Дом» с плотностью 45 и 15 кг/м³ соответственно. Рассматривались варианты при толщинах зазора 50 и 100 мм.

Частотные характеристики звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов при заполнении воздушного зазора звукопоглощающим материалом различной плотности представлены на рисунках 3.9 и 3.10. На основании частотных характеристик, определены индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ для различных звукопоглощающих материалов и установлена степень влияния плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию ограждения. Полученные результаты оценки влияния плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию приведены в таблице 3.3.

По результатам исследований приведенных в таблице 3.3 следует, что двойное ограждение из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» со звукопоглощающим материалом плотностью 15 кг/м³ толщиной 100 мм имеет индекс изоляции воздушного шума на 1 дБ больше, чем аналогичное ограждение со звукопоглощающим материалом плотностью 45 кг/м³. В остальных ограждающих конструкциях с вибропоглощением и без, при толщине звукопоглощающего материала 100 и 50 мм разница плотности звукопоглощающего материала не оказывает влияние на звукоизоляцию ограждения.

Из графиков, представленных на рисунке 3.10 видно, что наибольшее повышение звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» со звукопоглощающим материалом плотностью 15 кг/м³ находится в диапазоне 100 – 500 Гц.

Так как изменение плотности звукопоглощающего материала оказывает незначительное влияние на изменение индекса изоляции воздушного шума, во всех дальнейших экспериментальных исследованиях использовался более дешевый и удобный в монтаже звукопоглощающий материал Rockwool акустик баттс плотностью 45 кг/м³.

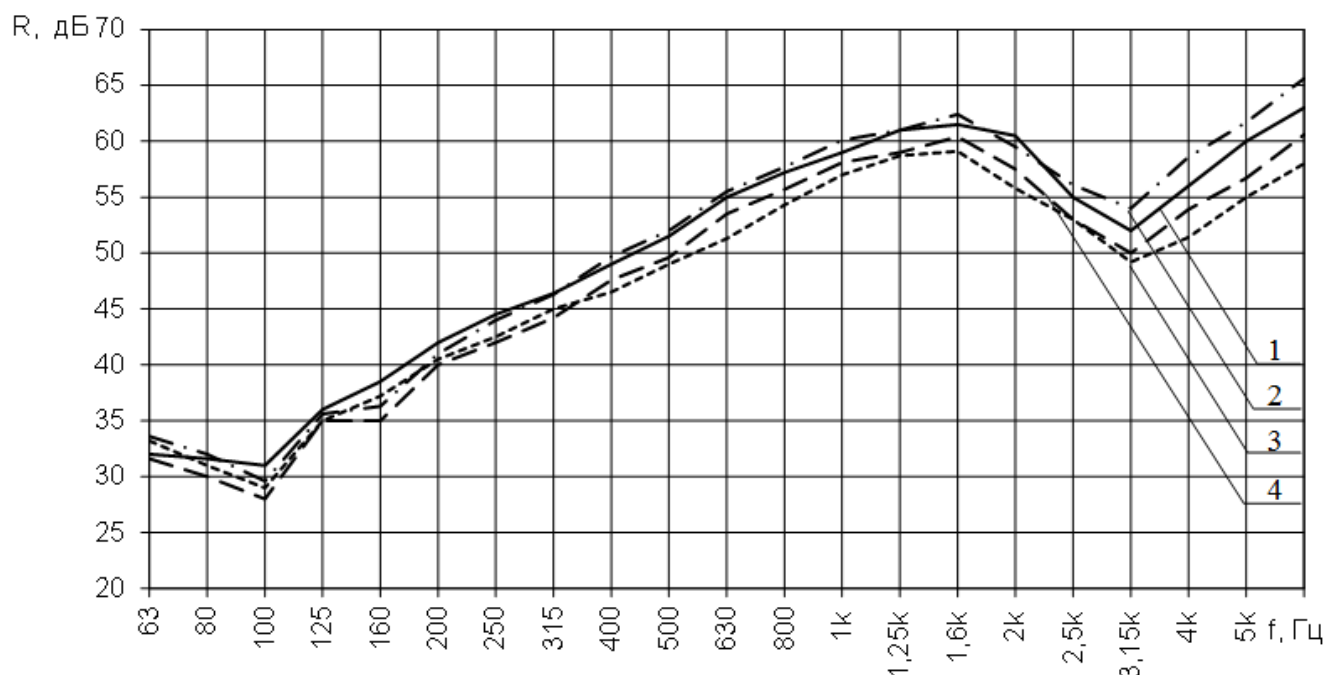


Рисунок 3.9 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ЗПМ толщиной 50 мм: 1 – плотностью 15кг/м³, листы склеены Акцент-117, $R_w = 53$ дБ; 2 – плотностью 45кг/м³, листы склеены Акцент-117, $R_w = 53$ дБ; 3 – плотностью 15кг/м³, листы «насухо», $R_w = 51$ дБ; 4 – плотностью 45кг/м³, листы «насухо», $R_w = 51$ дБ

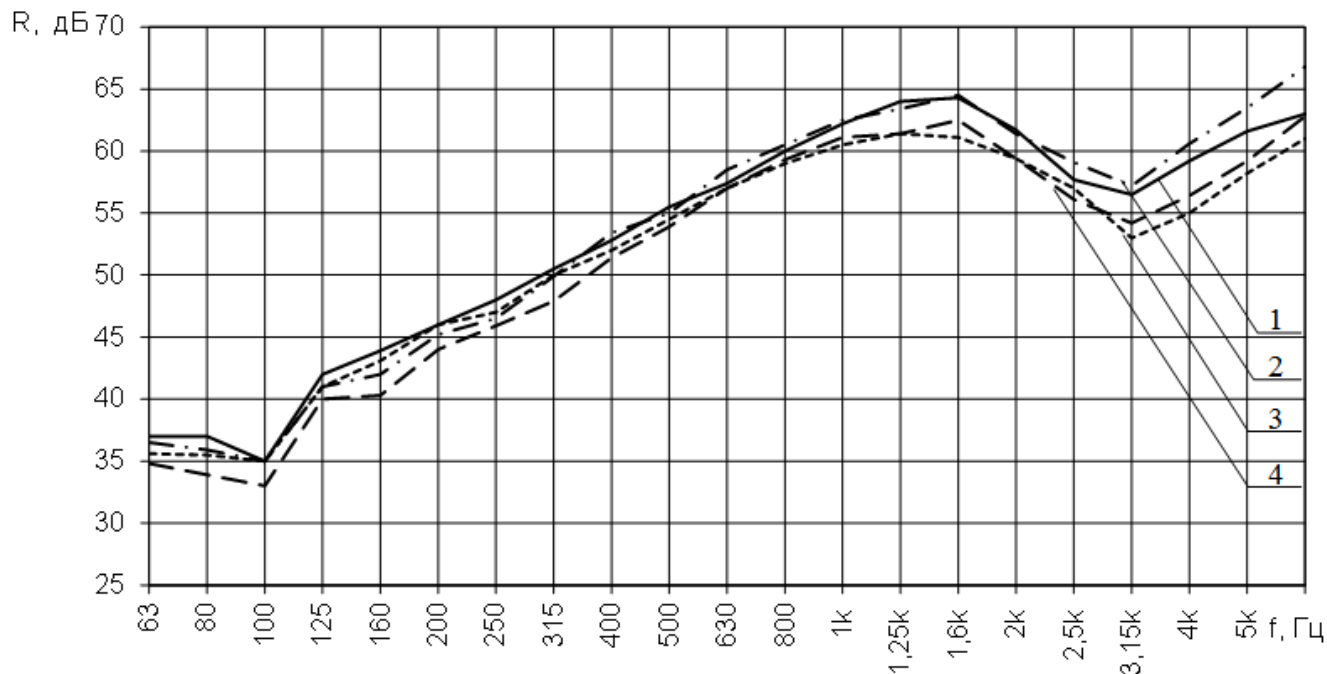


Рисунок 3.10 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ЗПМ толщиной 100 мм: 1 – плотностью 15кг/м³, листы склеены Акцент-117, $R_w = 57$ дБ; 2 – плотностью 45кг/м³, листы склеены Акцент-117, $R_w = 57$ дБ; 3 – плотностью 15кг/м³, листы «насухо», $R_w = 57$ дБ; 4 – плотностью 45кг/м³, листы «насухо», $R_w = 56$ дБ

Таблица 3.3 Влияние плотности звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

№ п/п	Плотность ЗПМ, кг/м ³	Размер зазора между слоистыми элементами, мм	Вид заполнения зазора	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с листами:	
				соединенными «насухо»	склеенными ВПМ
1	15	50	ЗПМ	51	53
		100	ЗПМ	57	57
2	45	50	ЗПМ	51	53
		100	ЗПМ	56	57

3.4.3. Влияние расстояния между слоистыми элементами на звукоизоляцию двойного ограждения

Одним из параметров двойных ограждений является размер зазора между слоистыми элементами. Зазор между элементами может быть воздушным или заполненным звукопоглощающим материалом. Размер зазора может оказывать влияние на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов. Для оценки влияния проведены экспериментальные исследования на образцах двойного ограждения размером 2,5×1,2 м из слоистых элементов, которые состоят из двух листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 или листов ГКЛ без мастики, соединенных «насухо». Соединение элементов между собой в ограждении выполнялось через металлический каркас. Пространство между элементами в одном случае было без заполнения (воздушный зазор), в другом заполнялось звукопоглощающим материалом Rockwool акустик батс с плотностью 45 кг/м³ (см. п. 3.4.2). Размеры зазора между слоистыми элементами в ограждении принимались 25, 50, 75, 100, 125 мм. Частотные характеристики измерения звукоизоляции двойных ограждений при различной величине зазора между слоистыми элементами приведены на рисунках 3.11 - 3.14. На основании частотных характеристик, посчитаны индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ для различных величин зазора и установлена степень

влияния размера зазора без заполнения и с заполнением его звукопоглощающим материалом на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов. Результаты оценки приведены в таблице 3.4.

Так же на рисунке 3.12 представлены частотные характеристики аналогичных двойных конструкций из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» со звукопоглощающим материалом между ними толщиной 75 и 100 мм, полученные другими авторами [25, 51]. Выполненное сравнение частотных характеристик и индексов изоляции воздушного шума аналогичных двойных конструкций из слоистых элементов полученных нами и другими авторами, показало хорошую сходимость результатов, что подтверждает надежность экспериментальных исследований.

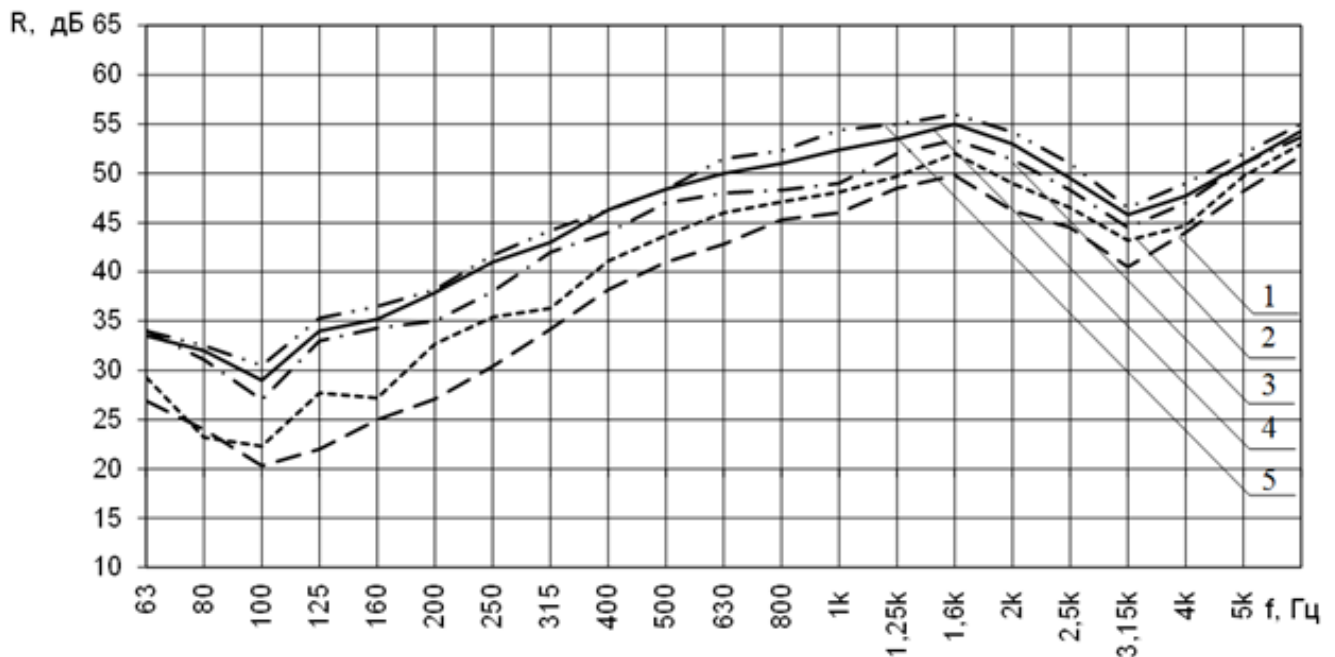


Рисунок 3.11 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, соединенных «насухо» при изменении толщины ВЗ: 1 – ВЗ 25 мм, $R_w = 41$ дБ; 2 – ВЗ 50 мм, $R_w = 45$ дБ; 3 – ВЗ 75 мм, $R_w = 48$ дБ; 4 – ВЗ 100 мм, $R_w = 50$ дБ; 5 – ВЗ 125 мм, $R_w = 51$ дБ

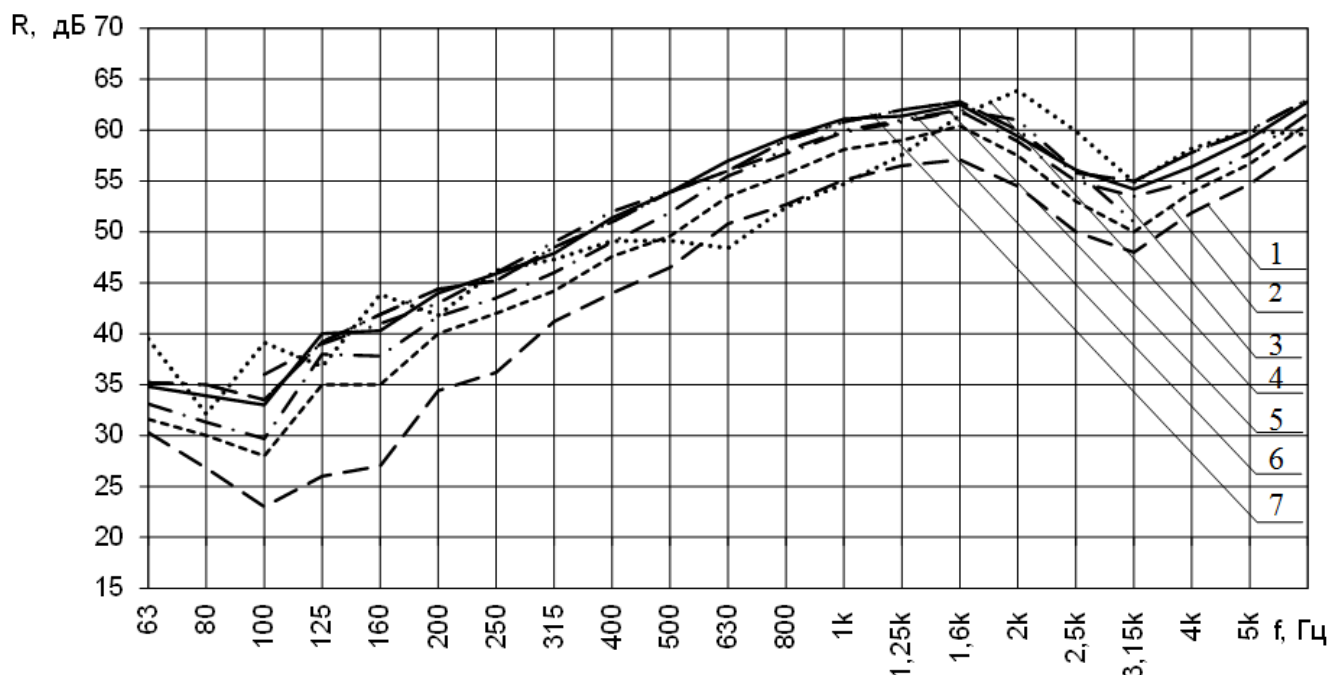


Рисунок 3.12 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, соединенных «насухо» при изменении толщины ЗПМ: 1 – ЗПМ 25 мм, $R_w = 47$ дБ; 2 – ЗПМ 50 мм, $R_w = 51$ дБ; 3 – ЗПМ 75 мм, $R_w = 54$ дБ; 4 – ЗПМ 75 мм, ГВЛ 12,5 мм, $R_w = 54$ дБ [25]; 5 – ЗПМ 100 мм, $R_w = 55$ дБ [51]; 6 – ЗПМ 100 мм, $R_w = 56$ дБ; 7 – ЗПМ 125 мм, $R_w = 56$ дБ

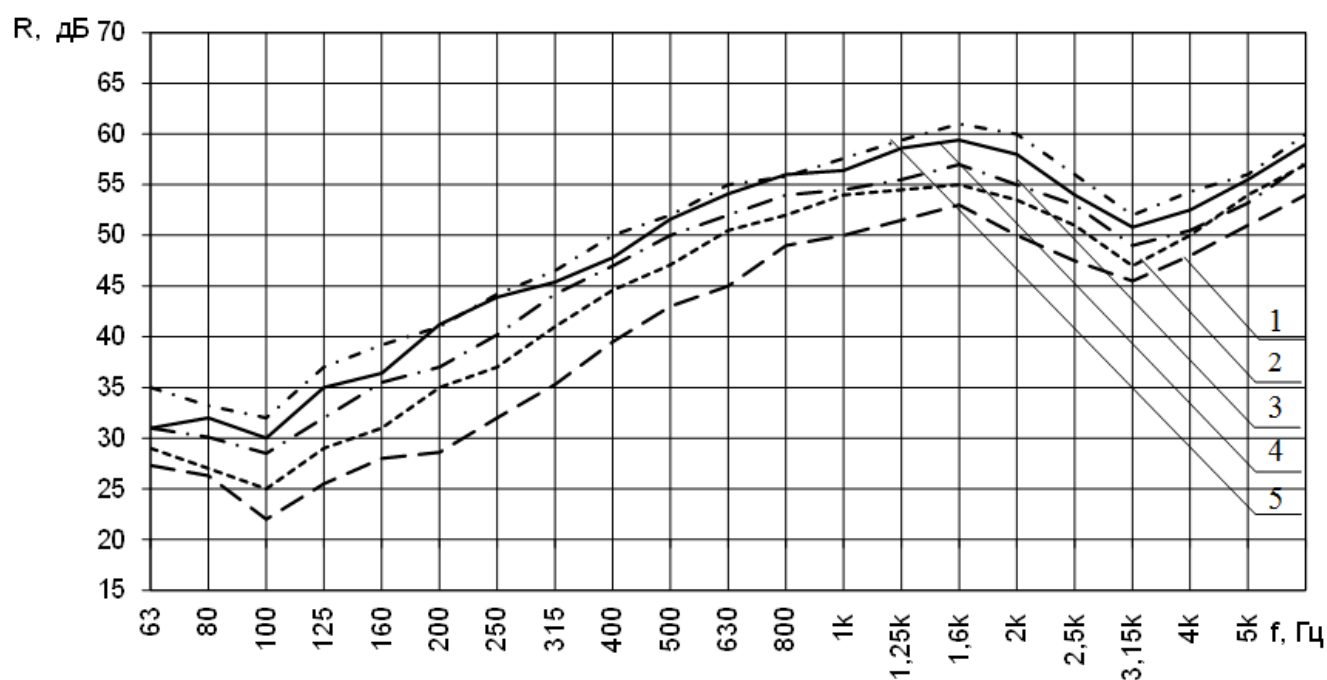


Рисунок 3.13 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, склеенных мастикой Акцент-117 при изменении толщины ВЗ: 1 – ВЗ 25 мм, $R_w = 44$ дБ; 2 – ВЗ 50 мм, $R_w = 48$ дБ; 3 – ВЗ 75 мм, $R_w = 51$ дБ; 4 – ВЗ 100 мм, $R_w = 53$ дБ; 5 – ВЗ 125 мм, $R_w = 54$ дБ

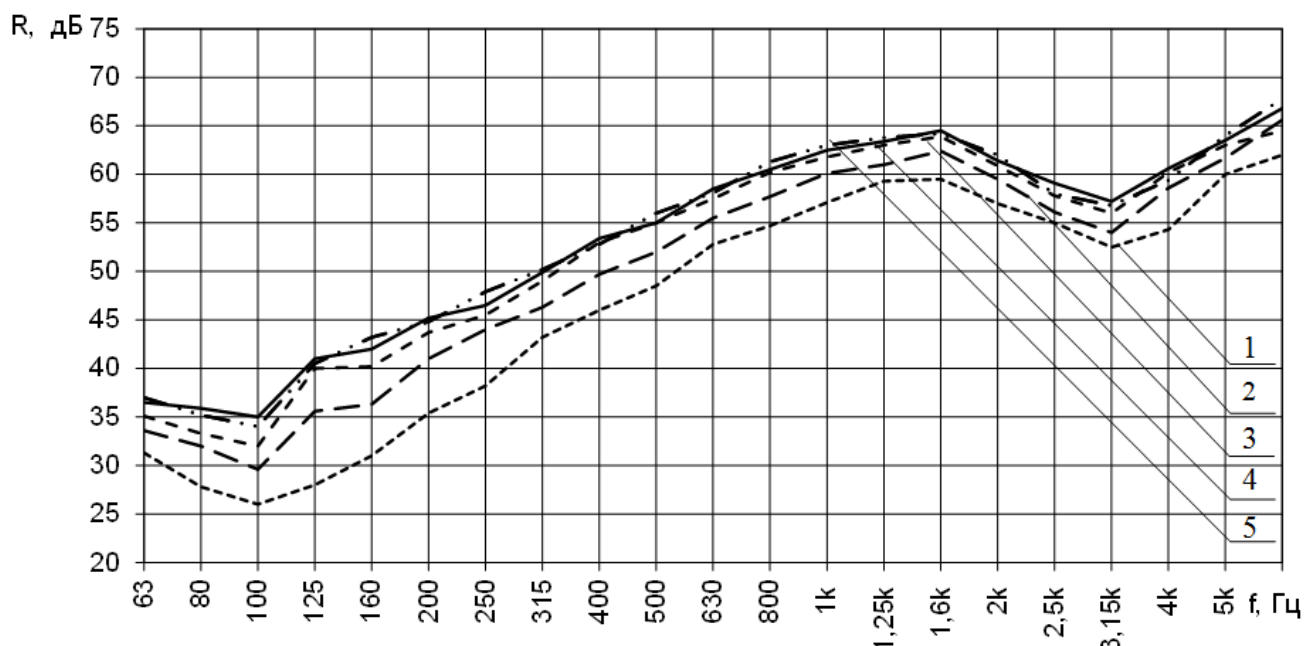


Рисунок 3.14 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, склеенных мастикой Акцент-117 при изменении толщины ЗПМ: 1 – ЗПМ 25 мм, $R_w = 49$ дБ; 2 – ЗПМ 50 мм, $R_w = 53$ дБ; 3 – ЗПМ 75 мм, $R_w = 56$ дБ; 4 – ЗПМ 100 мм, $R_w = 57$ дБ; 5 – ЗПМ 125 мм, $R_w = 57$ дБ

Таблица 3.4 Влияние размеров зазора на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

№ п/п	Размер зазора между слоистыми элементами, мм	Вид заполнения зазора	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с листами:	
			соединенными «насухо»	склеенными ВПМ
1	25	ВЗ	41	44
		ЗПМ	47	49
2	50	ВЗ	45	48
		ЗПМ	51	53
3	75	ВЗ	48	51
		ЗПМ	54	56
4	100	ВЗ	50	53
		ЗПМ	56	57
5	125	ВЗ	51	54
		ЗПМ	56	57

По результатам, приведенным в таблице 3.4, можно сделать вывод:

- применение в двойном ограждении слоистых элементов с вибропоглощением в сравнении с элементами из листов, соединенных «насухо» при зазоре

между ними от 50 до 125 мм даёт повышение индекса изоляции воздушного шума на 2-3 дБ, при этом нет значительного увеличения поверхностной плотности и толщины ограждения;

- влияние слоистых элементов с вибропоглощением на рост индекса изоляции двойной ограждающей конструкции снижается при заполнении зазора между слоистыми элементами звукопоглощающим материалом толщиной свыше 75 мм.

