

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный**  
**архитектурно-строительный университет»**

*на правах рукописи*

**ГРЕБНЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**  
**ЗДАНИЙ ИЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**Диссертация на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент Монич Д.В.

Нижний Новгород, 2016 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Конструктивные решения сэндвич-панелей. Область их применения.....	11
1.2 Состояние вопроса.....	13
1.2.1 Прохождение звука через многослойные ограждающие конструкции.....	14
1.2.2 Прохождение звука через многослойные ограждающие конструкции.....	21
Выводы по главе 1 и определение направлений исследований.....	30
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ.. СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ.....	32
2.1 Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей.....	32
2.2 Звукоизоляция сэндвич-панели с предельными параметрами.....	37
2.2.1 Коэффициенты прохождения звука .....	37
2.2.2 Коэффициенты резонансного прохождения звука.....	38
2.2.3 Поле инерционных волн сэндвич-панели.....	41
2.2.4. Инерционное прохождение звука.....	43
2.2.5. Излучение звука в режиме инерционных колебаний.....	45
2.2.6. Коэффициенты инерционного прохождения звука.....	46
2.2.7. Звукоизоляция сэндвич-панели с предельными параметрами с учетом двойственной природы прохождения звука.....	47
2.2.7.1 Область неполных пространственных резонансов.....	49
2.2.7.2. Область полных пространственных резонансов.....	51
2.3 Предельная звукоизоляция сэндвич-панелей.....	52
2.4 Звукоизоляция сэндвич-панелей с жесткой склейкой слоев.....	56
2.4.1. Характеристики свободных упругих волн, распространяющихся вдоль сэндвич-панели.....	57

2.4.2 Расчет звукоизоляции сэндвич-панели с жестким соединением слоёв.....	62
Выводы по главе 2.....	66
ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИЕЙ .....	68
3.1 Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей.....	68
3.2. Способы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения массы.....	72
3.2.1. Снижение инерционного прохождения звука через сэндвич-панель.....	73
3.2.2. Снижение резонансного прохождения звука через сэндвич-панель.....	75
3.2.3 Влияние резонансной частоты сэндвич-панели $f_p$ на коэффициент прохождения звука.....	80
3.3. Разработка сэндвич-панелей с рациональными по звукоизоляции конструктивными решениями.....	87
3.4. Метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей.....	89
3.4.1 Метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей со сплошной склейкой слоев.....	89
3.4.2 Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением.....	97
Выводы по главе 3.....	102
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ В РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ КАМЕРАХ.....	104
4.1 Методика проведения исследований звукоизоляции сэндвич-панелей.....	104
4.2. О надежности и точности измерений звукоизоляции сэндвич-панелей.....	111
4.3. Экспериментальные исследования звукоизоляции ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей.....	114
4.3.1 Экспериментальные исследования влияния материалов среднего слоя и облицовок на звукоизоляцию сэндвич-панелей.....	115

4.3.2 Экспериментальные исследования влияния жесткости среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей.....	118
4.3.3 Экспериментальные исследования влияния акустического разобщения облицовок и среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей.....	121
4.3.4 Экспериментальные исследования влияния акустического разобщения слоев из упругого материала на звукоизоляцию сэндвич-панелей.....	123
4.3.5 Экспериментальные исследования влияния размеров на звукоизоляцию сэндвич-панелей.....	127
4.4 Разработка рационального конструктивного решения сэндвич-панели.....	128
4.5 Разработка бескаркасных ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением.....	131
Выводы по главе 4.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	137
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	148

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Актуальной задачей в архитектурно-строительном проектировании является создание внутренних ограждающих конструкций, обладающих относительно небольшой массой. Это позволяет уменьшить нагрузку на несущие конструкции зданий и снизить материалоемкость строительства. При этом необходимо обеспечить выполнение требований по звукоизоляции ограждающих конструкций. Данную задачу позволяет решить применение многослойных конструкций, в частности сэндвич-панелей, имеющих внешние облицовки и слой жесткого заполнителя между ними. Применение жесткого заполнителя обеспечивает выполнение требований по прочности и устойчивости конструкций без устройства внутреннего каркаса, что позволяет повысить скорость монтажа и снизить его трудоемкость.