На рисунке 3.15 приведен график изменения звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов в зависимости от изменения величины зазора, заполненного звукопоглощающим материалом и без заполнения.

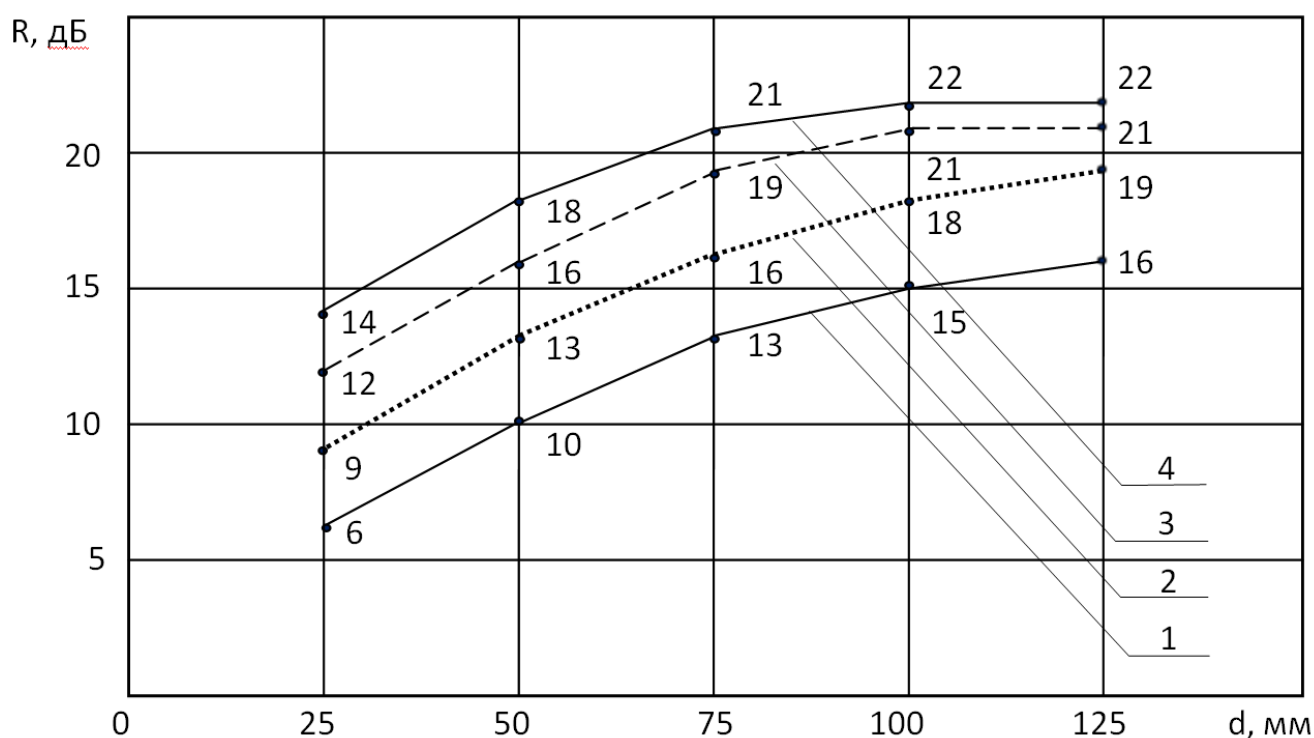


Рисунок 3.15 - Изменение звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5 мм, склеенных ВПМ Акцент-117 и соединенных «насухо» при различной величине зазора: 1 – листы соединенные «насухо» с ВЗ; 2 – листы склеенные ВПМ с ВЗ; 3 – листы соединенные «насухо» с ЗПМ; 4 – листы склеенные ВПМ с ЗПМ

В результате оценки полученных измерений установлено, что величина зазора оказывает существенное влияние на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов. При увеличении толщины зазора, как воздушного, так и за-

полненного звукопоглощающим материалом, от 25 до 100 мм индекс изоляции воздушного шума двойного ограждения увеличивается на 8-9 дБ. При дальнейшем увеличении толщины зазора свыше 100 мм рост звукоизоляции замедляется.

3.4.4. Влияние площади звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

Для оценки зависимости звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов от площади звукопоглощающего материала проводились исследования на ограждениях размером 2,5 x 1,2 м из слоистых элементов, состоящих из двух листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117. Зазор между слоистыми элементами в одном случае заполнялся обычным звукопоглощающим материалом толщиной 100 мм, а в двух других звукопоглощающим материалом с увеличенной площадью поверхности толщиной 50 мм и 50+50 мм. На основании ранее полученных результатов в пункте 3.4.2 использовался звукопоглощающий материал Rockwool акустик баттс плотностью 45 кг/м³. Увеличение площади поверхности звукопоглощающего материала достигается за счет придания ему формы клина с размером клина b равным не более $H/2$, где H это расстояние между слоистыми элементами с вибропоглощением, а так же каждый ряд клиньев развернут друг к другу на 90° (рисунок 3.16).

Частотные характеристики изменения звукоизоляции двойных ограждений при заполнении зазора между слоистыми элементами звукопоглощающим материалом приведены на рисунке 3.17. На основании частотных характеристик, посчитаны индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ и установлена степень влияния площади звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением. Результаты оценки приведены в таблице 3.5.

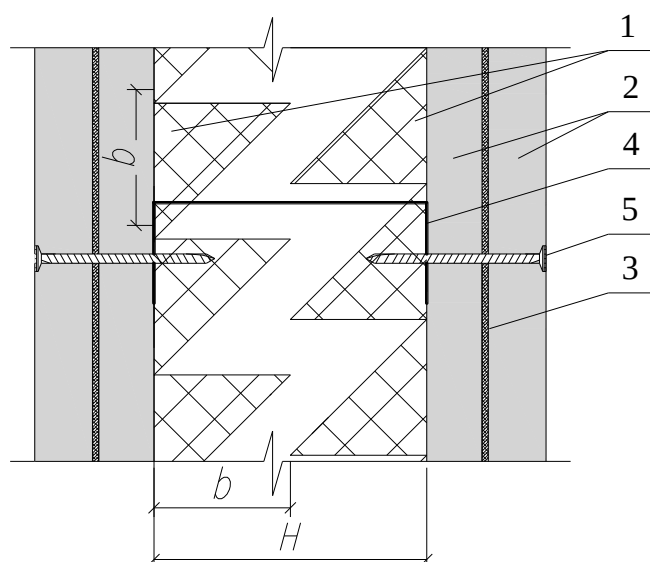


Рисунок 3.16 – Двойная звукоизолирующая конструкция из слоистых элементов с вибропоглощением: 1 – звукопоглощающий материал клиновидной формы; 2 – облицовочные листы; 3 – вибропоглощающий материал; 4 – направляющий профиль каркаса; 5 – саморез

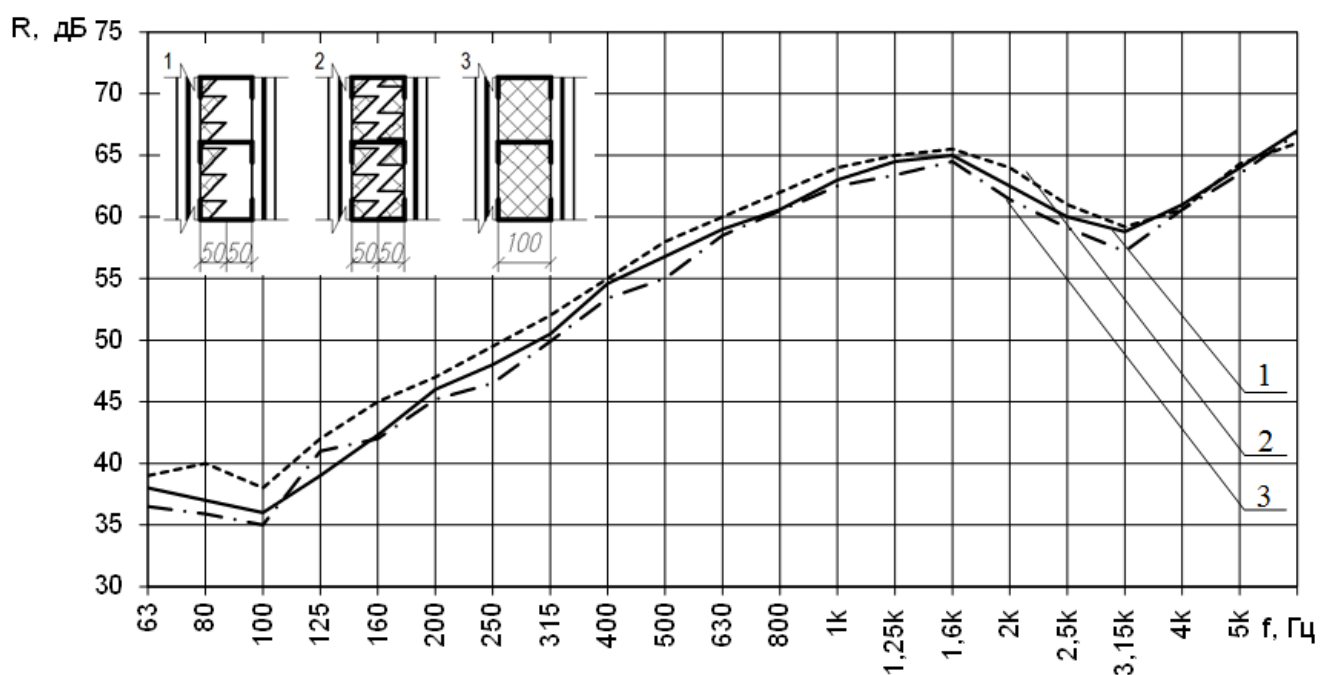


Рисунок 3.17 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, склеенных мастикой Акцент-117 при изменении площади поверхности звукопоглощающего материала: 1 – 3ПМ 50 мм, ВЗ 50 мм, $R_w = 58$ дБ; 2 – 3ПМ 2x50 мм, $R_w = 59$ дБ; 3 – 3ПМ 100 мм, $R_w = 57$ дБ

Таблица 3.5 Влияние площади звукопоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением

№ п/п	Конструкция слоистого элемента	Размер зазора между слоистыми элемента- ми, мм	Вид заполнения зазора	Размеры заполнителей зазора, мм	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением
1	ГКЛ/Акцент-117/ГКЛ	100	ЗПМ / ВЗ	50 / 50	58
2			ЗПМ	50+50	59
3			ЗПМ	100	57

Двойное ограждение из слоистых элементов с вибропоглощением и со звукопоглощающим материалом с увеличенной площадью поверхности показало повышение звукоизоляции практически во всем нормируемом диапазоне частот (100 – 3150 Гц) в сравнении с двойным ограждением равной толщины с обычным звукопоглощающим материалом.

По результатам исследований представленных в таблице 3.5 следует, что увеличение площади поверхности звукопоглощающего материала двойной ограждающей конструкции даёт рост индекса изоляции воздушного шума на 1-2 дБ [59]. Такое повышение индекса изоляции ограждающей конструкции является существенным, так как известно, что для его повышения на 5-6 дБ, необходимо увеличить поверхностную плотность ограждения в два раза, но при этом возникает много минусов, таких как: увеличение затрат на материалы и повышение нагрузки на перекрытия, стены, фундамент и т.д.

В связи с тем, что создание предложенных конструкций требует больших временных затрат на изготовление и монтаж, целесообразно их использовать при устройстве между помещениями с требуемым нормативных индексом изоляции воздушного шума конструкции свыше 57 дБ.

3.4.5. Влияние характеристик вибропоглощающей мастики слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения

Изоляция воздушного шума слоистых элементов с вибропоглощением и ограждающих конструкций из них зависит от характеристик вибропоглощающего материала [19; 30; 37; 39; 41; 45; 60]. Вибропоглощающие материалы могут иметь различные характеристики коэффициента потерь и динамического модуля упругости.

Для оценки зависимости звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов от характеристик вибропоглощающих мастик проводились экспериментальные исследования на фрагментах ограждений размером 2,5 х 1,2 м. из слоистых элементов, состоящих из листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117, Грин Глу или эпоксидной смолой с воздушным зазором и при его заполнении звукопоглощающим материалом. Для заполнения зазора между слоистыми элементами использовался звукопоглощающий материал Rockwool акустик баттс плотностью 45 кг/м³ и толщиной 50 мм. Материалы для склеивания листов различаются между собой по динамическому модулю упругости и коэффициенту потерь. Для мастики Акцент-117: $E_d = 13,60501 \times 10^5$ Па, $\eta = 0,50138$, для мастики Грин Глу: $E_d = 29,53732 \times 10^5$ Па, $\eta = 0,7981$, для эпоксидной смолы: $E_d = 3,3 \times 10^8$ Па, $\eta = 0,01$ [23, 84]. Частотные характеристики двойного ограждения представлены на рисунках 3.18 и 3.19. Полученные индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ приведены в таблице 3.6.

Экспериментальные измерения звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов с различными характеристиками материалов свидетельствуют о следующем. Двойные ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением имеют большую звукоизоляцию (3-5 дБ) по сравнению с аналогичной конструкцией из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо» за счет увеличения коэффициента потерь. Так как модуль упругости эпоксидной смолы находится в пределах модуля упругости облицовочных слоев, получается жесткое склеивание гипсокартонных листов между собой, в результате слоистый элемент рабо-

тает как однослойная конструкция, в связи с этим, провал звукоизоляции смещается в область более низких частот и, как следствие, происходит снижение звукоизоляции двойного ограждения. В отличие от эпоксидной смолы, вибропоглощающие мастики Акцент-117 и Грин Глу имеют более высокий коэффициент потерь, а модуль упругости на порядок ниже модуля упругости облицовочных слоев, что позволяет повысить звукоизоляцию двойного ограждения. Влияние на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов вибропоглощающих мастик Акцент-117 и Грин Глу практически не отличается между собой, так как разница коэффициентов потерь у предложенных мастик незначительна. По этой причине рекомендуется использовать более дешевые мастики. В данном случае можно применить вместо мастики Грин Глу мастику Акцент-117.

Так же для оценки влияния характеристик вибропоглощающего материала на звукоизоляцию двойного ограждения выполнены теоретические расчёты, представленные в п. 4.1.3.

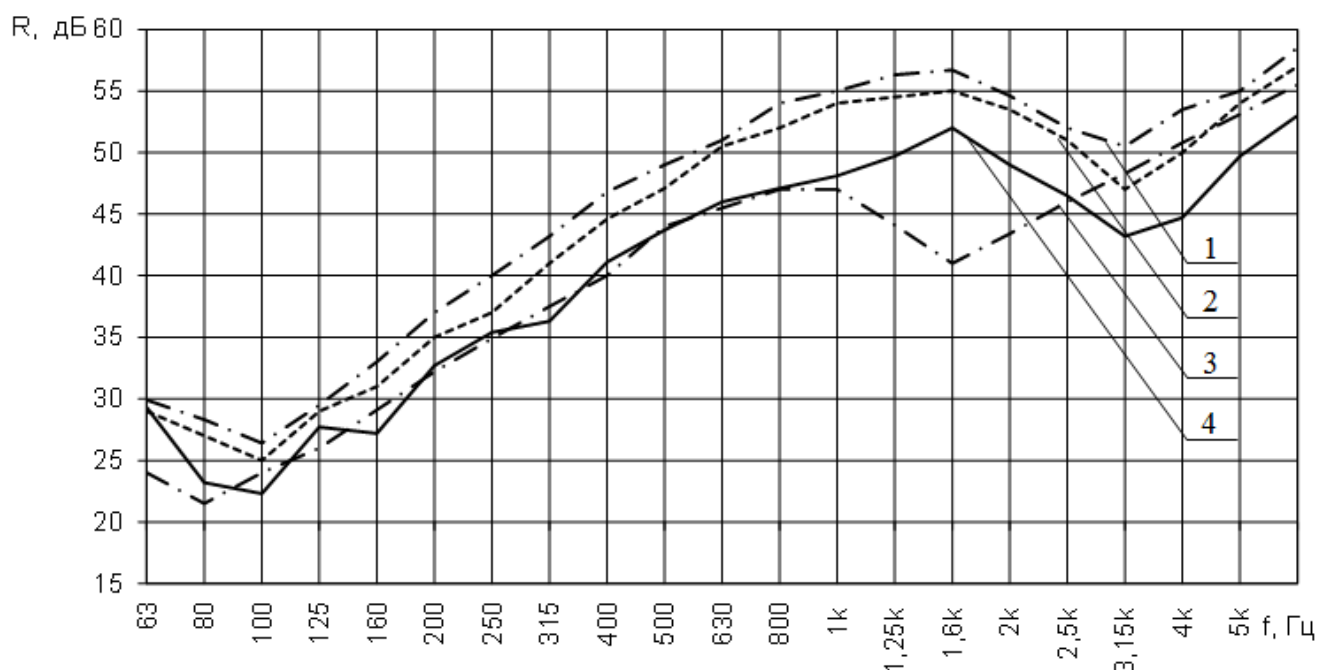


Рисунок 3.18 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – листы склеены Грин Глу, $R_w = 50$ дБ; 2 – листы склеены Акцент-117, $R_w = 48$ дБ; 3 – листы склеены эпоксидной смолой, $R_w = 44$ дБ; 4 – листы соединены «насухо», $R_w = 45$ дБ

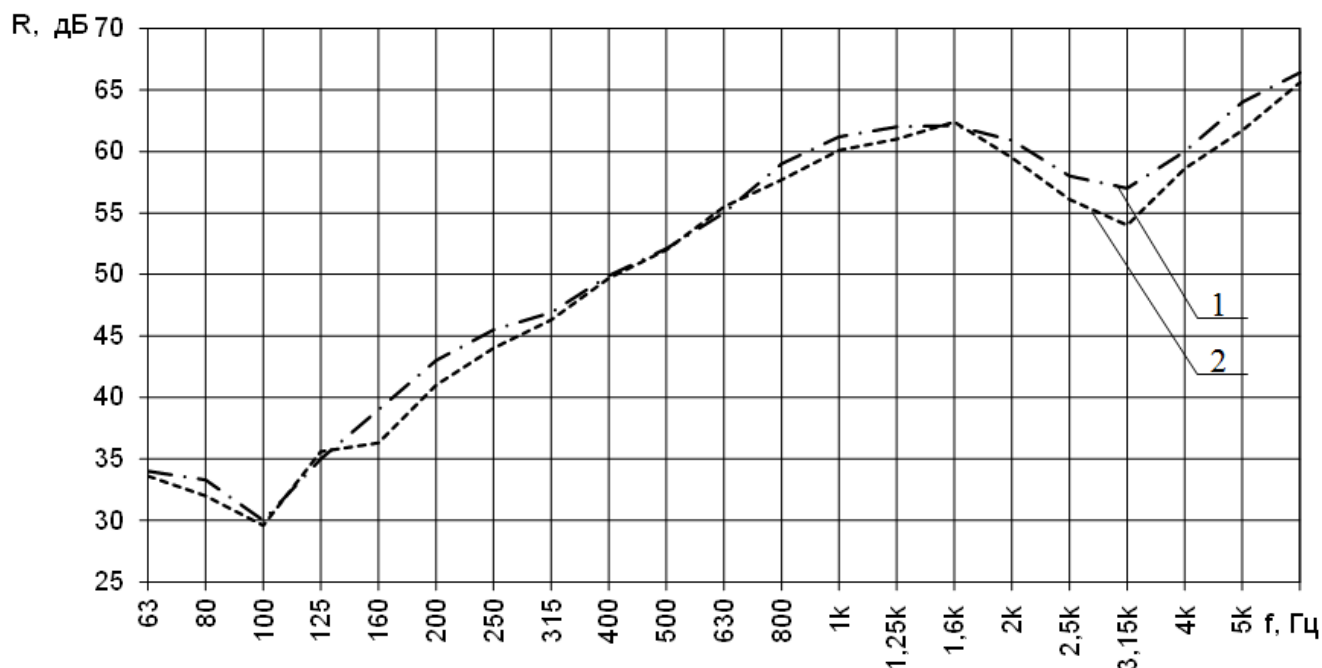


Рисунок 3.19 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух ГКЛ толщиной по 12,5мм, установленных через ЗПМ толщиной 50 мм: 1 – листы склеены мастикой Грин Глу, $R_w = 54$ дБ; 2 – листы склеены мастикой Акцент-117, $R_w = 53$ дБ

Таблица 3.6 Влияние характеристик вибропоглощающих мастик на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением

№ п/п	Размер зазора между слоистыми элементами, мм	Вид заполнения зазора	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с листами,			
			склеенными			соединенными «насухо»
			Грин Глу	Акцент-117	Эпоксидная смола	
1	50	ВЗ	50	48	44	45
		ЗПМ	54	53	49	51

3.4.6. Влияние поверхностной плотности слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения

На акустическую эффективность слоистых элементов существенно влияет их поверхностная плотность и изгибная жесткость [4; 9; 19; 29; 37; 41; 45]. Поверхностная плотность зависит от объемной плотности и толщины материала, а изгибная жесткость от динамического модуля упругости.

Для анализа зависимости звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением и с листами, соединёнными «насухо», от поверхностной плотности произведены экспериментальные измерения звукоизоляции ограждения со слоистыми элементами из различных листовых материалов, склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 или без мастики, соединенных «насухо».

Измерения выполнялись на двойных ограждениях со слоистыми элементами из листов ГКЛ толщиной 12,5 мм с поверхностной плотностью $8,8 \text{ кг/м}^2$ и толщиной 10 мм с поверхностной плотностью $6,1 \text{ кг/м}^2$, ЦСП толщиной 12 мм с поверхностной плотностью $15,1 \text{ кг/м}^2$, ОСП толщиной 9 мм с поверхностной плотностью $5,9 \text{ кг/м}^2$. В качестве звукопоглощающего материала использовались минераловатные плиты Rockwool акустик баттс плотностью 45 кг/м^3 и толщиной 50 мм.

На рисунках 3.20 – 3.23 и в таблице 3.7 представлены полученные частотные характеристики звукоизоляции двойных ограждений и определенные на их основе индексы изоляции воздушного шума R_w , дБ.

На графиках видно, что увеличение поверхностной плотности слоистых элементов с $11,8$ до $30,2 \text{ кг/м}^2$ приводит к росту звукоизоляции двойного ограждения. Наибольшую звукоизолирующую способность показали двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов с листами ЦСП толщиной 12 мм с поверхностной плотностью $30,2 \text{ кг/м}^2$.

Уменьшение толщины листов в ограждениях из слоистых элементов приводит к смещению граничной частоты волнового совпадения в более высокий диапазон частот, что хорошо согласуется с методом расчета по своду правил [67].

Из данных таблицы 3.7 следует, что при повышении поверхностной плотности слоистых элементов почти в 3 раза индекс изоляции воздушного шума двойной конструкции увеличивается на 10 - 11 дБ.

Таким образом, поверхностная плотность слоистых элементов значительно влияет на акустическую эффективность двойной ограждающей конструкции, и

выбирать её необходимо при проектировании исходя из требуемого нормативного индекса изоляции воздушного шума конструкции между помещениями.

Данные конструкции были использованы нами при разработке практических рекомендаций в главе 4 (см. таблицу 4.1).

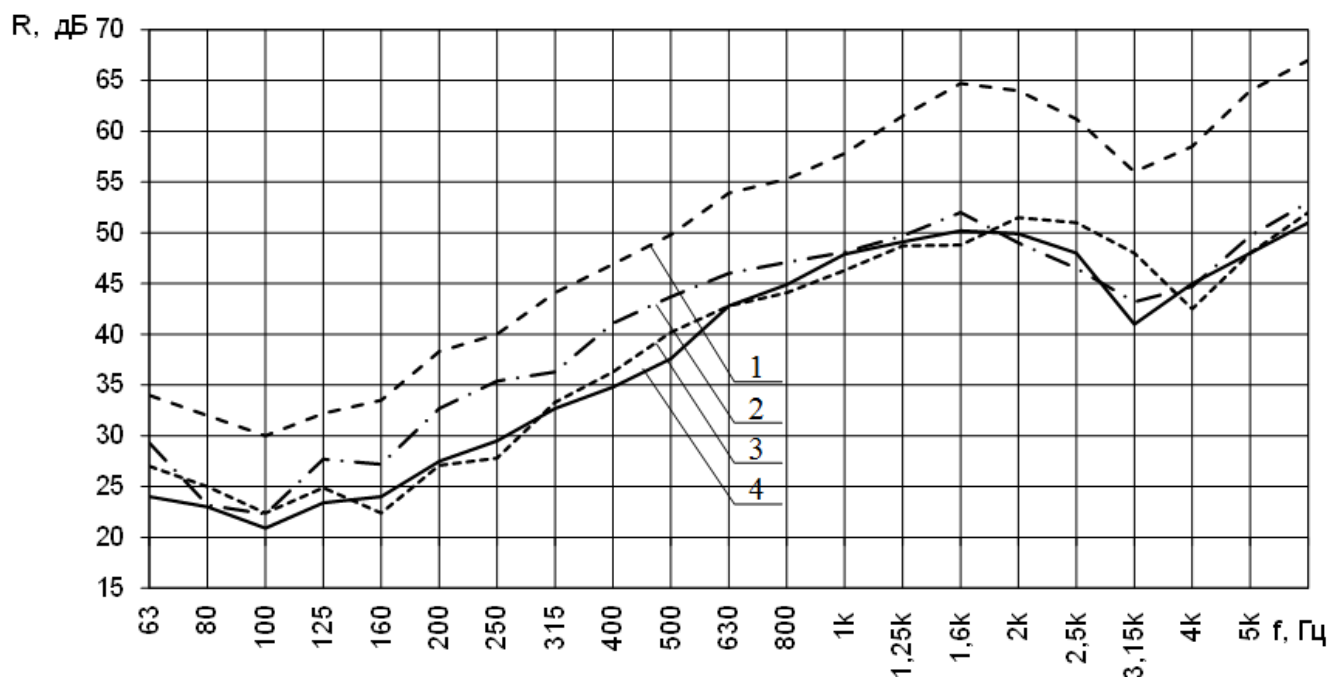


Рисунок 3.20 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из листовых материалов соединенных «насухо», установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – ЦСП толщиной 12 мм, $R_w = 52$ дБ; 2 – ГКЛ толщиной 12,5 мм, $R_w = 45$ дБ; 3 – ГКЛ толщиной 10 мм, $R_w = 42$ дБ; 4 – ОСП толщиной 9 мм, $R_w = 41$ дБ

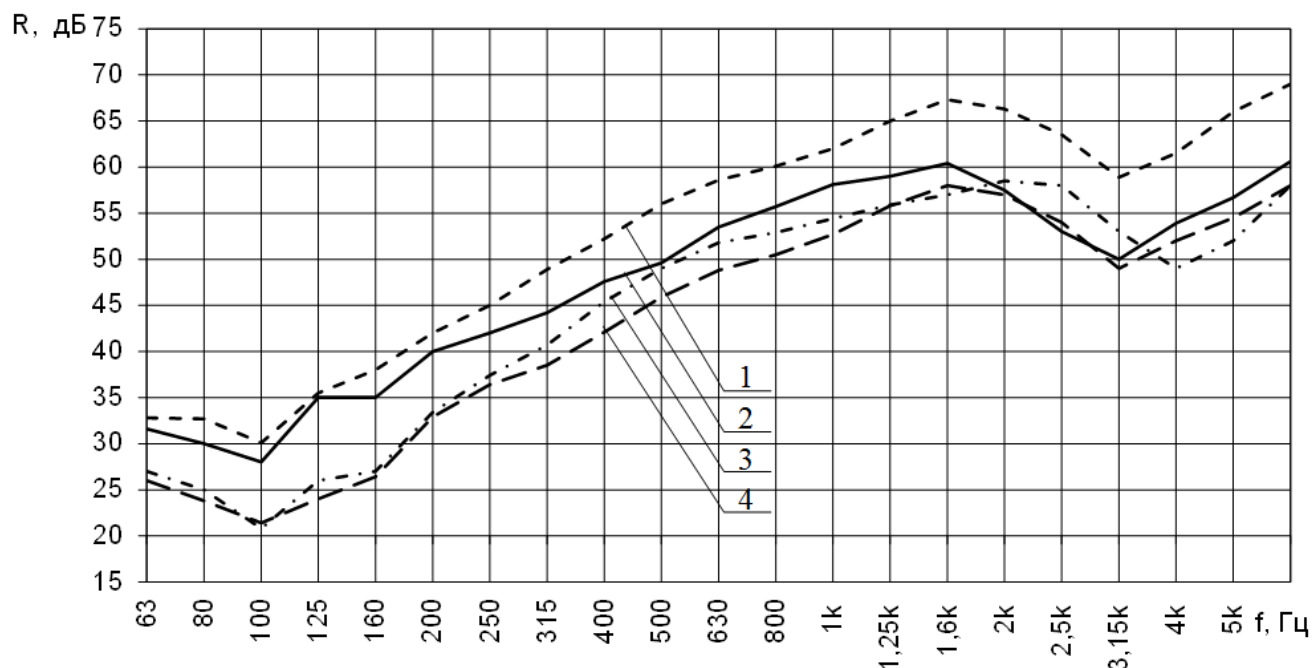


Рисунок 3.21 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из листовых материалов соединенных «насухо», установленных через ЗПМ толщиной 50 мм: 1 – ЦСП толщиной 12 мм, $R_w = 56$ дБ; 2 – ГКЛ толщиной 12,5 мм, $R_w = 51$ дБ; 3 – ГКЛ толщиной 10 мм, $R_w = 47$ дБ; 4 – ОСП толщиной 9 мм, $R_w = 46$ дБ

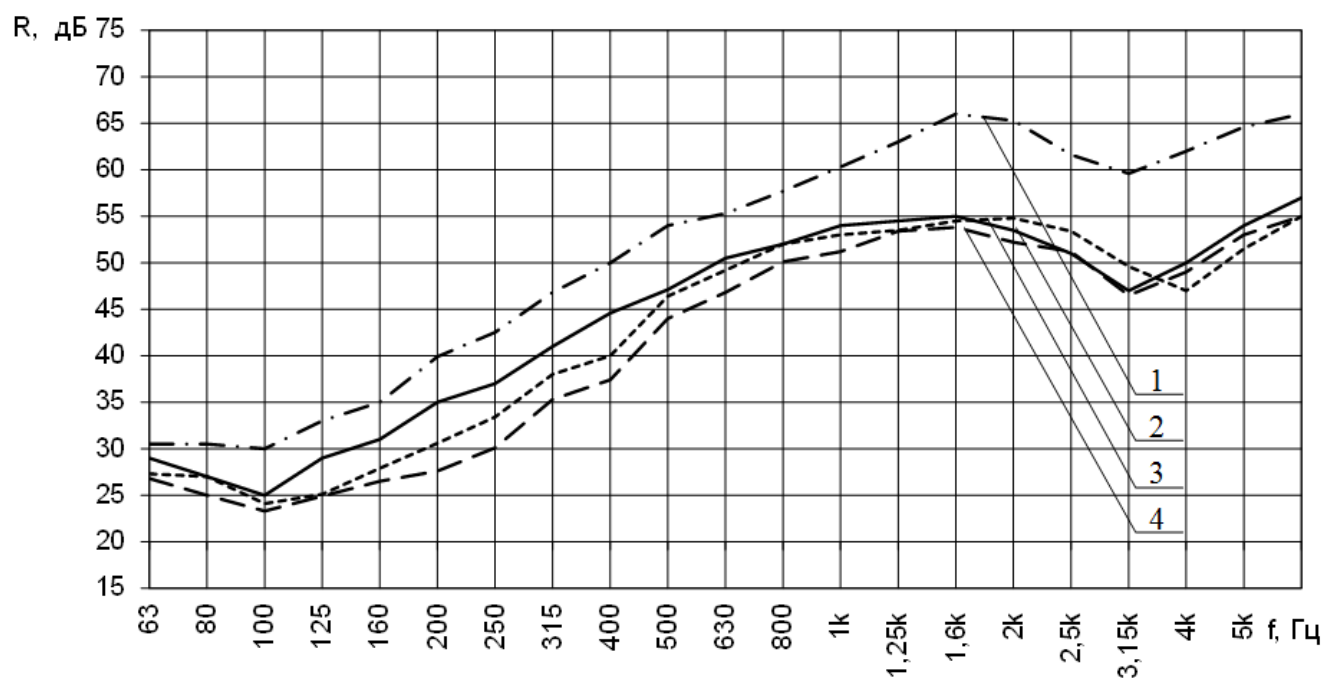


Рисунок 3.22 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из листовых материалов, склеенных мастикой Акцент-117, установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – ЦСП толщиной 12 мм, $R_w = 54$ дБ; 2 – ГКЛ толщиной 12,5 мм, $R_w = 48$ дБ; 3 – ГКЛ толщиной 10 мм, $R_w = 45$ дБ; 4 – ОСП толщиной 9 мм, $R_w = 43$ дБ

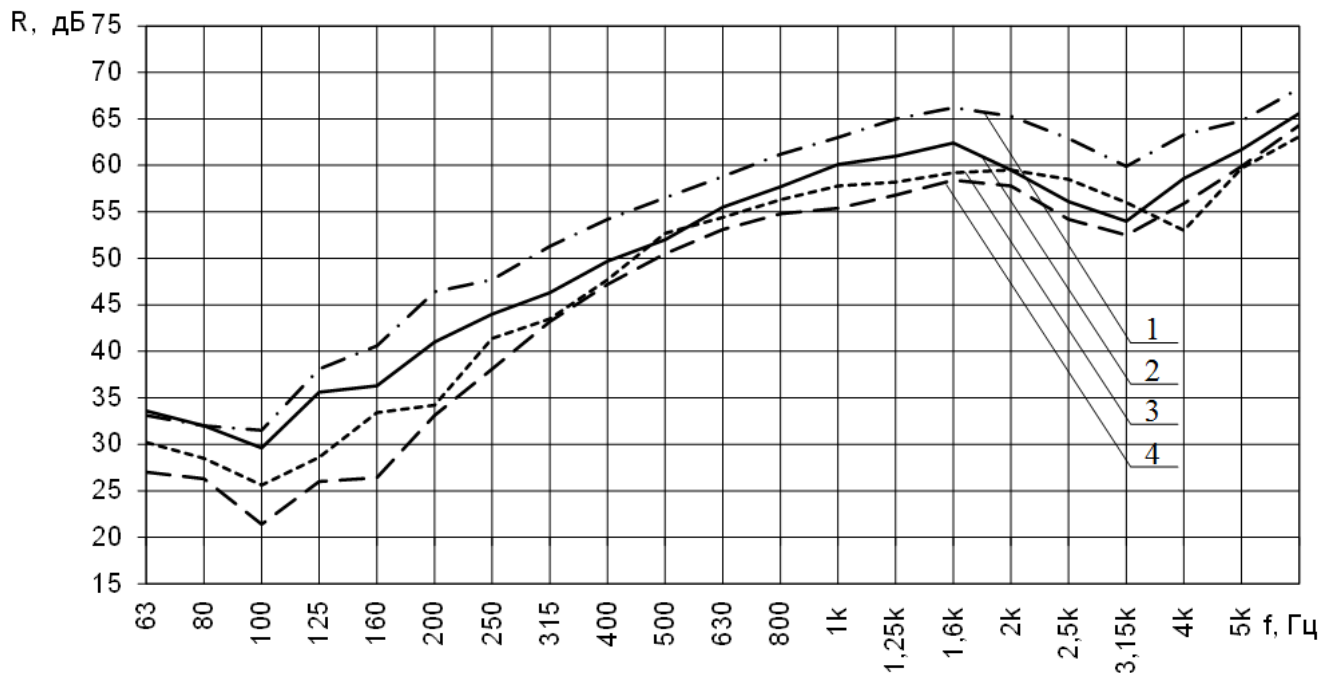


Рисунок 3.23 - Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из листовых материалов, склеенных мастикой Акцент-117, установленных через ЗПМ толщиной 50 мм: 1 – ЦСП толщиной 12 мм, $R_w = 58$ дБ; 2 – ГКЛ толщиной 12,5 мм, $R_w = 53$ дБ; 3 – ГКЛ толщиной 10 мм, $R_w = 50$ дБ; 4 – ОСП толщиной 9 мм, $R_w = 48$ дБ

Таблица 3.7 Влияние поверхностной плотности слоистых элементов на звукоизоляцию двойного ограждения из слоистых элементов

№ п/п	Вид материала слоистых элементов	Объёмная плотность, кг/м ³	Толщина одного листа, мм	Поверхностная плотность слоистого элемента, кг/м ²	Вид заполнения зазора толщиной 50 мм	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ двойного ограждения из слоистых элементов с листами:	
						соединенными «насухо»	склеенными ВПМ
1	ЦСП	1254	12	30,2	ВЗ	52	54
					ЗПМ	56	58
2	ГКЛ	704	12,5	17,6	ВЗ	45	48
					ЗПМ	51	53
3	ГКЛ	606	10	12,2	ВЗ	42	45
					ЗПМ	47	50
4	ОСП	656	9	11,8	ВЗ	41	43
					ЗПМ	46	48

Выводы по главе 3

1. Выполненные эксперименты показали возможность регулирования звукоизолирующих характеристик двойных конструкций из слоистых элементов за счёт устройства в элементах вибропоглощающего слоя, изменения величины зазора между слоистыми элементами, увеличения площади поверхности звукопоглощающего материала и поверхностной плотности слоистых элементов.

2. Двойные ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением имеют большую звукоизоляцию в сравнении с двойными ограждениями из слоистых элементов с листами, соединенными «насухо», имея, при этом, практически равную поверхностную плотность и толщину конструкции. Наибольшая акустическая эффективность слоистых элементов с вибропоглощением в двойных ограждениях наблюдается при зазоре незаполненном звукопоглощающим материалом.

3. В результате экспериментальных исследований получено, что виброизолированное линейное крепление не оказывает влияние на звукоизоляцию двойных ограждений из слоистых элементов с вибропоглощением. В связи с этим для исследуемых конструкций рекомендуется использовать жесткое линейное крепление, которое позволит лучше выявить характеристики ограждения, исключая погрешности, возникающие при виброизолированном креплении.

4. Уменьшение плотности звукопоглощающего материала приводит к росту индекса изоляции воздушного шума двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов без вибропоглощения при толщине звукопоглощающего материала равной 100 мм. В ограждающих конструкциях при толщине звукопоглощающего материала 50 мм плотностью 15 кг/м^3 и 45 кг/м^3 с листами, соединенными «насухо» или склеенными вибропоглощающей мастикой, индекс изоляции воздушного шума остается без изменений. Исходя из технико-экономической рациональности, принято использовать более дешевый и удобный в монтаже звукопоглощающий материал Rockwool акустик баттс плотностью 45 кг/м^3 .

5. Изменение величины зазора как воздушного, так и заполненного звукопоглощающим материалом, в двойных ограждающих конструкциях между слои-

стыми элементами позволяет регулировать индекс изоляции воздушного шума. Установлено, что с ростом величины зазора звукоизоляция двойного ограждения возрастает, при этом наибольший ее рост наблюдается при начальном увеличении зазора, при дальнейшем увеличении зазора рост звукоизоляции замедляется. Таким образом, с точки зрения роста эффективности звукоизоляции и целесообразности конструктивного решения следует принимать толщину зазора не более 100 мм. Из результатов измерений установлено, что в этих случаях акустическая эффективность применения элементов с вибропоглощением вместо слоистых элементов из листов, соединенных «насухо», составляет 2–3 дБ, при этом нет значительного увеличения поверхностной плотности и толщины ограждения.

6. При проведении экспериментальных исследований двойное ограждение из слоистых элементов с вибропоглощением и со звукопоглощающим материалом с увеличенной площадью поверхности показало повышение звукоизоляции практически во всем нормируемом диапазоне частот (100 – 3150 Гц) в сравнении с двойным ограждением равной толщины с обычным звукопоглощающим материалом. Рост индекса изоляции воздушного шума за счет увеличения площади поверхности звукопоглощающего материала составляет 2 дБ. Так как данные конструкции сложны в изготовлении и монтаже, их использование рационально между помещениями с требуемым нормативных индексом изоляции воздушного шума конструкции свыше 57 дБ.

7. Экспериментальные исследования звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов с различными характеристиками вибропоглощающих материалов доказывают, что при малом коэффициенте потерь и повышенном динамическом модуле упругости ВПМ провал звукоизоляции смещается в область более низких частот и, как следствие, происходит снижение звукоизоляции двойного ограждения. Звукоизоляция двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощающими мастиками, которые имеют более высокий коэффициент потерь, а модуль упругости на порядок ниже модуля упругости облицовочных слоев, повышается. В целом вид вибропоглощающей мастики слоистых элементов

несущественно влияет на рост звукоизоляции двойного ограждения, так как разница коэффициента потерь у существующих в строительстве мастик незначительна. В связи с этим целесообразно использовать недорогие вибропоглощающие материалы. В нашем случае дешевле применять мастику Акцент-117, чем Грин Глу.