Сэндвич-панели, используемые в настоящее время в строительстве, представляют собой ограждающие конструкции, состоящие из наружных листовых облицовок, жестко склеенных со средним слоем. Такие конструкции обладают низкой звукоизоляцией в диапазоне средних частот, вызванной резонансом системы «масса – упругость – масса». Этот недостаток хорошо известен специалистам в области строительной акустики и является одним из сдерживающих факторов широкого внедрения многослойных сэндвич-панелей в практику строительства. Для эффективного применения сэндвич-панелей в строительстве необходимо разработать метод расчета их звукоизоляции и с его помощью подбирать рациональное конструктивное решение ограждения, обеспечивающее эффективное использование резервов повышения звукоизоляции.

Таким образом, исследования связанные с разработкой новых, рациональных конструктивных решений сэндвич-панелей являются актуальной научной задачей в области строительной акустики, имеющей практическое значение для гражданского и промышленного строительства.

**Степень разработанности темы.** Существующие в настоящее время конструктивные решения сэндвич-панелей обладают недостаточной звукоизоляцией в диапазоне средних и высоких частот ( $630 \div 1250$  Гц). Для

эффективного применения сэндвич-панелей в строительстве необходимо разработать рациональное конструктивное решение таких ограждений, обеспечивающее использование резервов их звукоизоляции. Имеющиеся методы расчета звукоизоляции сэндвич-панелей предполагают слои ограждения жестко склеенными между собой или не склеенными и не учитывают степень разобщения слоев. Отсутствует метод расчета предельной звукоизоляции сэндвич-панелей и резервов повышения их звукоизоляции. В связи с этим необходимо исследование механизма прохождения звука через сэндвич-панели конечных размеров и разработка метода расчета их звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот.

### **Цель и задачи диссертационной работы.**

**Цель работы** – разработка метода расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с учетом акустического разобщения слоев для проектирования звукоизолирующих ограждающих конструкций зданий.

**Задачи работы.** В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

- исследовать звукоизолирующие свойства существующих типов сэндвич-панелей;
- установить резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей на базе теоретических исследований механизма прохождения звука через данные ограждения;
- исследовать влияние физико-механических свойств облицовок и среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панели;
- исследовать влияние акустического разобщения слоев на звукоизоляцию сэндвич-панели;
- разработать рациональные конструктивные решения ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей, обеспечивающие эффективное использование резервов повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения их массы и толщины;
- получить аналитические выражения для расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с учетом акустического разобщения слоев;

- экспериментально исследовать звукоизоляцию новых типов ограждений на основе сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями в лабораторных и натурных условиях.

### **Научная новизна работы:**

- впервые получены аналитические зависимости для определения предельной звукоизоляции сэндвич-панелей, определяемой инерционным прохождением звука, с учетом геометрических и физико-механических параметров;

- впервые теоретически определены резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров, определяемые как разница между предельной и собственной звукоизоляцией ограждения;

- теоретически и экспериментально обоснован способ повышения звукоизоляции сэндвич-панелей путем акустического разобщения облицовок и среднего слоя;

- получено новое аналитическое выражение для определения резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панелей со слоями акустического разобщения, с учетом их толщины;

- получено новое аналитическое выражение для определения угла падения звуковой волны из объема среднего слоя на вторую облицовку сэндвич-панели;

- на основе теории самосогласования волновых полей разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с учетом акустического разобщения слоев.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается:

- в разработанном методе расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров, который позволяет проводить подробный теоретический анализ прохождения звука с учетом геометрических и физико-механических параметров облицовок и среднего слоя и толщины слоев акустического разобщения. Это дает возможность проектировать звукоизолирующие ограждения зданий путем эффективного использования резервов повышения звукоизоляции, без значительного увеличения их массы и толщины;

Практическая значимость работы заключается:

- в разработанных новых, рациональных по звукоизоляции конструктивных решениях ограждающих конструкций из сэндвич-панелей, которые позволяют расширить возможность применения сэндвич-панелей в гражданском и промышленном строительстве за счет повышения их звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования выполнены на основе теории самосогласования волновых полей, разработанной научной школой профессора М. С. Седова. Экспериментальные исследования выполнены в больших реверберационных камерах ННГАСУ и Вологодского государственного университета (ВоГУ) с использованием электроакустической аппаратуры фирм «*SoundBook*», «*RFT*» и «*Larson & Davis*».