8. Установлено, что увеличение поверхностной плотности слоистых элементов значительно влияет на звукоизоляцию двойных ограждений. Наибольшую звукоизолирующую способность показали двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов с листами ЦСП толщиной 12 мм с поверхностной плотностью $30,2 \text{ кг/м}^3$. Рост индекса изоляции воздушного шума составил от 10 до 11 дБ. Уменьшение толщины листов в ограждениях из слоистых элементов приводит к смещению граничной частоты волнового совпадения в более высокий диапазон частот, что хорошо согласуется с методом расчета по своду правил. Таким образом, при проектировании двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов необходимо целенаправленно выбирать поверхностную плотность слоистых элементов исходя из требуемого нормативного индекса изоляции конструкции между помещениями.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ДВОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВИБРОПОГЛОЩЕНИЕМ

Теоретические и экспериментальные исследования, представленные во второй и третьей главах работы, показали эффективность применения двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов в качестве внутренних звукоизолирующих перегородок в гражданских зданиях. В результате теоретических исследований звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов получены формулы, которые позволяют выполнить расчет ограждающих конструкций с заданными геометрическими и конструктивными параметрами и физико-механическими характеристиками.

В главе приведен метод расчёта звукоизоляции исследованных в работе двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением. Разработана программа для его реализации, представлен практический опыт внедрения конструкций и даны рекомендации по применению в строительстве.

4.1. Метод расчета звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением

Практический метод расчёта основан на использовании формул, полученных во второй главе, с помощью которых можно рассчитать звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением. Ниже в п. 4.1.1 представлен алгоритм метода.

4.1.1. Алгоритм расчёта звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением

Алгоритм расчёта для определения звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением включает в себя следующие операции:

1. Устанавливаются исходные данные проектируемой конструкции: ширина и длина конструкции, материал элементов, толщина элементов и конструкций в целом, поверхностная плотность, коэффициент потерь, динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов слоёв элементов, модуль сдвига вибропоглощающего слоя, толщина, поверхностная плотность и коэффициент звукопоглощения звукопоглощающего материала, толщина зазора между элементами.

2. Находятся граничные частоты расчётных областей простого пространственного резонанса, неполного пространственного резонанса и полного пространственного резонанса. При этом:

-граничная частота простого пространственного резонанса определяется по формуле (2.107);

-граничная частота неполного пространственного резонанса определяется по формулам (2.98) и (2.100). Для последующих расчётов принимается наименьшее из двух полученных значений. При расчёте учитываются габариты ограждения (ширина и длина) и ее жесткостные параметры;

-граничная частота полного пространственного резонанса определяется по формуле (2.89). При расчёте учитывается скорость звука и жесткостные параметры конструкции.

3. Вычисляются по формулам (2.75), (2.77), (2.83), (2.85), (2.49) коэффициенты звукоизлучения двойной ограждающей конструкции для частотных областей простых пространственных, неполных пространственных и полных пространственных резонансов.

4. Определяются по экспериментальным данным или по справочным коэффициент потерь и динамический модуль упругости для слоистых элементов с вибропоглощением.

5. Определяются по формулам (2.74), (2.76), (2.82), (2.84), (2.87) значения звукоизоляции двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов во всём нормируемом частотном диапазоне. По полученным данным строится частотная характеристика звукоизоляции двойной ограждающей конструкции.

6. Вычисляется индекс изоляции воздушного шума двойной ограждающей конструкции путём сопоставления значений полученной частотной характеристики звукоизоляции с оценочной кривой [68].

Алгоритм использован для разработки компьютерной программы [64], которая выполнена на языке программирования Mathcad в среде Mathcad и представляет собой инструмент для расчёта звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением. В программе при расчёте задаются параметры ограждающей конструкции: ширина и длина ограждения, толщина, динамический модуль упругости и коэффициент внутренних потерь слоёв конструкции, модуль сдвига вибропоглощающего слоя, а также толщина воздушного зазора и звукопоглощающего материала между слоистыми элементами. По этим данным рассчитываются граничные частоты, строится частотный график звукоизоляции и определяется значение индекса изоляции воздушного шума. Таким образом, используя программу, на стадии проектирования, возможно, определять звукоизоляцию двойной ограждающей конструкции и изменять ее значения за счет изменения различных параметров ограждения.

Разработанная программа использована при дальнейших расчётах звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением.

4.1.2. Расчёт звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением

Анализ процесса прохождения звука через двойные ограждающие конструкции из слоистых элементов показывает, что частотная характеристика звукоизоляции состоит из трёх участков, на которых звукоизоляция зависит от поверхностной плотности ограждения, частоты звука, коэффициента потерь, а также от размеров двойного ограждения и его жесткостных параметров. В соответствии с алгоритмом, разработанным в п. 4.1.1, и реализующей его программой можно вычислить граничные частоты расчётных областей и звукоизоляцию в данных частотных диапазонах.

Ниже приведен пример определения звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, выполненных из листов ГКЛ толщиной 12,5 мм., клеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 толщиной 1 мм, с воздушным зазором толщиной 50 мм, размеры двойного ограждения 2.50×1.20 м.

Исходные значения:

Слоистый элемент 1 (рисунок 1.1)

$$m'_1 = 19,1 \text{ кг/м}^2; E_{11} = E_{12} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2; E_{13} = 13,6051 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2;$$

$$G_{13} = 4,535 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; \nu_{11} = \nu_{12} = 0,2; \nu_{13} = 0,3; \eta_{13} = 0,5; h_{11} = h_{12} = 0,0125 \text{ м};$$

$$h_{13} = 0,0005 \text{ м}; a = 2,5 \text{ м}; b = 1,2 \text{ м}; d = 0,05 \text{ м}.$$

Слоистый элемент 2 (рисунок 1.1)

$$m'_3 = 19,1 \text{ кг/м}^2; E_{31} = E_{32} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2; E_{33} = 13,6051 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2;$$

$$G_{33} = 4,535 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; \nu_{31} = \nu_{32} = 0,2; \nu_{33} = 0,3; \eta_{33} = 0,5; h_{31} = h_{32} = 0,0125 \text{ м};$$

$$h_{33} = 0,0005 \text{ м}; a = 2,5 \text{ м}; b = 1,2 \text{ м}; d = 0,05 \text{ м}.$$

Расчёт:

Определяется граничная частота расчётных областей.

Граничная частота простого пространственного резонанса определяется по

формуле (2.109)
$$f_{r_{m_o n_o}} = \frac{c_0}{4a} = \frac{344}{4 \cdot 2,5} = 34,4 \text{ Гц}.$$

Находятся приближенные значения низшей частоты неполного пространственного резонанса. Сначала находятся угловые характеристики, определяющие характер согласования звуковых полей и вибрационного поля двойного ограждения. Это соответствует условию $m=m'=1, n'=1/2$.

$$\text{По формуле (2.106) определяется угол } \alpha_{mn_0} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2,5 \cdot 1}{1,2 \cdot 1 \cdot 2} = 43,85^\circ.$$

$$\text{Отсюда по формуле (2.108) } f'_{\Gamma mn_0} = \frac{344}{2 \cdot 2,5 \cdot 0,6927} = 99,3 \text{ Гц.}$$

Так же для условия $n=n'=1, m'=1/2$.

$$\alpha_{m_0 n} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 2,5}{1,2 \cdot 1} = 13,5^\circ,$$

$$f'_{\Gamma m_0 n} = \frac{344}{2 \cdot 1,2 \cdot 0,2334} = 614,1 \text{ Гц.}$$

Для слоистого элемента определяются жесткостные параметры:

$$A_{31} = A_{32} = 395507,813 \text{ Н; } B_{31} = B_{32} = 29296,875 \text{ Н;}$$

$$D_{31} = D_{32} = 3432,617 \text{ Н}\cdot\text{м; } D_{33} = 0,00012459 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$F_{31} = F_{32} = 197,574 \text{ Н}\cdot\text{м; } S_3 = 450 \text{ Н/м;}$$

$$F_3 = 6469,727 \text{ Н}\cdot\text{м; } T_3 = 395,508 \text{ Н}\cdot\text{м;}$$

$$L_3 = 732421,875 \text{ Н; } N_3 = 29,297 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Для точного определения граничного неполного пространственного резонанса находится волновое число изгибных колебаний (формула 2.95) на частоте $f'_{\Gamma mn_0}$. С учетом целочисленности n'' , он принимается равным 1, волновое число будет равно $k_{\Gamma mn_0} = 7,981$.

Тогда точное значение граничной частоты неполного пространственного резонанса определяется по формуле (2.99) $f'_{\Gamma mn_0} = 115 \text{ Гц.}$

Аналогично по формуле (2.100) находится $k_{\Gamma m_0 n} = 20,982$; и по формуле (2.102) $f_{\Gamma m_0 n} = 647 \text{ Гц.}$ За значение частоты неполного пространственного резонанса

нанса принимается наименьшее значение, определенное по формулам (2.99) и (2.102).

Граничная частота полного пространственного резонанса определится по формуле (2.90), $f_{Гmn} = 3119$ Гц.

Далее в каждой граничной частоте расчётных областей находится коэффициент звукоизлучения и звукоизоляция двойной ограждающей конструкции.

Например, в области простых пространственных резонансов возьмём частоту $f_{cp} = 80$ Гц, $\Delta f = f_b - f_n = 111 - 89 = 22$ Гц.

Определим число резонансов в данной полосе частот.

$$m_{cp} = 2,111; m'_{cp} = 0,044; n_{cp} = 2,211; n'_{cp} = 0,03; \Delta N = 2,842.$$

По формуле (2.76) определяем коэффициент звукоизлучения на расчётной частоте $S = 0,815$. После рассчитывается звукоизоляция ограждающей конструкции в третьоктавном диапазоне частот по формуле (2.75) $R_{80} = 29,1$ дБ.

Аналогично определяется звукоизоляция на остальных третьоктавных частотах области простых пространственных резонансов: $R_{50} = 22,5$ дБ;

$$R_{63} = 25,7 \text{ дБ}; \quad R_{100} = 28,5 \text{ дБ}; \quad R_{115} = 26,8 \text{ дБ}.$$

В области неполных пространственных резонансов выполняются расчёты на частоте $f_{cp} = 500$ Гц, $\Delta f = f_b - f_n = 561 - 446 = 115$ Гц. Проводятся вспомогательные расчёты на указанной частоте:

$$m_b = 8,14; \quad n_b = 3,907; \quad m_{cp} = 13,968; \quad n_{cp} = 6,925; \quad m'_b = 2,853; \quad n'_b = 1,977; \\ a_{mn_0} = 0,403; \quad a_{m_0n} = 0,602; \quad \varphi_{mn_0} = 1,167; \quad \varphi_{m_0n} = 0,968.$$

Коэффициент звукоизлучения определяется по формуле (2.84) $S = 0,385$.

Звукоизоляция в третьоктавной полосе на частоте 500 Гц, определяется по формуле (2.83) и составляет 47,0 дБ.

По аналогии рассчитывается звукоизоляция на всех других третьоктавных частотах области неполных пространственных резонансов: $R_{129} = 31,9$ дБ; $R_{160} = 33,7$ дБ; $R_{200} = 37,0$ дБ; $R_{250} = 39,5$ дБ; $R_{315} = 42,1$ дБ; $R_{400} = 44,5$ дБ; $R_{630} = 49,5$ дБ; $R_{800} = 52,0$ дБ; $R_{1000} = 54,2$ дБ; $R_{1250} = 56,0$ дБ; $R_{1600} = 58,0$ дБ; $R_{1917} = 54,9$ дБ.

В области полных пространственных резонансов расчёт звукоизоляции вычисляется на частоте $f_{\text{ср}} = 5000$ Гц, $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = 5657 - 4490 = 1167$ Гц. На указанной частоте определяются промежуточные расчёты: $n'_{\text{ср}} = 34,614$; $m'_{\text{ср}} = 71,498$. Коэффициент звукоизлучения рассчитывается по формуле (2.50) $S = 207,6$. Звукоизоляция определяется по формуле (2.88) $R_{5000} = 60,5$ дБ.

Аналогично определяется на всех других частотах области полных пространственных резонансов: $R_{2041} = 49,5$ дБ; $R_{2500} = 52,8$ дБ; $R_{3150} = 50,8$ дБ; $R_{4000} = 55,8$ дБ; $R_{6300} = 65,0$ дБ.

Частотные характеристики звукоизоляции двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов, полученные расчётом и экспериментально представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

4.1.3. Сравнение теоретических расчётов и экспериментальных данных звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением

Сравнение теоретических и экспериментальных данных звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов проведены для оценки точности расчётов. Ограждающие конструкции выполнялись из листов ГКЛ и ОСП толщиной 12,5 и 9 мм, склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117 толщиной 1 мм с воздушным зазором толщиной 50 мм. Исследуемые образцы устанавливались в проём больших реверберационных помещений с заделкой из гипсового раствора, которая моделирует шарнирное опирание и не создаёт по краям демпфирование.

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены теоретически и экспериментально полученные частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением. Теоретический расчёт выполнялся по разработанному методу.

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что теоретический метод расчёта определяет звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций из

слоистых элементов с хорошей сходимостью с экспериментальными значениями, что указывает на достоверность полученных расчётных формул.

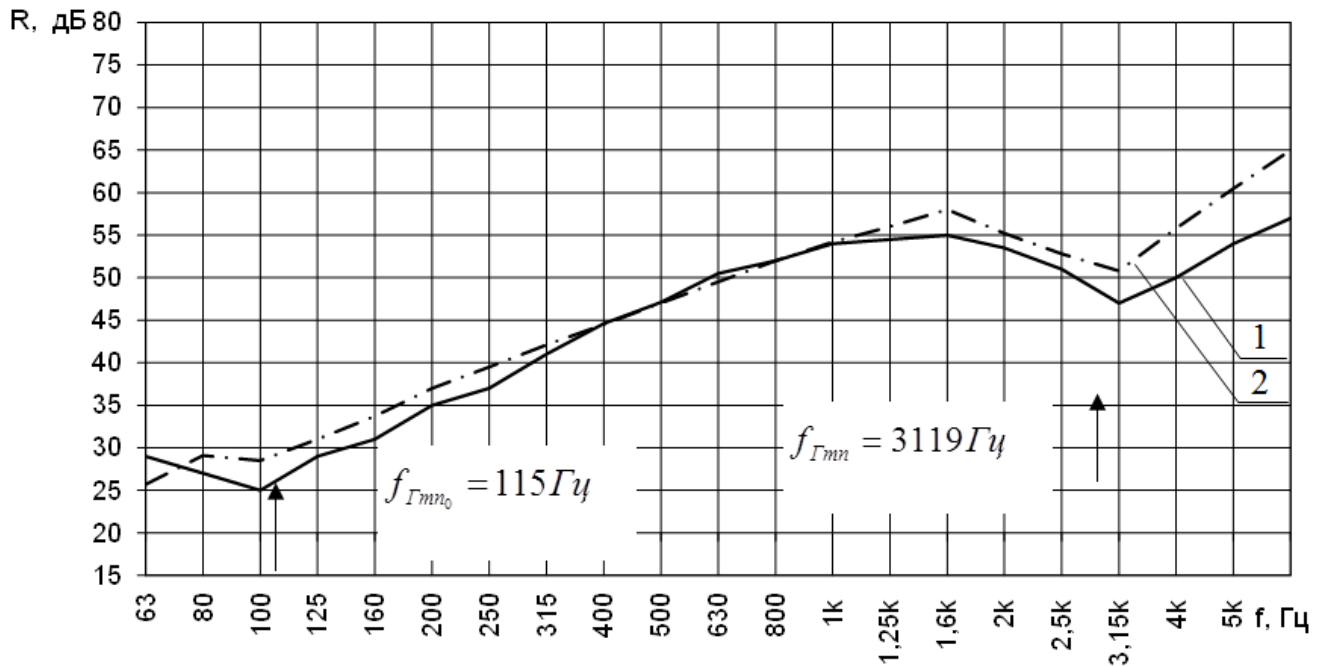


Рисунок 4.1 – Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух листов ГКЛ толщиной по 12,5 мм, склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117, установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – экспериментальная кривая, $R_w = 48 \text{ дБ}$; 2 – расчётная кривая, $R_w = 49 \text{ дБ}$

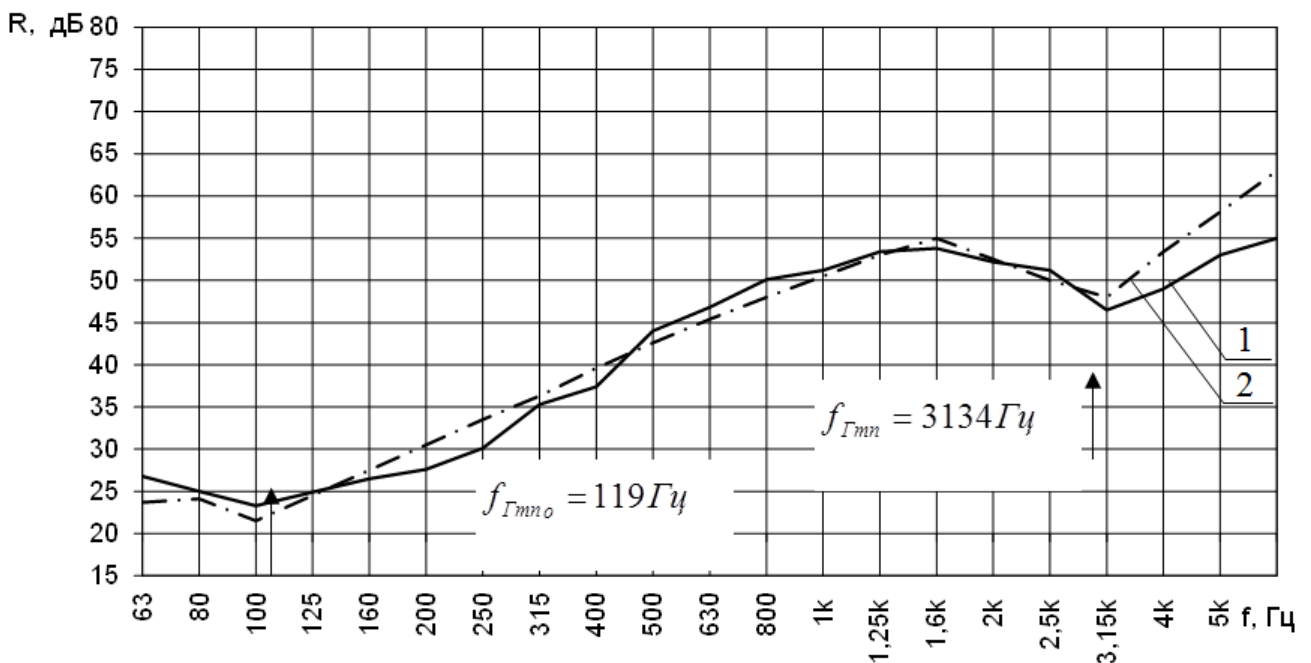


Рисунок 4.2 – Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, состоящих из двух листов ОСП толщиной по 9 мм, склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117, установленных через ВЗ толщиной 50 мм: 1 – экспериментальная кривая, $R_w = 43 \text{ дБ}$; 2 – расчётная кривая, $R_w = 44 \text{ дБ}$

Для оценки влияния характеристик вибропоглощающего материала на звукоизоляцию ограждения выполнены теоретические расчеты звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением при различных динамических модулях упругости.

Из сравнения теоретических частотных характеристик звукоизоляции ограждений, представленных на рисунке 4.3 видно, что при повышении динамического модуля упругости, происходит перемещение граничной частоты волнового совпадения в зону низких частот.

Таким образом, выбирать вибропоглощающий материал в двойных ограждениях необходимо при оптимальном соотношении и коэффициента потерь и динамического модуля упругости.

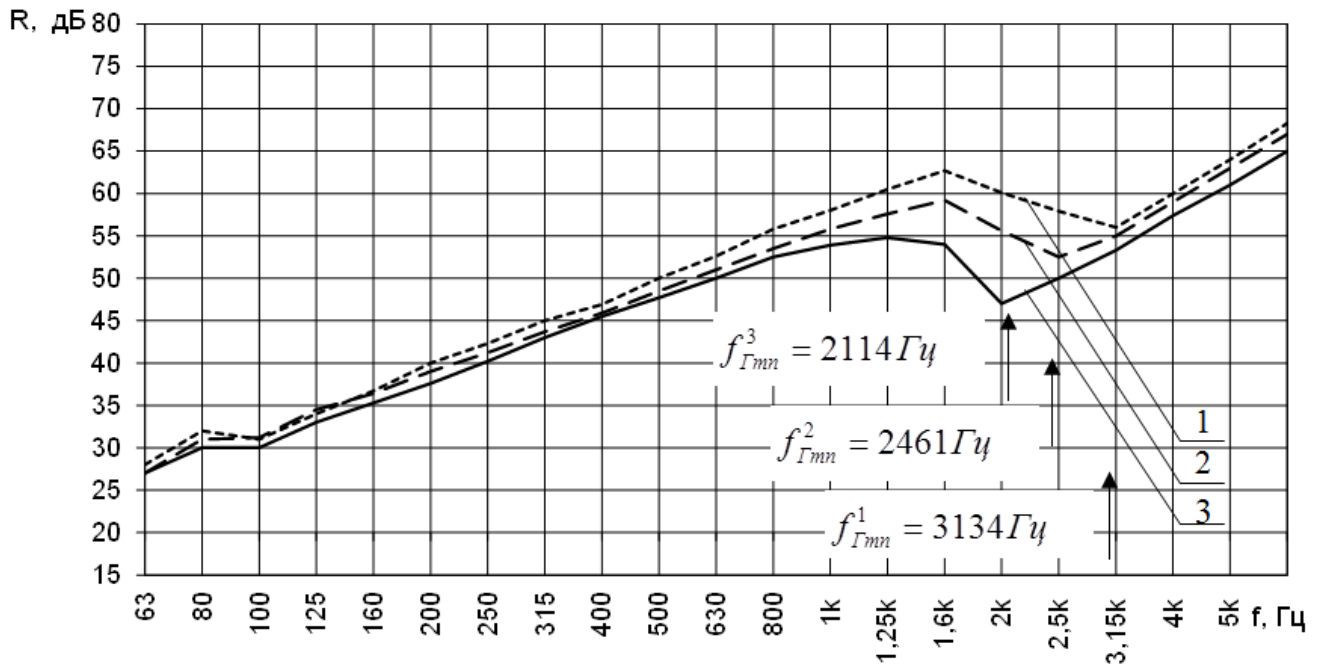


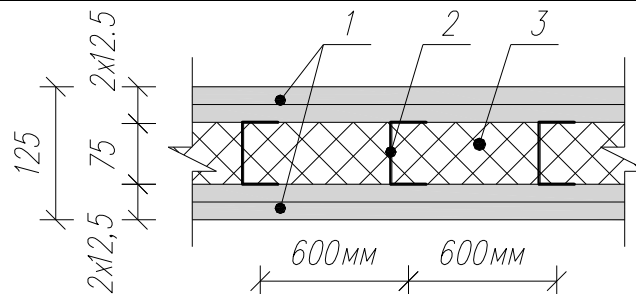
Рисунок 4.3 – Расчетные частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощающей мастикой с динамическим модулем упругости: 1 – $E_0 = 15 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $R_w = 53 \text{ дБ}$; 2 – $E_0 = 15 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $R_w = 51 \text{ дБ}$; 3 – $E_0 = 15 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $R_w = 50 \text{ дБ}$

4.2. Рекомендуемые конструктивные решения двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов для применения в гражданских зданиях

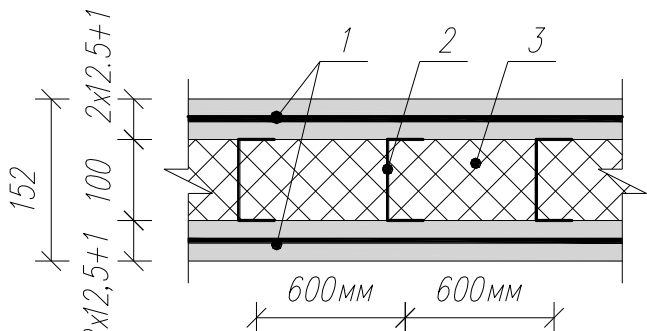
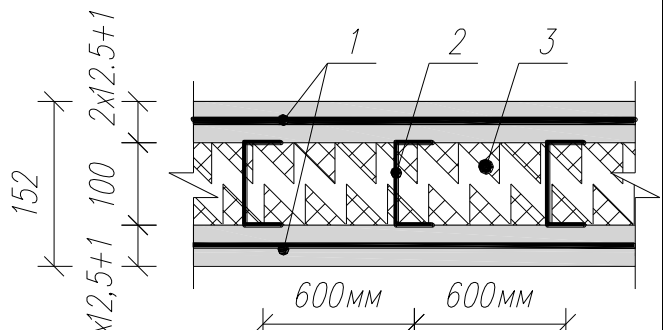
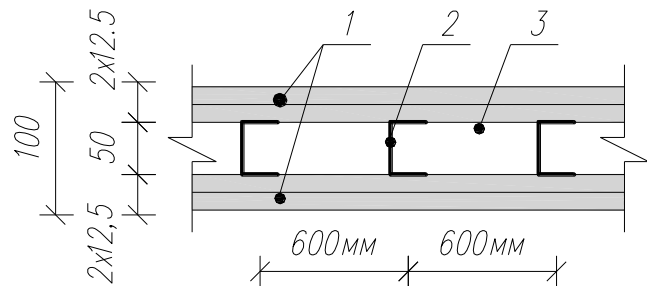
Выполненные в 3 главе экспериментальные исследования двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов, которые подтверждены расчётами в п. 4.1.2. позволяют сделать рекомендации по их эффективному использованию в жилых и общественных зданиях.

Варианты использования двойных ограждений из слоистых элементов с рациональными конструктивными решениями с учётом обеспечения нормативных требований к индексу изоляции воздушного шума, представлены в таблице 4.1. Учитывая косвенную передачу звука в натурных условиях, двойные ограждения подобраны с индексом изоляции воздушного шума больше на 2 - 3 дБ чем требуемое нормативное значение.

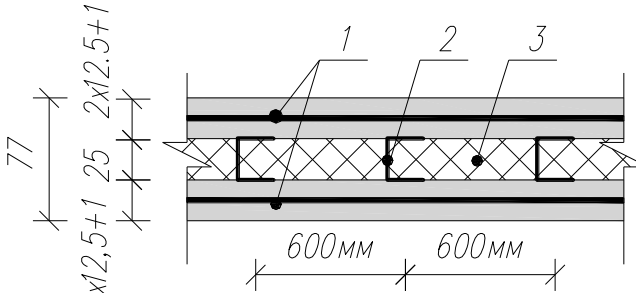
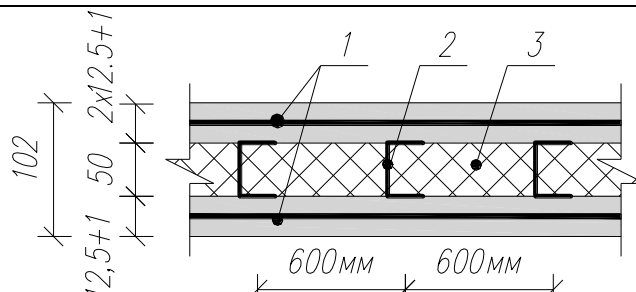
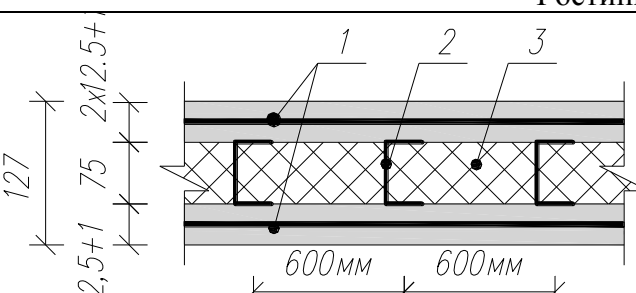
Таблица 4.1 – Конструктивные решения двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов

№ п/п	Описание конструктивного решения двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов	Индекс изоляции воздушного шума по результатам лабораторных измерений R_w , дБ	Вариант применения ограждения в здании и требуемые нормативные индексы изоляции воздушного шума, R_w , дБ [65]
1	2	3	4
Жилые здания			
1	 1 – два слоя ГКЛ, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС75x50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 54$ дБ	Стены и перегородки между помещениями квартир и офисами; между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями, $R_w = 52$ дБ

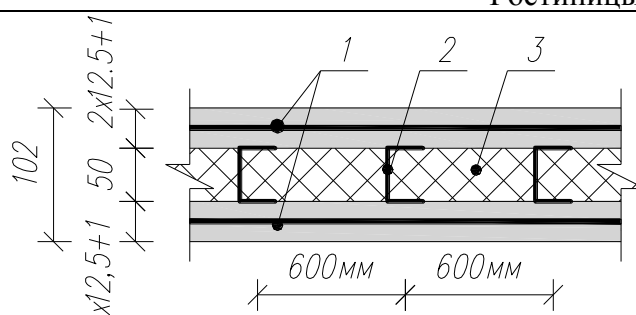
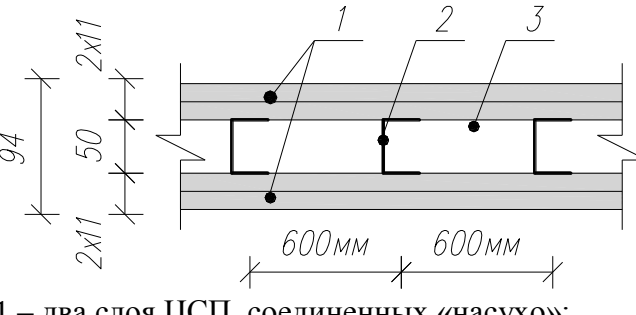
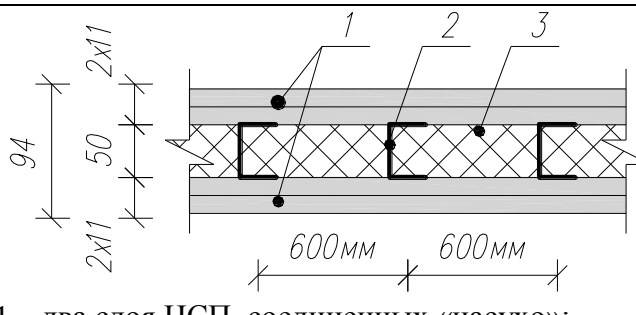
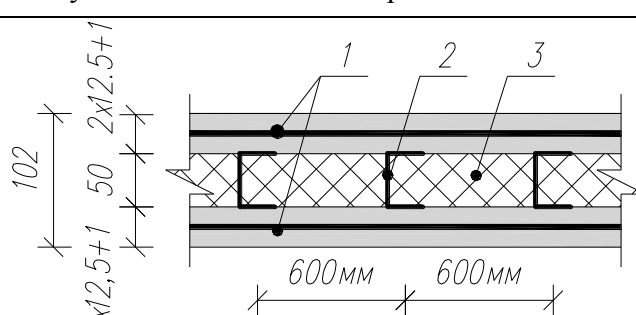
Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Жилые здания			
2	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент117; 2 – профиль ПС100х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 57$ дБ	Стены между помещениями квартир и магазинами, $R_w = 55$ дБ
3	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС100х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 59$ дБ	Стены и перегородки, отделяющие помещения квартир от ресторанов, кафе, спортивных залов, $R_w = 57$ дБ
4	 1 – два слоя ГКЛ, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС50х50; 3 – воздушный зазор	$R_w = 45$ дБ	Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире, $R_w = 43$ дБ

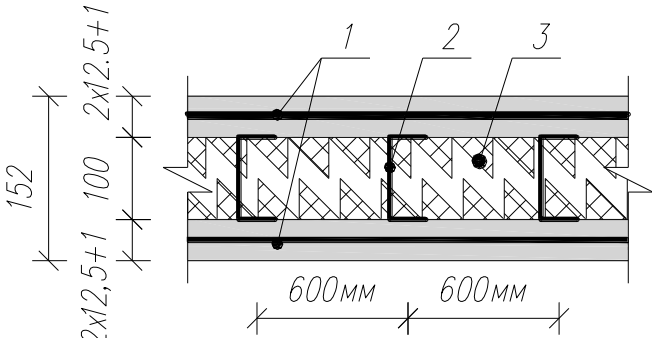
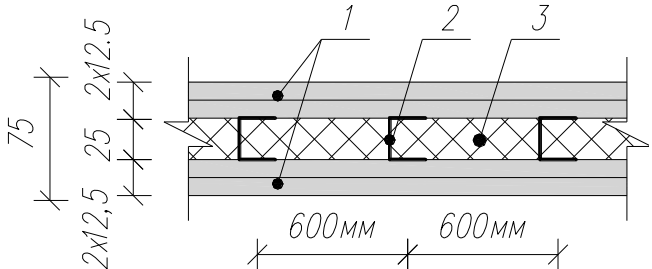
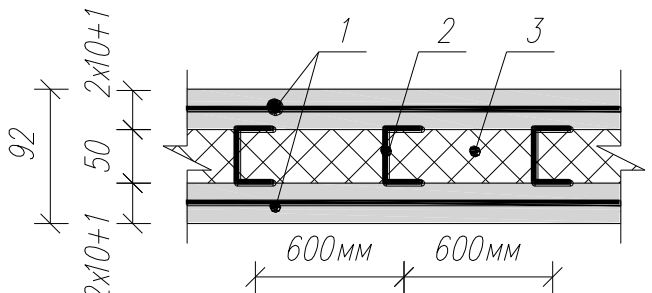
Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Жилые здания			
5	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС25х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 49$ дБ	Перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры, $R_w = 47$ дБ
6	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 53$ дБ	Стены и перегородки между комнатами общежитий, $R_w = 50$ дБ
Гостиницы			
7	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС75х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 56$ дБ	Стены и перегородки между номерами гостиниц, имеющих по международной классификации пять и четыре звезды, $R_w = 53$ дБ

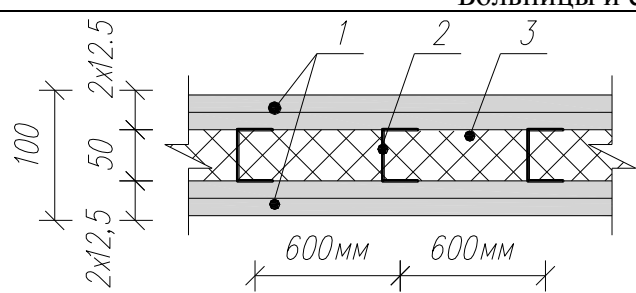
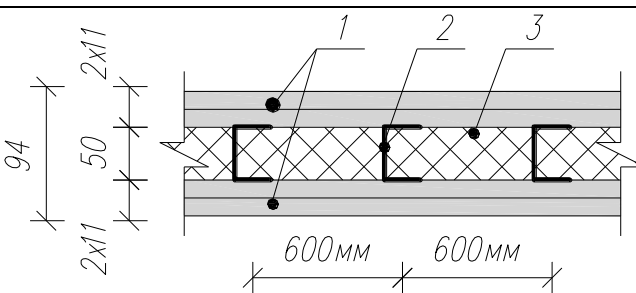
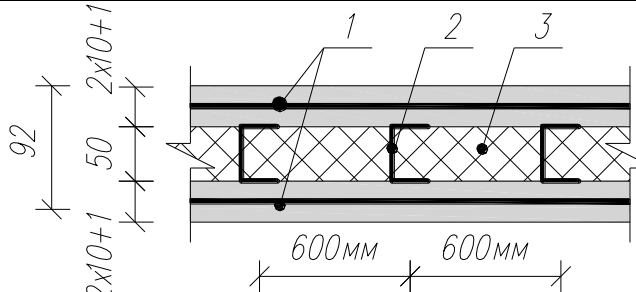
Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Гостиницы			
8	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 53$ дБ	Стены и перегородки между номерами гостиниц, имеющих по международной классификации три звезды, $R_w = 51$ дБ
9	 1 – два слоя ЦСП, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС50х50; 3 – воздушный зазор	$R_w = 52$ дБ	Стены и перегородки между номерами гостиниц, имеющих по международной классификации менее трех звезд, $R_w = 50$ дБ
10	 1 – два слоя ЦСП, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 56$ дБ	Стены и перегородки, отделяющие номера от помещений общего пользования гостиниц, имеющих по международной классификации пять и четыре звезды, $R_w = 53$ дБ
11	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 53$ дБ	Стены и перегородки, отделяющие номера от помещений общего пользования гостиниц, имеющих по международной классификации три звезды и менее, $R_w = 51$ дБ

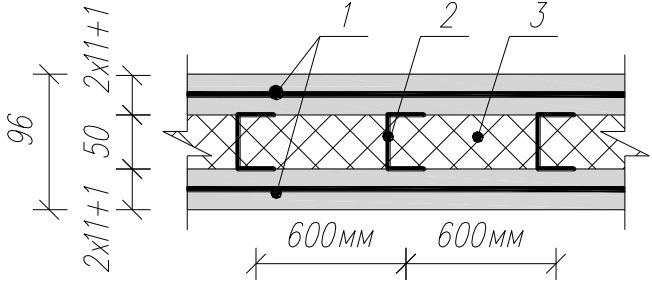
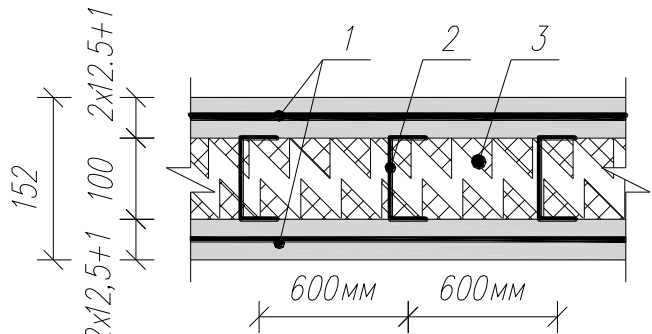
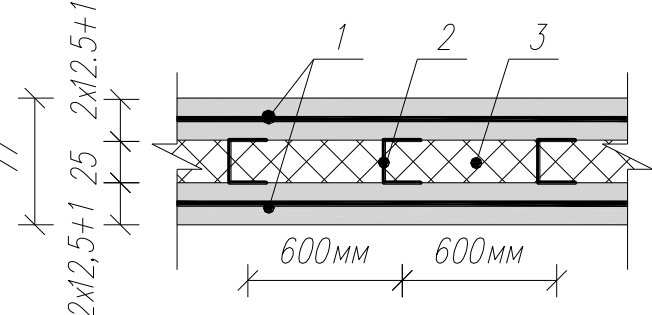
Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Гостиницы			
12	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС100х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 59$ дБ	Стены и перегородки, отделяющие номера от ресторанов, кафе в гостиницах, имеющих по международной классификации три звезды и менее, $R_w = 57$ дБ
Административные здания, офисы			
13	 1 – два слоя ГКЛ, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС25х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 47$ дБ	Стены и перегородки между кабинетами и отделяющие кабинеты от рабочих комнат, $R_w = 45$ дБ
14	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 50$ дБ	Стены и перегородки между офисами различных фирм, между кабинетами различных фирм, $R_w = 48$ дБ

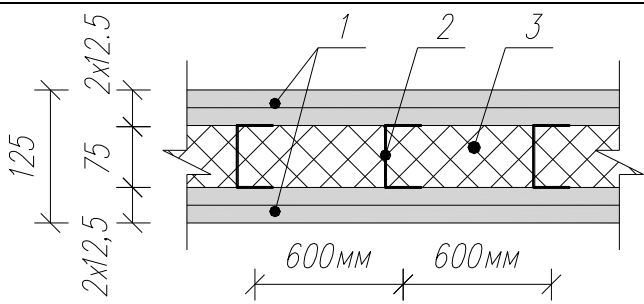
Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Больницы и санатории			
15	 1 – два слоя ГКЛ, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 51$ дБ	Стены и перегородки между палатами, кабинетами врачей, $R_w = 48$ дБ
16	 1 – два слоя ЦСП, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 56$ дБ	Стены и перегородки между операционными и отделяющие операционные от других помещений, $R_w = 54$ дБ
Учебные заведения			
17	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 50$ дБ	Стены и перегородки между классами, кабинетами и аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования, $R_w = 48$ дБ

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4
Учебные заведения			
18	 1 – два слоя ЦСП, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 58$ дБ	Стены и перегородки между музыкальными классами средних учебных заведений и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования, $R_w = 55$ дБ
19	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС100х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 59$ дБ	Стены и перегородки между музыкальными классами высших учебных заведений, $R_w = 57$ дБ
Детские дошкольные учреждения			
20	 1 – два слоя ГКЛ, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС25х50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 49$ дБ	Стены и перегородки между групповыми комнатами, спальнями и между другими детскими комнатами, $R_w = 47$ дБ

Окончание таблицы 4.1

1	2	3	4
Детские дошкольные учреждения			
21	 1 – два слоя ГКЛ, соединенных «насухо»; 2 – профиль ПС75x50; 3 – звукопоглощающий материал	$R_w = 54$ дБ	Стены и перегородки, отделяющие групповые комнаты, спальни от кухонь, $R_w = 52$ дБ

4.3. Практическое применение двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением

Создание акустически эффективных ограждающих конструкций, отвечающих требованиям норм по индексу изоляции воздушного шума, является одной из важнейших задач при строительстве и реконструкции жилых и общественных зданий.

В настоящее время в торгово-развлекательных центрах очень востребовано устройство офисных помещений. При возведении торгово-развлекательных центров, требования к индексам изоляции воздушного шума ограждающих конструкций, которые разделяют офисные помещения, должны учитываться при их проектировании. В тоже время, при устройстве этих помещений в пределах существующих зданий, звукоизоляции ограждений, выделяющих новые по функциональному назначению помещения, не уделяется должного внимания.

Такая задача была решена нами при перепланировке торговых помещений здания под офисные помещения различных организаций.

В соответствии с нормами [65] индекс изоляции воздушного шума ограждением между офисными помещениями различных организаций равен 48 дБ. Для разделения офисов различных фирм в торгово-развлекательном центре была за-

проектирована двойная конструкция из слоистых элементов с вибропоглощением. Слоистые элементы состоят из гипсокартонных листов толщиной по 10 мм, которые склеены вибропоглощающим материалом Акцент-117. Зазор между слоистыми элементами заполнялся минераловатными плитами Rockwool акустик баттс с объемной плотностью 45 кг/м^3 толщиной 50 мм (рисунок 4.4).

Измерение изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией, установленной между офисами, в лабораторных и натурных условиях выполнялись в соответствии с действующими стандартами на измерения [22, 24].

Экспериментально полученные в лабораторных и натурных условиях частотные зависимости звукоизоляции двойных ограждений представлены на рисунке 4.5. Установлено, что звукоизоляция запроектированного двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением, определенная в натурных условиях, на 2 дБ меньше, чем полученная в лабораторных условиях. Главная причина, из-за которой наблюдается снижение звукоизоляции – это косвенная передача звука.

Акт внедрения разработанного двойного ограждения из слоистых элементов с вибропоглощением представлен в приложении 1.

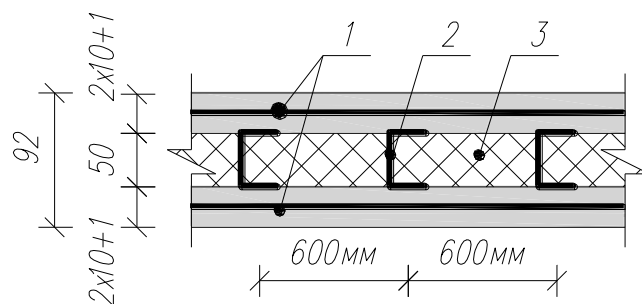


Рисунок 4.4 – Конструктивное решение двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов с вибропоглощением: 1 – два слоя ГКЛ толщиной по 10 мм, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС50х50; 3 – звукопоглощающий материал толщиной 50 мм

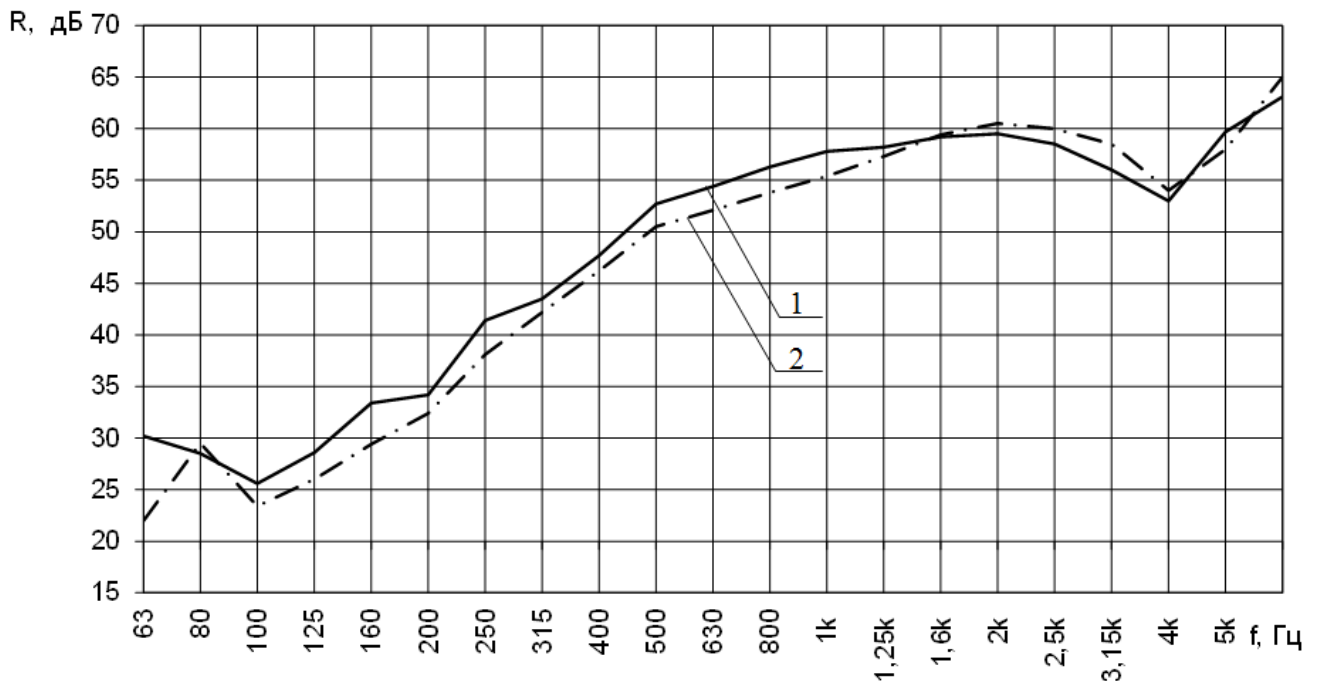


Рисунок 4.5 – Частотные характеристики звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов, выполненных из листов ГКЛ толщиной по 10 мм, склеенных вибропоглощающей мастикой Акцент-117, с зазором, заполненным звукопоглощающим материалом толщиной 50мм: 1 – в акустических помещениях ВоГУ, $R_w = 50$ дБ; 2 – в натуральных условиях, $R_w = 48$ дБ

Другим примером практического внедрения внутреннего ограждения является устройство двойной конструкции толщиной 77 мм. Запроектированное ограждение возводилось между санузлом и комнатой в квартире жилого дома, расположенного по адресу г. Вологда, ул. Северная д.36 Б. Изначально по проекту между помещениями была установлена каркасная перегородка толщиной 75 мм, выполненная по металлическому каркасу с обшивкой из гипсокартонных листов по одному листу с каждой стороны. Воздушный промежуток между обшивками заполнялся звукопоглощающим материалом толщиной 50 мм. Существующее ограждение не соответствовало нормам по звукоизоляции. Данная перегородка была заменена на двойное ограждение, выполненное из слоистых элементов с вибропоглощением. Слоистые элементы представляют собой два гипсокартонных листа толщиной по 12,5 мм, склеенных вибропоглощающим материалом Акцент-117. Зазор между слоистыми элементами заполнялся минераловатными плитами Rockwool акустик баттс с объемной плотностью 45 кг/м^3 толщиной 25 мм (рисунок 4.6). Полученные частотные зависимости звукоизоляции перегородками меж-

ду санузелом и комнатой в натуральных и лабораторных условиях представлены на рисунке 4.7. Анализируя полученные частотные характеристики, можно сделать вывод, что разработанное двойное ограждение из слоистых элементов имеет больший индекс изоляции воздушного шума, чем существующая каркасная перегородка. Предложенное двойное ограждение практически не отличается толщиной от существующей конструкции, что позволяет сохранить площадь помещений.

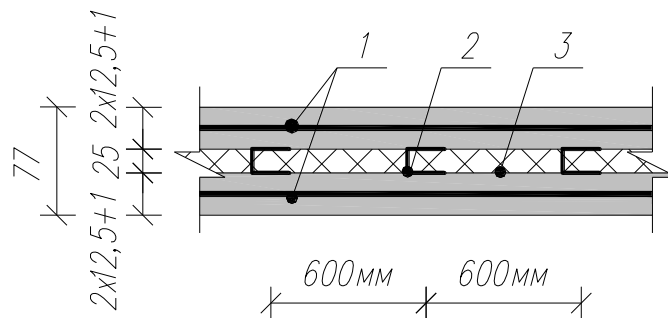


Рисунок 4.6 – Конструктивное решение двойной ограждающей конструкции из слоистых элементов с вибропоглощением: 1 – два слоя ГКЛ толщиной по 12,5 мм, склеенных ВПМ Акцент-117; 2 – профиль ПС 25x50; 3 – ЗПМ толщиной 25 мм

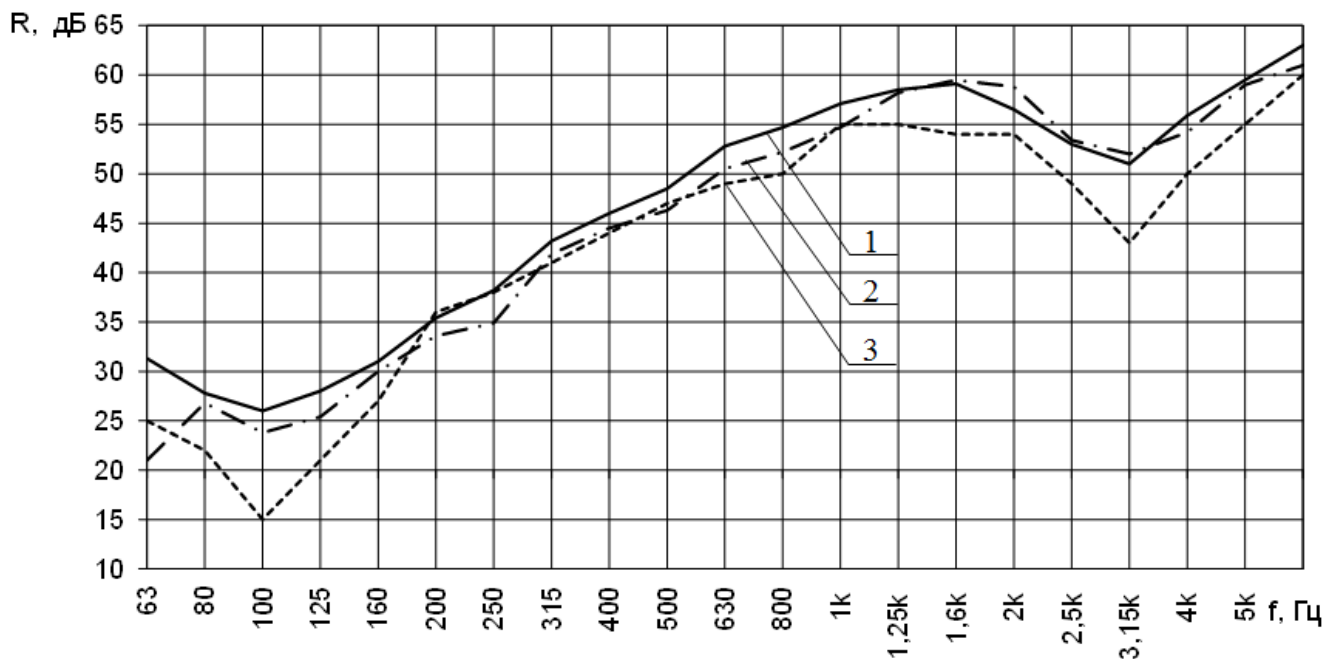


Рисунок 4.7 – Частотные характеристики звукоизоляции: 1 – двойное ограждение из слоистых элементов, выполненных из двух ГКЛ толщиной по 12,5 мм, склеенных ВПМ Акцент-117, с зазором, заполненным ЗПМ толщиной 25 мм (в акустических помещениях ВоГУ), $R_w = 49$ дБ; 2 – двойное ограждение из слоистых элементов, выполненных из двух ГКЛ толщиной по 12,5 мм, склеенных ВПМ Акцент-117, с зазором, заполненным ЗПМ толщиной 25 мм (в натуральных условиях), $R_w = 47$ дБ; 3 – существующее каркасное ограждение с однослойными обшивками из ГКЛ толщиной по 12,5 мм с зазором, заполненным ЗПМ толщиной 50 мм, $R_w = 44$ дБ (в натуральных условиях)

Выводы по главе 4

1. Разработанный метод расчёта звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов с вибропоглощением и реализующей его программой позволяет исключить на этапе проектирования конструктивные решения, не обеспечивающие необходимую звукоизоляцию.
2. Сравнительный анализ расчетных и теоретических данных звукоизоляции двойных конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением показал, что разработанный метод расчета и реализующая его программа хорошо реагируют на изменение конструктивных и физико – механических параметров ограждения.
3. Обоснованные экспериментально и теоретически конструктивные решения двойных ограждений из слоистых элементов позволили разработать рекомендации по их применению в помещениях гражданских зданий с учётом нормативных требований по индексу изоляции воздушного шума.
4. На основании практического внедрения исследуемых ограждений в помещениях жилых и общественных зданий доказана акустическая эффективность двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением в сравнении существующими традиционными решениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. На основании исследований возможных способов повышения звукоизоляции двойных конструкций из слоистых элементов доказана актуальность регулирования их параметров с целью повышения звукоизолирующей способности.

2. Выполнен анализ прохождения звуковой энергии через двойные ограждения из слоистых элементов на базе теории самосогласования волновых полей. Выведены расчётные формулы для вычисления граничных частот резонансов и формулы для определения звукоизоляции двойного ограждения из слоистых элементов. Установленные зависимости позволяют целенаправленно проектировать двойные ограждения из слоистых элементов путём учёта влияния на их звукоизоляцию геометрических и конструктивных параметров ограждения, динамических модулей упругости слоев элементов, коэффициентов потерь материалов, поверхностной плотности.

3. Основываясь на возможных конструктивных приемах, влияющих на звукоизоляцию двойных конструкций, разработан и выполнен комплекс экспериментальных исследований, позволяющий установить уровень влияния параметров конструкций и физико-механических характеристик их материалов на величину звукоизоляции двойных ограждений из слоистых элементов.

4. Экспериментально показана возможность регулирования звукоизолирующих характеристик двойных конструкций из слоистых элементов за счёт устройства в них вибропоглощающего слоя, изменения величины зазора между слоистыми элементами, увеличения площади поверхности звукопоглощающего материала и поверхностной плотности слоистых элементов. Полученные зависимости обеспечивают рациональное проектирование двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов.

5. Выполненное сравнение частотных характеристик и индексов изоляции воздушного шума двойных конструкций, полученных нами и другими авторами для аналогичных решений, показало хорошую сходимость результатов, что подтверждает надежность выполненных в работе экспериментальных исследований.

6. Разработан метод расчёта звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением, учитывающий их геометрические, конструктивные и физико-механические параметры и составлена программа для его реализации. Метод расчёта позволяет на стадии проектирования производить выбор и разработку акустически эффективные конструктивные решения двойных ограждений из слоистых элементов.

7. Разработаны рекомендации по применению двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов в гражданских зданиях с учётом нормативных требований по индексу изоляции воздушного шума.

Рекомендации по дальнейшему применению результатов работы:

- разработанные конструктивные решения двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением, возможно, применять при новом строительстве жилых и общественных зданий для выполнения нормативных требований по индексу изоляции воздушного шума, а так же при реконструкции в случаях необходимости повышения звукоизоляции существующих ограждений;

- полученные результаты могут использоваться при подготовке методических рекомендаций к своду правил «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции» в разделе 9.5 «Расчет изоляции воздушного шума каркасно-обшивной перегородкой при заполнении воздушного промежутка пористым или пористо-волокнистым материалом».

Перспективы дальнейших исследований. На основе предложенных конструктивных решений двойных ограждений может быть разработана номенклатура и банк данных новых двойных ограждающих конструкций из

слоистых элементов, учитывающие их конструктивные параметры и физико-механические характеристики материалов.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. Из латинского алфавита

- A_1, B_1 - амплитуды прямой и обратной изгибных «бегущих» волн.
- a, b - длина и ширина ограждения.
- c, c_u - фазовые скорости изгибных волн без учета и с учетом сдвигов.
- c_s - скорость сдвиговых волн вибродемпфирующего слоя, нагруженного массами внешних слоев.
- c_o - скорость звука в среде.
- D - амплитуда экспоненциально затухающего процесса.
- $D_n = \frac{E' h^3}{12}$ - цилиндрическая жесткость пластины.
- d - толщина воздушного промежутка.
- E - динамический модуль упругости.
- $e = 2,718...$ - основание натурального логарифма.
- $f_{zp} = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}}$ - граничная частота волнового совпадения.
- $f_{\Gamma mn}$ - граничная частота полных пространственных резонансов (ППР).
- $f_{\Gamma mn_o}$ - граничный неполный пространственный резонанс (НПР).
- $f_{\Gamma m_o n_o}$ - граничный простой пространственный резонанс (ПрПР).
- $\Delta f_{\Gamma mn}$ - частотные поправки к граничной или текущей частоте за счет конечности размеров.
- f_n - крайняя нижняя частота полосы.
- f_e - крайняя верхняя частота полосы.
- G - модуль сдвига.
- h - толщина пластины.
- h_1, h_2 - толщины верхнего и нижнего наружных слоев трехслойного элемента.

- $2h_3$ - толщина промежуточного вибропоглощающего слоя.
- $k_o = \frac{\omega}{c_o}$ - волновое число для среды (воздуха).
- Δk_o - разность волновых чисел среды, соответствующих крайним частотам полосы.
- $\Delta k_{om_1n_1}, \Delta k_{om_2n_2}$ - волновые числа среды, соответствующие крайним частотам $f_{m_1n_1}, f_{m_2n_2}$, на которых вклад резонанса остается решающим.
- $\left. \begin{matrix} m = 1, 2, 3, \dots \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{matrix} \right\}$ - номера форм собственных колебаний пластины, текущий индекс.
- m', n' - номера форм распределения звукового давления в плоскости пластины.
- m_o, n_o - числа, характеризующие звуковое поле в плоскости ограждения.
- m_1, n_1 - числа полуволин изгиба пластины вдоль ее сторон a и b .
- m_{cp}, n_{cp} - номера резонансов, соответствующих среднегеометрической частоте полосы Δf .
- m_n, n_n - наинизший номер резонанса в интервале.
- m_e, n_e - наивысший номер резонанса в том же интервале.
- $N_e = m_e + n_e$ - число неполных пространственных резонансов в полосе Δf .
- $N_{cp} = \sqrt[4]{n_{cp}^2 m_{cp}^2}$ - усредненный номер неполного пространственного резонанса, соответствующего среднегеометрической частоте полосы Δf .
- ΔN - число резонансов пластины в полосе Δf .
- $P_{\Pi}, P_{OT}, P_{\Pi P}$ - звуковое давление в падающей, отраженной и прошедшей звуковых волнах.
- $P = P_{\Pi} + P_{OT}$ - суммарное звуковое давление в падающей и отраженной звуковых волнах.
- R_o - работа сил внутреннего сопротивления.

S -	коэффициент звукоизлучения.
$\bar{S}_{mn}$ -	коэффициент излучения ограждения, усредненный в полосе Δf .
T_k -	кинетическая энергия.
V_n -	потенциальная энергия.
$v(xyz)$ -	колебательная скорость пластины.
v_m, v_{mn} -	амплитуда колебательной скорости пластины.
$\bar{V}_{mn}^2$ -	усредненное значение квадрата колебательной скорости пластины в интервале Δf_{mn} .
W_1 -	мощность падающих звуковых волн.
W_2 -	излучаемая (прошедшая через ограждение) акустическая мощность.
W_{2c} -	мощность, излучаемая упругими волнами.
W_{2u} -	мощность, излучаемая инерционными волнами.
W_C -	смещения мембраны и прямоугольной пластины при нормальных поперечных колебаниях.
x, y -	текущие координаты.
F, T, L, N -	жесткостные параметры ограждения.

2. Из греческого алфавита

α -	угол падения изгибной волны на прямолинейную границу.
α' -	вещественная часть мнимого угла падения изгибной волны.
$\alpha_{m'n'} \varphi_{m'n'}$ -	углы совпадения звукового и вибрационного полей.
η -	коэффициент внутренних потерь.
$\eta_{эфф}$ -	эффективный коэффициент потерь.
θ, γ_z -	углы падения излучения звуковой волны по отношению к координатным плоскостям $z = 0, y = 0, x = 0$.
ω_{mn} -	среднегеометрическая величина между круговыми частотами наинизшего и наивысшего резонансов в том же интервале.

$\Delta\omega_{mn}$ -	частотный интервал, в котором определяющий вклад в результирующее движение пластин принадлежит mn -му резонансу.
λ, λ_u -	длина изгибной волны без учета и с учетом сдвигов и инерции вращения.
λ_o -	длина звуковой волны.
μ -	поверхностная плотность ограждения.
$V = \frac{a}{b}$ -	отношение большей стороны прямоугольной пластины к меньшей.
ξ -	смещение полосы в изгибной волне.
$\pi = 3,1416\dots$	
ρ -	плотность материала пластины.
ρ_m -	поверхностная плотность мембраны.
ρ_o -	плотность среды (воздуха).
Σ -	сумма.
σ -	коэффициент Пуассона.
τ -	коэффициент звукопередачи ограждения.
φ, ψ, θ -	начальные фазовые углы.
θ_1 -	угол падения звуковой волны.
θ_{2u}, θ_{2c} -	углы излучения звуковых волн соответственно инерционными и свободными колебаниями.
ω -	круговая частота.
∇^2 -	оператор Лапласа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анджелов, В. Л. Звукоизоляция каркасно-обшивочных перегородок / В. Л. Анджелов, А. А. Климухин, Н.А. Минаева //Строительная физика в XXI веке: материалы науч.-техн. конф. – М.: НИИСФ РААСН, 2006. – С. 274-277.
2. Анджелов, В.Л. Проблемы обеспечения звукоизоляции ограждений монолитных жилых и общественных зданий / В.Л. Анджелов // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 193-195.
3. Бобылев, В. Н. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций на частотах, ниже граничной: автореф. дис... канд. техн. наук. – Горький: ГИСИ, 1974. – 25с.
4. Бобылев, В. Н. Звукоизоляция ограждающих конструкций / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич // Теоретические основы строительства: сборник трудов 11-го Польско-Российского научного семинара. – М.: АСВ, 2002. – С. 239-248.
5. Бобылев, В. Н. Исследование звукоизоляции слоистых вибродемпфированных элементов внутренних ограждающих конструкций / В. Н. Бобылев, А.А. Кочкин //Приволжский научный журнал. – 2012. – № 3. – С. 27-33.
6. Бобылев, В. Н. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с оптимизированным типом стоечных профилей / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, В. В. Дымченко // В сборнике: Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума – 2016. – С. 116-118.
7. Бобылев, В. Н. О звукоизоляции легких ограждений с вибродемпфирующими слоями / В. Н. Бобылев, А. А. Кочкин // Актуальные проблемы развития жилищно-коммунального хозяйства городов и населенных пунктов: материалы 9-й международной науч.-практ. конф. – Москва; София; Кавала, 2010. – С. 49 - 52.
8. Бобылев, В. Н. Оптимальное использование резервов звукоизоляции ограждающих конструкций / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич // Вестник РААСН. М., ИПЦ МИКХиС. – 2004. Вып. 8. – С. 105-111.
9. Бобылев, В. Н. Оптимальные параметры звукоизолирующих ограждений /

- В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич // Материалы 15-й сессии Российского акустического общества. – Нижний Новгород. – 2004. – С. 135-139.
10. Бобылев, В. Н. Оптимизация конструктивного решения каркасно-обшивных перегородок с целью повышения их звукоизоляции / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, В. В. Дымченко // В сборнике: IV Всероссийский фестиваль науки – Нижний Новгород. – 2014. – С. 48-49.
 11. Бобылев, В. Н. Оптимизация стоечных профилей каркасно-обшивных перегородок / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, В. В. Дымченко // В сборнике: Великие реки – Нижний Новгород. – 2014. – С. 186-187.
 12. Бобылев, В. Н. Разработка каркасно-обшивных перегородок с повышенной звукоизоляцией. / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, В. В. Дымченко // В сборнике: VI Всероссийский фестиваль науки – Нижний Новгород. – 2016. – С. 210-213.
 13. Бобылев, В.Н. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций / Д. В. Монич, В. А. Тишков, П. А. Гребнев // Монография: ННГАСУ. – Нижний Новгород, 2014. – 117 с.
 14. Бобылев, В. Н. Способ повышения звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, В. В. Дымченко // В сборнике: V Всероссийский фестиваль науки – Нижний Новгород. – 2015. – С. 65-67.
 15. Бобылев, В. Н. Численное моделирование звукоизолирующих каркасно-обшивных перегородок с различными типами стоечных профилей. / В. Н. Бобылев, В.В. Дымченко, Д.В. Монич, П.А. Хазов //Приволжский научный журнал, 2018, № 1 (45). С. 20-24.
 16. Бобылев, В.Н. Экспериментальные исследования звукоизоляции ограждений, подкрепленных ребрами жесткости / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, В. В. Дымченко // Вестник ВРО РААСН. – 2012. Вып. 15. – С. 108-111.
 17. Боголепов, И. И. Архитектурная акустика / И. И. Боголепов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 228 с.
 18. Боголепов, И. И. Звукоизоляция на судах / И. И. Боголепов, Э. И. Авферинок. – Л.: Судостроение, 1970. – 192 с.
 19. Боголепов, И. И. Промышленная звукоизоляция / И. И. Боголепов. – Л.: Су-

- достроение, 1986. – 368 с.
20. Боголепов, И. И. Теоретические исследования звукоизолирующей способности судовых двустенных конструкций / И. И. Боголепов // Труды ЦНИИ технологии судостроения. – Л., 1963. – Вып. 45. – С.16-35.
 21. Герасимов, А. И. Звукоизоляция многослойных перегородок с учетом волновых параметров звукопоглощающего материала из минерального волокна ISOVER / А. И. Герасимов, Е. В. Никонова // Научное образование. – 2013. – № 9. – С. 142-145.
 22. ГОСТ 23337–2014. Шум: методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. – Введ. 2015–07–01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 20 с.
 23. ГОСТ 16297–80. Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 10 с.
 24. ГОСТ 27296–2012. Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций. – Взамен ГОСТ 27296–87 и ГОСТ 24210–80; введ. 2014–01–01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
 25. Дымченко, В. В. Звукоизоляция каркасно-обшивных перегородок с одинарным каркасом: дис... канд. техн. наук / В. В. Дымченко; ННГАСУ. – Нижний Новгород, 2019. – 168 с.
 26. Заборов, В. И. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях / В. И. Заборов, Э. М. Лалаев, В. Н. Никольский. – М.: Стройиздат, 1979. – 254 с.
 27. Заборов, В. И. Об оптимальных параметрах двойных ограждений / В. И. Заборов, Л. Н. Клячко // Акустический журнал. - 1965. – Т. 13, вып. 1 – С. 139-142.
 28. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В. И. Заборов. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.
 29. Иванова, А. В. Исследование звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов / А. В. Иванова, А. А. Кочкин // Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт: Материалы VII-ой Международ. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2020. – С. 202–205.
 30. Иванова, А. В. Практическое использование слоистых элементов с вибропо-

- глощением для повышения звукоизоляции двойных ограждающих конструкций / А. В. Иванова, А. А. Кочкин, И. В. Матвеева // Актуальные вопросы развития строительной отрасли: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Вологодский государственный университет. – Вологда, 2021. – С. 11–14.
31. Иванова, А. В. Проектирование звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением / А. В. Иванова, Н. А. Кочкин, И. Л. Шубин, А. А. Кочкин // Жилищное строительство. – 2022. – №6. – С. 3–7.
32. Киряткова, А. В. Обзор существующих исследований звукоизоляции двойных ограждающих конструкций / А. В. Киряткова, А. А. Кочкин // Вузовская наука – региону. Материалы XVI Всероссийской научной конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Правительство Вологодской области, Вологодский государственный университет. – Вологда, 2018. – С. 15–16.
33. Киряткова, А. В. О способе повышения звукоизоляции ограждений / А. В. Киряткова, Н. А. Кочкин // Вузовская наука – региону. Материалы XV Всероссийской научной конференции с международным участием / Министерство образования и науки Российской Федерации, Правительство Вологодской области, Вологодский государственный университет. – Вологда, 2017. – С. 23–26.
34. Киряткова, А. В. Экспериментальные исследования звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов / А. В. Киряткова, А. А. Кочкин, И. Л. Шубин, Л. Э. Шашкова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2020. – №4 (32). – С. 73–79.
35. Кочкин, А. А. Способы повышения звукоизоляции ограждающих конструкций зданий / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова, Н. А. Кочкин, А. В. Иванова // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 1 (61). – С. 41–51.

36. Кочкин, А. А. Исследование влияния физико-механических характеристик слоистых элементов с вибродемпфирующими слоями на звукоизоляцию непрозрачных ограждающих конструкций / А. А. Кочкин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2012. – № 3. – С. 111 - 116.
37. Кочкин, А. А. Исследование звукового давления в воздушном промежутке двойной ограждающей конструкции из слоистых вибродемпфированных элементов / А. А. Кочкин, Л. А. Борисов // Жилищное строительство. 2015. № 7. С. 52-54.
38. Кочкин, А. А. Исследование звукоизоляции светопрозрачных вибродемпфированных элементов и ограждающих конструкций из них / А. А. Кочкин, Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова // Строительство и реконструкция, – 2017. – № 3 (71). – С. 68–74.
39. Кочкин, А. А. Исследование изоляции воздушного шума двойными ограждающими конструкциями / А. А. Кочкин, А. В. Киряткова, И. Л. Шубин // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 6 (1006). – С. 20–21.
40. Кочкин, А. А. Исследование изоляции ограждающих конструкций от воздушного шума в реверберационных камерах / А. А. Кочкин, Н. М. Дементьев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 12. – С. 43.
41. Кочкин, А. А. О способе повышения звукоизоляции двойных ограждающих конструкций / А. А. Кочкин, А. В. Киряткова, Л. Э. Шашкова, И. Л. Шубин // Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 6 (1018). – С. 6–7.
42. Кочкин, А. А. О регулировании звукоизоляции слоистых вибродемпфированных элементов / А. А. Кочкин, И. Л. Шубин, Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 4 (364). – С. 181–187.
43. Кочкин, А. А. О повышении звукоизоляции ограждающих конструкций / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – №3 – С. 198–199.

44. Кочкин, А. А. О проектировании звукоизоляции легких ограждений с промежуточным вибродемпфирующим слоем / А. А. Кочкин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 191–193.
45. Кочкин, А. А. Повышение звукоизоляции легких ограждений с применением слоистых вибродемпфированных элементов / А. А. Кочкин, А. В. Киряткова, Н. А. Кочкин // Вузовская наука – региону. Материалы XIV Всероссийской научной конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Правительство Вологодской области, Вологодский государственный университет. – Вологда, 2016. – С. 174–177.
46. Комплектные системы КНАУФ. Перегородки поэлементной сборки из гипсоволокнистых листов на металлическом и деревянном каркасах для жилых, общественных и производственных зданий. Разработчик ЗАО институт «Челябинский Промстройпроект». – Москва, 2010. – 82 л.
47. Кочкин, А. А. Снижение шума в помещениях при эксплуатации и реконструкции зданий / А. А. Кочкин, А. В. Иванова // Вестник Вологодского государственного университета. – Вологда, 2021. – № 2 (12). – С. 67–69.
48. Кочкин, Н. А. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах ВоГУ / Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции / Институт архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2017. – С. 166–173.
49. Кочкин, Н. А. Исследование и повышение звукоизоляции двойной перегородки с использованием слоистого вибродемпфированного элемента на отnose / Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции / Институт архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2018. – С. 182–185.

50. Кочкин, Н. А. Интерференционный метод измерения акустических характеристик звукопоглощающих материалов / Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции / Институт архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2019. – С. 272–274.
51. Минаева, Н. А. Анализ звукоизоляционных качеств каркасно-обшивных перегородок / Н. А. Минаева // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 137-141.
52. Минаева, Н. А. Исследование звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок в реверберационных камерах / Н. А. Минаева, М. А. Пороженко // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2008. – № 4. – С. 87-89.
53. Минаева, Н. А. Исследования влияния инновационного материала тексаунд на звукоизолирующие свойства строительных перегородок / Н. А. Минаева // Бюллетень строительной техники. 2021. № 6 (1042). С. 18-19.
54. Овсянников, С. Н. Исследование звукоизоляции однослойных и двухслойных перегородок / С. Н. Овсянников, О. В. Старцева // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 43-46.
55. Овсянников, С. Н. Оценка структурной звукопередачи в расчете звукоизоляции двойных перегородок / С. Н. Овсянников, О. В. Старцева // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 186-190.
56. Овсянников, С. Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях / С. Н. Овсянников. – Томск: Изд-во Томского гос. арх.-строит. ун-та, 2000. – 378 с.
57. Осипов, Г. Л. Звукоизоляция и звукопоглощение: учеб. пособие для студентов ВУЗов / Г. Л. Осипов, В. Н. Бобылев, Л. А. Борисов; под ред. Г. Л. Осипова, В. Н. Бобылева. – М.: АСТ: Астрель, 2004. – 450 с.
58. Осипов, Г. Л. Акустические измерения в строительстве / Г. Л. Осипов, Д. З. Лопашев, Е. Н. Федосеева. – М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.

59. Пат. 189876 Российская Федерация. МПК E04B 2/00. Двойная звукоизолирующая конструкция с обшивками из слоистых вибропоглощающих элементов со звукопоглощающим материалом / А. А. Кочкин, И. В. Матвеева, А. В. Киряткова, Н. А. Кочкин; заявитель и патентообладатель Вологод. гос. ун-т. – № 2011116574/03; заявл. 14.02.2019; опубл. 07.06.2019, Бюл. № 16. – 5 с.
60. Пат. 106269 Российская Федерация: Звукоизолирующая панель с вибродемпфирующими слоями / А.А. Кочкин; патентообладатель ГОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет». - № 2010148952; заявл. 30.11.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19. – с.2.
61. Пат. 176345 Российская Федерация. МПК E04C 1/40 (2006.01), E04B 1/82 (2006.01). Звукоизоляционный строительный элемент с вибропоглощением / А. А. Кочкин, И. В. Матвеева, Л. Э. Шашкова, Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова; заявитель и патентообладатель Вологод. гос. ун-т. – № 2016149061/03 (078830); заявл. 13.12.2016, опубл. 17.01.2018, Бюл. № 2. – С. 6.
62. Пат. на полезную модель RU 186418, МПК E04C 1/40. Звукоизолирующая конструкция со слоистым вибропоглощающим элементом на отnose / А. А. Кочкин, И. В. Матвеева, Н. А. Кочкин, А. В. Киряткова; заявитель и патентообладатель Вологод. гос. ун-т. – № 2018121362; заявл. 08.06.2018; опубл. 21.01.2019, Бюл. № 3. – 5 с.
63. Пороженко, М.А. Оценка изоляции воздушного шума стеной с гибкой плитой на отnose /М.А. Пороженко, Н.А. Минаева, В.Н. Сухов // Жилищное строительство, - 2016. - №7. – С. 54-56.
64. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021660715. Расчет звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением / А.В. Иванова, Н.А. Кочкин, А.А. Кочкин, И.Л. Шубин – Заявка № 2021660066; дата поступления 28.06.2021; зарегистрирована 01.07.2021г.
65. Свод правил. Защита от шума: СП 51.13330.2011: актуализированная редакция СНиП 23-03-2003: утв. 28.12.2010: ввод в действие с 20.05.2011 / Госстрой России. – Москва: ГУП ЦПП, 2011. – 32 с.

66. Свод правил по проектированию и строительству. Ограждающие конструкции с применением гипсокартонных листов. СП 55-101-2000: утв. и введен 24.04.2000 г. / Госстрой России, ГУП ЦПП. – Москва, 2003. – 56 с.: ил.
67. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. СП 23-103-2003. – М.: ГУП ЦПП, 2004. – 35 с.
68. Свод правил. Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции: СП 275.1325800.2016: утв. 16.12.2016: ввод в действие с 17.06.2017 / Минстрой России. – Москва, 2016. – 75 с.
69. Седов, М. С. Влияние размеров ограждений на их звукоизоляцию от воздушного звука / М. С. Седов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1965. – № 2. – С.87-93.
70. Седов, М. С. Волновая теория собственных колебаний прямоугольных пластин / М. С. Седов // Изв. вузов. Строительство. – 1995. – № 12. – С.28-34.
71. Седов, М. С. Проектирование звукоизоляции / М. С. Седов. – Горький: Изд-во ГГУ, 1980. – 54с.
72. Седов, М. С. Регулирование звукоизоляцией и звукоизлучением ограждающих конструкций путем демпфирования их звуковых колебаний / М. С. Седов // Звукоизоляция зданий: межвуз. сборник научных трудов / ГИСИ. – Горький, 1989. – С. 3-7.
73. Седов, М. С. Теория инерционного прохождения звука через ограждающие конструкции / М. С. Седов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 2. – С. 37-42.
74. Седов, М. С. Расчет звукоизоляции двустенных конструкций: конспект лекций / М. С. Седов, А. П. Юферев. – Горький: ГИСИ, 1983. – 40 с.
75. Седов, М. С. Расчет звукоизоляции облегченных ограждающих конструкций: учебное пособие / М. С. Седов, В. И. Юлин, А. А. Кочкин. – Горький: ГИСИ, 1985. – 55 с.

76. Старцева, О.В. Исследование звукоизоляции однослойных и двухслойных перегородок / О.В. Старцева, С.Н. Овсянников // *Жилищное строительство*, 2012. № 6. С. 43-46.
77. Старцева, О. В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок / О. В. Старцева, С. Н. Овсянников // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – Томск, 2013. – № 2. – С. 176-184.
78. Стретт, Д. В. Теория звука: в 2 т. / Д. В. Стретт; пер с англ.; под ред. С.М. Рытова. – М.: Гостехтеориздат, 1955. – Т.1, гл. 8; Т.2, §271.
79. Тишков, В. А. Об оценке звукоизоляции двойных конструкций с воздушным промежутком / В.А. Тишков, Д. В. Мурыгин // В сборнике: Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума –2016. – С. 119-122.
80. Тишков, В. А. Способы повышения звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок / В.А. Тишков, В. В. Дымченко // *Приволжский научный журнал*. – 2013. – № 4. – С. 28-32.
81. Тишков, В. А. Способ расчёта звукоизоляции двойной конструкции с воздушным промежутком с учётом двойственной природы прохождения звука / В. А. Тишков, Д. В. Мурыгин // *Приволжский научный журнал*. – 2015. – №3, – С. 97-101.
82. Умнякова, Н. П. Звукоизоляция офисных перегородок / Н. П. Умнякова, В.А. Смирнов // *Гармонизация европейских и российских нормативных документов по защите населения от повышенного шума: материалы международной научно-практической конференции*. – Москва; София; Кавала, 2009. – С. 35-43.
83. Щелоков, Ю.А. Проектирование звукоизоляции стен с каркасной облицовкой // *Защита от повышенного шума и вибрации: сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 369-375.

84. Шубин, И. Л. Исследование динамических характеристик вибродемпфирующих материалов / И. Л. Шубин, Д. С. Скрипченко, Н. А. Кочкин // Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 6 (994). – С. 18–19.
85. Юферов, А. П. Повышение звукоизоляции двустенных конструкций в зданиях: дис... канд. техн. наук / А. П. Юферов. – Нижний Новгород, 1997. – 136 с.
86. Beranek, L. L. Acoustical properties of homogeneous isotropic rigid tiles and flexible Blankets / L. L. Beranek // IASA. – 1947. – Vol. 19, №. 4. – P. 558-568.
87. Beranek, L. L. Sound control in airplanes / L. L. Beranek // IASA. – 1947. – Vol. 19, № 2. – P. 357-364.
88. Beranek, L.L. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets / L.L. Beranek, G. Work // IASA. – 1949. – Vol.21, №.4. – P. 419-428.
89. Bravo, J. M. Influence of air layers and damping layers between gypsum boards on sound transmission / J. M. Bravo, Jaime Sinisterra, Antonio Uris // Appl. Acoust. – 2002. – T. 63, № 10. – P. 1051-1059.
90. Chunqi Wanga. Sound absorption of micro-perforated panel backed by an irregular-shaped cavity / Chunqi, Li Chenb, Jie Pan, Ganghua Yu // The Journal of the Acoustical Society of America. 2010. - Vol. 127. № 1- P. 1-643.
91. Cobble, M. H. Dynamic vibrations and stresses in composite elastic plates / M.H. Cobble // IASA. – 1969. – Vol.46, №.5. – P. 2. – P. 1175-1179.
92. Craik, R. J. M. Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis/ R. J. M. Craik //Appl. Acoust.– 2003. – Vol. 64, № 3. – P. 325-341.
93. Cremer, L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall / L. Cremer // Akustische Zeitschrift. – 1942. – №.7. – S. 81-125.
94. Cummings, A. The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field / A. Cummings, K.A. Mulholland // Journal of Sound and mVibration. – 1968. – Vol 8. – P. 126-133.
95. Cristen, J.-L. Global sensitivity analysis of analytical vibroacoustic transmission

- models / J. -L. Cristen, M. Ichchou, B. Troclet, O. Bareille, M. Ouisse // The Journal of the Acoustical Society of America. 2016. - Vol. 368. - P. 121-134.
96. Crocker, M.J. Sound transmission using statistical energy analysis / M.J. Crocker, A.J Price // Sound Vib. – 1969. – Vol. 9, № 3. – P. 469 – 486.
97. De Fonseca, P. Experimental study of the active sound transmission reduction through a double panel test section / P. De Fonseca, P. Sas, H. Van Brussel // Acust. Acta acust. – 1999. – Vol. 85, № 4. – P. 538-546.
98. Finn Lovholt. Simulating low frequency sound transmission through walls and windows by a two-way coupled fluid structure interaction model / Finn Lovholt, Karin Noren-Cosgriff, Christian Madshus, Stale Endgvik Elligsen // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. - Vol. 396. - №1. - P. 203-216.
99. Gongxian Wang. Modeling and experimental investigation of a novel are-surfaced frictional damper / Gongxian Wang, Yangyang Wang, Jianming Yuan, Yi Yang, Dong Wang // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. - Vol. 389. - P. 89-100.
100. Gösele, K. Zur Berechnung der Ztuftschalldammung von doppelschaligen Bautein (ohne Verbindung der Schalen) / K. Gösele // Acustica. – 1980. – Vol. 45.– S. 218 – 227.
101. Gotz, I // Akustische Zeitschrift. – 1943. – № 11. – S. 75-87.
102. Guyader, I. L. Acoustic transmission through orthotropic multilayered plates. Part II. Tansmission loss / I. L.Guyader, C. Lesueur // Sound and Vibration. – 1978. – Vol. 58, № 1. – P. 69 – 86.
103. Guyder, I. L. Transmission of reverberant sound through orthotropic, viscoelastic multilayers plates / I. L. Guyder, C. Lesueur // Sound and Vibration. – 1980. – Vol.70, № 3. – P. 319 - 332.
104. Haijun, Yu. Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam sandwich panels / Yu Haijun, Yao Guangchun, Wang Xiaolin, // Appl. Acoust. – 2007. – Vol. 68, № 11-12. – P. 1502 - 1510.
105. Huang, Qibai. Theory of double sound insulation constructions of large sizes / Qibai Huang, Zhiyun Xu // Huazhong ligong daxue xuebao. – 2000. – Vol. 28,

- № 12. – P. 98-100.
106. Iosse, R. Transmission du son par une paroi simple / R. Iosse, C. Lamure // *Acustica*. – 1964. – № 14. – S.266.
 107. Jeongwon Park, Sangkeun Ahn, Ji Woo Yoo, Junhong Park. Influence of cross-sectional discontinuity on the damping characteristics of viscoelastically supported rectangular plates / Jeongwon Park, Sangkeun Ahn, Ji Woo Yoo, Junhong Park // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2017. - Vol. 387. – P. 114-126.
 108. Jeong-Woo, K., Sound absorption performance of layered micro-perforated and poroelastic materials / K. Jeong-Woo, M. Jeff M. // *Noise Control Engineering Journal*. – 2013 - Vol. 61, № 1. - P.100-113.
 109. Kerwin, I. M. Damping of flexural waves by a constrained visco-elastic layer / I. M. Kerwin // *IASA* – 1959. – Vol. 31, № 7. – P. 952-955.
 110. Kimihiro Sakagami. Sound absorption of a double-leaf micro-perforated panel with an air-back cavity and a rigid-back wall: Detailed analysis with a Helmholtz-Kirchhoff integral formulation / Kimihiro Sakagami, Kiyotaka Matsutani, Masayuki Morimoto // *Applied Acoustics*. 2010. - Vol. 71. - № 5. - P.411-417.
 111. Kropp, W. On the air-borne sound insulation of double wall constructions / W. Kropp, E. Rebillard // *Acust. Acta acust.* – 1999. – Vol. 85, № 5. – P.707-720.
 112. Leppington, F. G. Resonant and non-resonant transmission of random noise through complex plates / F. G. Leppington, K. H. Heron, E. G. Broadbent // *Proc. Roy. Soc. London. A*. - 2002. – Vol. 458, № 2019. - P. 683 - 704.
 113. Li, Y. Y. Energy transmission through a double-wall structure with an acoustic enclosure: Rotational effect of mechanical links / Y. Y. Li, L. Cheng // *Appl. Acoust.* – 2006. – Vol. 67. - № 3. - P. 185 - 200.
 114. Liang, Jin-Wei. Damping estimation via energy-dissipation method / Jin-Wei Liang // *Sound and Vibr.* – 2007. – Vol. 307. - № 1-2. - P. 349 - 364.
 115. Lin, S. Improvement of sound transmission loss of double-layer wall by using vibration absorber / S. Lin, S. Tsujimura, S. Yokoyama, S. Sakamoto // *The Acoustical Society of Japan*. – 2014. – Vol. 35, № 2. – P. 119-121.

116. Lilly Jerry, G. Recent advances in acoustical glazing / G. Lilly Jerry // Sound and Vibr. – 2004. – Vol. 38. - № 2. - P. 8 - 13.
117. London, A. Transmission of reverberant sound through double walls / A. London // IASA. – 1950. – Vol. 22, № 2. – P. 270-279.
118. Mead, Denys J. The measurement of the loss factors of beams and plates with constrained and unconstrained damping layers: A critical assessment / Denys J. Mead // Sound and Vibr. – 2007. – Vol. 300, № 3-5. - P.744-762.
119. Ovsyannikov, S. N. The prediction of sound and vibration in a building using the method of statical energy analysis / S. N. Ovsyannikov // 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, KORUS 2004.Tomsk. – 2004.– P. 331-335.
120. Park Young-Ho. Hybrid power flow analysis using coupling loss factor of SEA for low-damping system / Park Young-Ho, Hong Suk-Yoon // Sound and Vibr. – 2007. – Vol. 299 - № 3.- P.484-503.
121. Pereira, A. Analysis of airborne sound insulation and impact sound pressure level provided by a single partition containing a heterogeneity / A. Pereira, A. Tadeu // Sound and Vibr. – 2007. – Vol. 300, № 3-5. - P.800-816.
122. Preeti Gulia. Enhancing the sound transmission loss through acoustic double panel using sonic crystal and porous material / Preeti Gulia, Arpan Gupta // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2018. - Vol. 144. – P. 1435-1443.
123. Price, A. J. Sound transmission through double panels using statistical energy analysis Price / A. J. Price, M. J. Crocker // JASA, 1970. - Vol. 47, № 3. - P. 683 – 699.
124. Puzankov, A.N. Extra edge damping as a way to improve sound insulation of window structures / A.N. Puzankov, D.L. Shchegolev, V.A. Tishkov, V.N. Bobylev // International journal of acoustics and vibrations, 2018. - Vol. 23, № 1. - P. 106 – 112.
125. Rebillat, M. Measurement of relevant elastic and damping material properties in sandwich thick plates / M. Rebillat, X. Boutillon //The Journal of Acoustical Society of America. 2011. - Vol. 330- P. 6098-6121.

126. Reissner, H. Der senkrechte und schräge Durchtritt einer in inem flüssiger Medium erzeugten ebenen Dilatations (longgitudinal) Welle durch eine in diesem Medium befindliche planparallele feste Platte / H. Reissner // *Helv. Phys. ASTA.* – 1938. – № 11. – S.140.
127. Sewell, E. C. Two dimensional solution for transmission of reverberant sound through a double partition / E. C. Sewell // *Journal of sound and vibration.* – 1970. – Vol 12. – P. 33-57.
128. Sharp, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements / B. H. Sharp // *Noise Control Engineering.* – 1978. – Vol 11. – P. 53-63.
129. Singh Mahavir. Sound transmission through panels. An experimental study / Singh Mahavir, K. K. Pujara, V. Mohanan // *Pure and Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 39, № 4. – P. 235-239.
130. Tadeu, A. Sound insulation provided by single and double panel walls - a comparison of analytical solutions versus experimental results / Antonio Tadeu, Antonio Julieta, Mateus Diogo // *Applied Acoustics.* – 2004. - Vol. 65. - № 1. - P. 15-29.
131. Takahashi, D. Improvement of sound insulation performance of double-glazed windows by using viscoelastic connectors / D. Takahashi, S. Sawaki, R.-L. Mu // *The Journal of the Acoustical Society of America.* – 2016. - Vol. 371. – P. 56-66.
132. Thomson, W.T. Transmission of elastic waves thrown a stratified solid Medium / W. T. Thomson // *Journal of Applied Physics.* – 1950. – Vol.21, № 2. – P. 89-93.
133. Vigran, T.E . Sound insulation of double-leaf walls. Allowing for studs of finite stiffness in transfer matrix scheme / T.E.Vigran // *Applied Acoustics.* 2010. - Vol. 71. - № 7. - P. 616-621.
134. Wintergerst, E. Theorie der Schalldurchlassigkeit von einfachen und zusammengesetzten Wänden / E. Wintergerst // *Schalltechnik.* – 1931. – № 4. – S. 85; 1932. – № 5. – S. 1.
135. Xiyue Ma. Physical mechanisms of active control of sound transmission through rib stiffened double-panel structure / Xiyue Ma, Kean Chen, Shaohu Ding, Haoxin Yu // *The Journal of the Acoustical Society of America.* – 2016. - Vol. 371. – P. 2-18.

136. Zhao Haiyu. Stability of damped membranes and plates with distributed inputs / Zhao Haiyu, Rahn Christopher D. // Sound and Vibr. – 2007. – Vol. 302, № 3. - P. 564-576.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Внедрение результатов исследований

**ООО "КОМПЛЕКСПРОЕКТ"**

160000, г. Вологда, ул. Чернышевского, 11, тел. 8-9637330000
ИНН 3525463413; КПП 35250100; ОГРН1203500023968

09.11.2020 № 6 / н
На № _____ от _____.

Проректору
по научной деятельности
ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет»
Ударину А.В.

г. Вологда, ул. Ленина, д.15
160000

Уважаемый Алексей Валентинович!

Сообщаю, что старшим преподавателем кафедры промышленного и гражданского строительства ВоГУ Ивановой Анастасией Владимировной разработано и внедрено конструктивное решение звукоизолирующей перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры в жилом доме по адресу г. Вологда, ул. Северная д.36 Б. Предложенная двойная ограждающая конструкция выполнена из слоистых элементов, состоящих из гипсокартонных листов, склеенных вибропоглощающей мастикой. Соединение элементов между собой в ограждении выполнено через металлический каркас. Пространство между элементами заполнялось звукопоглощающим материалом.

Внедрение указанного конструктивного решения позволило привести индекс изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями в соответствие с нормативными значениями.

Директор ООО «Комплекспроект»



Я.А. Никитина

**Общество с ограниченной ответственностью
«Вологодский центр комплексного проектирования
и обследования»
(ООО «Вологодский центр комплексного проектирования
и обследования»)**

160000, г.Вологда, пр-т Победы, д.67, кв. 1,
т/ф (8172) 21-10-32
ИНН 3525308200
КПП 352501001
ОГРН 1133525015909
Р/сч 40702810712000009797
Отделение № 8638 Сбербанка России г.Вологда
К/сч 30101810900000000644
БИК 041909644
«24» ноября 2021г. №
на № от г.

Проректору по научной деятельности
ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет»
Ежовой Н. Э.

Уважаемая Наталья Эдуардовна!

ООО «Вологодский центр комплексного проектирования и обследования» извещает, что программа «Повышение звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций при строительстве и реконструкции зданий с использованием слоистых элементов с вибропоглощением», разработанная старшим преподавателем кафедры промышленного и гражданского строительства ВоГУ Ивановой А.В и переданная нашей организации, внедрена в практику проектирования.

Указанная программа даёт возможность выполнять целенаправленный расчёт и проектирование повышения звукоизоляции двойных ограждений с использованием слоистых элементов с вибропоглощением, учитывая габариты ограждения, толщину слоёв, поверхностную плотность, динамический модуль упругости и коэффициент Пуассон облицовок, модуль сдвига вибропоглощающего слоя. Применение таких конструктивных решений позволяет повысить звукоизоляцию без увеличения толщины и поверхностной плотности конструкции.

Директор ООО «ВЦКПиО»



Е.А. Кабанов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Патенты и свидетельство

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 189876

**ДВОЙНАЯ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ С
ОБШИВКАМИ ИЗ СЛОИСТЫХ
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СО
ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Вологодский государственный университет" (ВоГУ) (RU)*

Авторы: *Кочкин Александр Александрович (RU), Матвеева
Ирина Владимировна (RU), Кирыткова Анастасия
Владимировна (RU), Кочкин Никита Александрович (RU)*

Заявка № 2019104122

Приоритет полезной модели 14 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 07 июня 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 14 февраля 2029 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

189 876⁽¹³⁾ U1(51) МПК
E04B 1/82 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК

E04B 2001/8272 (2019.02); E04B 2001/829 (2019.02); E04B 2001/8461 (2019.02); E04B 2001/8466 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2019104122, 14.02.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.02.2019Дата регистрации:
07.06.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.02.2019

(45) Опубликовано: 07.06.2019 Бюл. № 16

Адрес для переписки:

160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Вологодский государственный университет"
(ВоГУ)

(72) Автор(ы):

Кочкин Александр Александрович (RU),
Матвеева Ирина Владимировна (RU),
Кириаткова Анастасия Владимировна (RU),
Кочкин Никита Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Вологодский государственный
университет" (ВоГУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 108057 U1, 10.09.2011. RU 22955
U1, 10.05.2002. US 9970192 B2, 15.05.2018.(54) **ДВОЙНАЯ ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ С ОБШИВКАМИ ИЗ СЛОИСТЫХ
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СО ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ**

(57) Формула полезной модели

Двойная звукоизолирующая конструкция с обшивками из слоистых вибропоглощающих элементов со звукопоглощающим материалом, состоящая из металлического каркаса, обшитого слоистыми вибропоглощающими элементами, состоящими из облицовочных листов, склеенных между собой вибропоглощающей мастикой, а также звукопоглощающего материала, расположенного между слоистыми вибропоглощающими элементами, отличающаяся тем, что звукопоглощающий материал расположен между слоистыми вибропоглощающими элементами с обеих сторон и имеет клиновидную форму с размером клина b , равным не более $H/2$, где H - это расстояние между слоистыми вибропоглощающими элементами, и каждый ряд клиньев развернут друг к другу на угол 90° .

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021660715

Расчет звукоизоляции двойных ограждающих
конструкций из слоистых элементов с
вибропоглощением

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Вологодский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Иванова Анастасия Владимировна (RU), Кочкин
Никита Александрович (RU), Кочкин Александр
Александрович (RU), Шубин Игорь Любимович (RU)*

Заявка № 2021660066

Дата поступления 28 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 июля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 186418

**ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ СО
СЛОИСТЫМ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ
НА ОТНОСЕ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Вологодский государственный университет" (ВоГУ) (RU)*

Авторы: *Кочкин Александр Александрович (RU), Матвеева
Ирина Владимировна (RU), Кочкин Никита Александрович
(RU), Киряткова Анастасия Владимировна (RU)*

Заявка № 2018121362

Приоритет полезной модели 08 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 21 января 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 08 июня 2028 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

186 418⁽¹³⁾ U1

(51) МПК

E04C 1/40 (2006.01)

E04B 1/82 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

E04C 1/40 (2018.08); E04B 1/8209 (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2018121362, 08.06.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.06.2018Дата регистрации:
21.01.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.06.2018

(45) Опубликовано: 21.01.2019 Бюл. № 3

Адрес для переписки:

160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, ФГБОУ ВО
"Вологодский государственный университет"
(ВоГУ)

(72) Автор(ы):

Кочкин Александр Александрович (RU),
Матвеева Ирина Владимировна (RU),
Кочкин Никита Александрович (RU),
Кириаткова Анастасия Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Вологодский государственный
университет" (ВоГУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: RU 127781 U1, 10.05.2013. Каталог
"Двухслойная облицовка из
гипсоволокнистых КНАУФ-суперлистов
(ГВЛ) на металлическом каркасе,
отнесенном от базовой стены С 666.
Комплектная система КНАУФ", 27.04.2017,
Найдено в интернет: URL:
<http://www.knauf.ru/catalog/find-products-and-systems/s-666.html>. RU 47025 U1, 10.08.2005.
US 6122867 A, 26.09.2000.

RU 186 418 U1

RU 186 418 U1

(54) ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ СО СЛОИСТЫМ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОТНОСЕ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области строительства и может быть использована для снижения уровня шума в жилых, общественных и производственных помещениях.

Предлагаемая полезная модель содержит базовую стену и облицовочные листы, соединенные между собой дюбель-гвоздями с шайбой, а также звукопоглощающий материал, расположенный между базовой стеной и облицовочными листами. Облицовочные листы склеены между собой вибропоглощающей мастикой и прикреплены к базовой стене с помощью дюбель-гвоздя с шайбой через предварительно выполненное в облицовочных

листах отверстие, заполненное вибропоглощающей мастикой, после установки дюбель-гвоздя с шайбой отверстие шпаклюется.

Применение дюбель-гвоздя с шайбой в качестве крепления облицовочных листов к базовой стене и вибропоглощающей мастики между облицовочными листами и в отверстии для дюбель-гвоздя с шайбой позволяет повысить звукоизоляцию за счет увеличения вибропоглощения и исключения возможности возникновения жестких связей между базовой стеной и облицовочными листами без увеличения массы и усложнения монтажа конструкции.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 176345

**ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ
С ВИБРОПОГЛОЩЕНИЕМ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Вологодский государственный университет" (ВоГУ) (RU)*

Авторы: *Кочкин Александр Александрович (RU), Матвеева
Ирина Владимировна (RU), Шашкова Лола Эдуардовна (RU),
Кочкин Никита Александрович (RU), Киряткова Анастасия
Владимировна (RU)*

Заявка № 2016149061

Приоритет полезной модели 13 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 17 января 2018 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 13 декабря 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

176 345⁽¹³⁾ U1

(51) МПК
E04C 1/40 (2006.01)
E04B 1/82 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
E04C 1/40 (2006.01); *E04B 1/82* (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016149061, 13.12.2016
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 13.12.2016
 Дата регистрации:
 17.01.2018
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 13.12.2016
 (45) Опубликовано: 17.01.2018 Бюл. № 2
 Адрес для переписки:
 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, ФГБОУ ВО
 "Вологодский государственный университет"
 (ВоГУ)

(72) Автор(ы):
 Кочкин Александр Александрович (RU),
 Матвеева Ирина Владимировна (RU),
 Шашкова Лола Эдуардовна (RU),
 Кочкин Никита Александрович (RU),
 Киряткова Анастасия Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
 Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Вологодский государственный
 университет" (ВоГУ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 147672 U1, 10.11.2014. RU
 105324 U1, 10.06.2011. RU 2470124 C2,
 20.12.2012. RU 2472648 C1, 20.01.2013. RU
 134555 U1, 20.11.2013. EP 921242 A2,
 09.06.1999.

RU 176345 U1

RU 176345 U1

(54) ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С ВИБРОПОГЛОЩЕНИЕМ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области строительства и стройматериалов и может быть использована при изготовлении внутренних ограждающих конструкций (перегородок) зданий и сооружений, а также при проектировании строительных конструкций с заданными звукоизоляционными характеристиками.

Сущность предлагаемой полезной модели заключается в том, что звукоизоляционный строительный элемент выполнен из блоков в форме прямых параллелепипедов, соединенных между собой вибродемпфирующими слоями из

рулонных гидроизоляционных материалов, наносимых методом наплавления или обмазочной вибропоглощающей мастикой, при этом отсутствует процесс бетонирования.

Применение указанных способов крепления облицовочных слоев из гипсокартонных или гипсоволокнистых листов или других облицовочных материалов повышает звукоизоляционные свойства элемента за счет исключения жестких связей между облицовочными слоями и элементами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Свидетельства о поверке шумомера и калибратора

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БОЛШЕЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА»)

Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№ MA 0015035

Действительно до «26» октября 2021 г.

Средство измерений Калибратор акустический Cal 200, Госреестр № 39217-08
наименование, тип, модификация средства измерения, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждения типа

заводской (серийный) номер 3956

в составе -

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с МП 340-03-2008
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер, разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: $T = 21.2^\circ\text{C}$, отн. вл. 55.3 %, перечень влияющих факторов,

$P = 100.7 \text{ кПа}$, $F = 50.000 \text{ Гц}$, $U = 220.0 \text{ В}$, уровень акустических помех 47 дБ
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений и на основании результатов --вероятной-- (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки: (270)

И.о. начальника лаборатории № 441 Голышак Станислав Николаевич
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица (подпись, имя и отчество (при наличии))

Поверитель Раженков Егор Олегович
(подпись, имя и отчество (при наличии))

Дата поверки «27» октября 2020 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БОЛШЕЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА»)

Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№ MA 0015034

Действительно до «26» октября 2021 г.

Средство измерений Шумомер прецизионный модульный 2260,
наименование, тип, модификация средства измерения, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждения типа

заводской (серийный) номер 2418350

в составе прецизионный микрофонный ZC0026 № 2198, микрофон конденсаторный 4189 № 3100121

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с ГОСТ 8.257-84, ГОСТ 8.553-88
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер, разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: $T = 21.2^\circ\text{C}$, отн. вл. 55.3 %, перечень влияющих факторов,

$P = 100.7 \text{ кПа}$, уровень акустических помех 47 дБ
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений и на основании результатов --вероятной-- (периодической) поверки признано пригодным к применению.

Знак поверки: (270)

И.о. начальника лаборатории № 441 Голышак Станислав Николаевич
должность руководителя подразделения или другого уполномоченного лица (подпись, имя и отчество (при наличии))

Поверитель Раженков Егор Олегович
(подпись, имя и отчество (при наличии))

Дата поверки «27» октября 2020 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ОБЪЕКТ - МОСКВА)
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ № RA.RU.311341

Номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 2571318 Действительно до «12» марта 2020 г.

Средство измерений Калибратор акустический Cal 200, Госреестр № 39217-08
наименование, тип, модификация средства измерений, регистрационный номер в государственном информационном банке по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

Госреестр № 15385-96

заводской (серийный) номер 3956
в составе -

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме -
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с МП 340-03-2008
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер,

разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура 21,1 °C,
перечень влияющих факторов,

относительная влажность 55,2 %, атмосферное давление 99,0 кПа
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов нормальной (периодической) поверки признано пригодным к применению

Знак поверки: 159

Начальник лаборатории № 441 Фефилов Александр Сергеевич
подпись, фамилия, имя и отчество (при наличии)
должность руководителя подразделения или
органского уполномоченного лица

Поверитель Раженев Егор Олегович
подпись, фамилия, имя и отчество (при наличии)

Дата поверки «13» марта 2019 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ОБЪЕКТ - МОСКВА)
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ № RA.RU.311341

Номер в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 2571317 Действительно до «12» марта 2020 г.

Средство измерений Шумомер прецизионный модульный 2260,
наименование, тип, модификация средства измерений, регистрационный номер в государственном информационном банке по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

Госреестр № 15385-96

заводской (серийный) номер 2418350
в составе предусилитель микрофонный ZC0026 №2198, капсюль микрофонный конденсаторный 4189 №3100121

номер знака предыдущей поверки -

поверено в полном объеме -
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с ГОСТ 8.257-84, ГОСТ 8.553-88
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
регистрационный номер и (или) наименование, тип, заводской номер,

разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура 21,1 °C,
перечень влияющих факторов,

относительная влажность 55,2 %, атмосферное давление 99,0 кПа
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов нормальной (периодической) поверки признано пригодным к применению

Знак поверки: 159

Начальник лаборатории № 441 Фефилов Александр Сергеевич
подпись, фамилия, имя и отчество (при наличии)
должность руководителя подразделения или
органского уполномоченного лица

Поверитель Раженев Егор Олегович
подпись, фамилия, имя и отчество (при наличии)

Дата поверки «13» марта 2019 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ» (ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ № BA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№ СП 1784048

Действительно до «17» сентября 2018 г.

Средство измерений Калибратор акустический САЛ 200, Госреестр №39217-08
наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

(если в состав средства измерений входят несколько автономных измерительных блоков, то приводятся их перечень и заводские номера)

ОТСУТСТВУЮТ

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) 3956

поверено в соответствии с методикой поверки
наименование, величина, диапазон, на которых поверено средство измерений (если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с МП 340-03-2008
наименование документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
наименование, тип, заводской номер

регистрационный номер (при наличии), разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке
при следующих значениях влияющих факторов: температура 20°C,
приводит перечень влияющих факторов

относительная влажность 50%, атмосферное давление 760 мм.рт.ст.
приводит перечень влияющих факторов

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Начальник лаборатории № 44 С.Э. Барinov
Подпись
Должность руководителя подразделения

Поверитель В.М. Бородин
Подпись
Инициалы, фамилия

Дата поверки «18» сентября 2017 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ» (ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)
АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ № BA.RU.311341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
№ СП 1842453

Действительно до «04» декабря 2018 г.

Средство измерений Шумомер прецизионный модульный 2260, Госреестр №15385-96 (с прецедентом ЗС 0026 № 2198, конденсаторным микрофоном 4189 № 3100121, аттестатором ЗП 0023 № 2017)
наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

(если в состав средства измерений входят несколько автономных измерительных блоков, то приводятся их перечень и заводские номера)

ОТСУТСТВУЮТ

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) 2418350

поверено в соответствии с методикой поверки
наименование, величина, диапазон, на которых поверено средство измерений (если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с ГОСТ 8.257-84, ГОСТ 8.553-88
наименование документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
наименование, тип, заводской номер

регистрационный номер (при наличии), разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке
при следующих значениях влияющих факторов: температура 20,4 °C,
приводит перечень влияющих факторов

относительная влажность 35 %, атмосферное давление 750 мм.рт.ст.
приводит перечень влияющих факторов

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

И.о. нач. лаборатории № 44 С.В. Подкопкин
Подпись
Должность руководителя подразделения

Поверитель А.С. Илютин
Подпись
Инициалы, фамилия

Дата поверки «05» декабря 2017 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ»
(ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА»)
Аттестат аккредитации № RA.RU.3111341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 1204541 Действительно до «04» апреля 2017 г.

Средство измерений Калибраторы акустические Cal 200, 39217-08
наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

(если в составе средства измерений входят несколько автономных блоков, то приводить их перечень и заводской номер)

отсутствуют

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) 3956

поверено см. на обороте

поверено в соответствии с МП 340-03-2008
наименование, тип, заводской номер

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
наименование, тип, заводской номер

регистрационный номер (при наличии), размер, класс или точность эталона, применяемого при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура 21°C,
приводит перечень влияющих факторов

относительная влажность 50%, атмосферное давление 760 мм.рт.ст.
приводит перечень влияющих факторов

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Нач. лаборатории № 441

Поверитель

С.Э. Барinov
Инициалы, фамилия

В.В. Курунов
Инициалы, фамилия

Дата поверки «05» апреля 2016 г.

087866835

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ»
(ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА»)
Аттестат аккредитации № RA.RU.3111341

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 1204541 Действительно до «04» апреля 2017 г.

Средство измерений Шумомер прецизионный модульный 2260, 15385-96
наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

(с микрофоном измерительным конденсаторным с капсюлем 4189 №2417974)
(если в составе средства измерений входят несколько автономных блоков, то приводить их перечень и заводской номер)

отсутствуют

серия и номер знака предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) 2418350

поверено см. на обороте

поверено в соответствии с ГОСТ 8.257-84; ГОСТ 8.553-88
наименование документа, на основании которого выдана поверка

с применением эталонов: 3.1.ZMA.0175.2013
наименование, тип, заводской номер

регистрационный номер (при наличии), размер, класс или точность эталона, применяемого при поверке

при следующих значениях влияющих факторов: температура 21°C,
приводит перечень влияющих факторов

относительная влажность 50%, атмосферное давление 760 мм.рт.ст.
приводит перечень влияющих факторов

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Нач. лаборатории № 441

Поверитель

С.Э. Барinov
Инициалы, фамилия

В.В. Курунов
Инициалы, фамилия

Дата поверки «05» апреля 2016 г.

087866834