**Положения, выносимые на защиту:** результаты исследований звукоизоляции сэндвич-панелей на основе теории самосогласования волновых полей М. С. Седова, описывающие прохождение звука с учетом двойственной природы (резонансное и инерционное прохождение звука); результаты исследований предельной звукоизоляции сэндвич-панелей, определяемой инерционным прохождением звука, с учетом геометрических и физико-механических параметров; результаты исследований влияния акустического разобращения слоев на звукоизоляцию сэндвич-панелей; метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с акустическим разобращением слоев; рациональные по звукоизоляции конструктивные решения ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей для применения в гражданском и промышленном строительстве.

**Степень достоверности результатов.** При разработке методов и выполнении теоретических исследований использована теория самосогласования волновых полей. Допущения, использованные при разработке методов, общеприняты в работах российских и зарубежных авторов. Достоверность результатов подтверждена на основе сравнительного анализа теоретически и экспериментально полученных данных. Экспериментальные значения звукоизоляции исследуемых ограждений получены в больших реверберационных



камерах лабораторий акустики ННГАСУ и ВоГУ. Эксперименты проведены с использованием прецизионной электроакустической аппаратуры.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертации представлялись и обсуждались на: 15-й Нижегородской сессии молодых учёных (г. Н.Новгород, 2010 г.); 12-м, 13-м, 16-м и 18-м международном научно-промышленном форуме «Великие реки» (г. Н. Новгород, 2010, 2011, 2014, 2016 гг.); I, IV и V всероссийском Фестивале науки (г. Н. Новгород, 2011, 2014, 2015 гг.); III, V и VI международной научной конференции, посвященной памяти академика РААСН Осипова Г. Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность» (г. Москва, 2012, 2014, 2015 гг.).

#### **Реализация результатов работы.**

Исследования выполнялись в рамках выполнения НИР «Исследования звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий с учетом двойственной природы прохождения звука» (код проекта 3038) с финансированием из средств Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания на научные исследования.

Разработанное звукоизолирующее ограждение из сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением использовано для производства шумозащитного экрана-кожуха при проведении мероприятий по снижению уровня шума в цехе «Триплекс» стекольного завода в г. Бор (акт внедрения – см. приложение 1). Применение разработанных конструкций позволило обеспечить снижение уровней шума в помещении цеха до нормативных значений. Разработанное звукоизолирующее ограждение также было использовано в качестве межкомнатной перегородки при строительстве жилого дома в микрорайоне «Цветы» в г. Нижнем Новгороде (акт внедрения – см. приложение 2). Применение разработанной конструкции позволило обеспечить выполнение нормативных требований по звукоизоляции. Полученные результаты работы используются в учебном процессе ННГАСУ при проведении практических занятий и лабораторных работ в рамках учебных дисциплин «Архитектура гражданских и промышленных зданий», «Строительная физика» по направлению подготовки «Строительство» (акт внедрения – см. приложение 3). Новизна и практическая значимость

результатов работы подтверждена патентом [44] и заявкой на получение патента [25] (см. приложение 4 ).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, из которых 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 1 статья в журнале, входящем в международные базы данных «*Web of Science*» и «*Scopus*», зарегистрированы 1 патент и 1 заявка на получение патента в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и 10 приложений. Общий объем работы 186 страниц. Основной текст, включая 61 рисунок, 4 таблицы, изложен на 147 страницах, объем приложений 39 страниц.

## **ГЛАВА 1. СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Одним из способов создания комфортной звуковой среды в помещениях зданий различного назначения является устройство звукоизолирующих ограждений. В главе рассмотрены возможности применения для данных целей сэндвич-панелей и особенности прохождения звука через такие конструкции. Приведена оценка существующих методов расчета звукоизоляции однослойных и многослойных ограждений различных типов с позиций возможности их применения для расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким средним слоем. Проведен анализ существующих методик и выполненных экспериментальных работ в данной области, определены основные направления исследований.

### **1.1 Конструктивные решения сэндвич-панелей. Область их применения**

Одной из важнейших задач при проектировании новых типов ограждающих конструкций с учетом ресурсосбережения и высокой экономической эффективности является снижение их массы и толщины. При этом ограждающие конструкции должны обеспечивать требуемую защиту от шума в помещениях гражданских и промышленных зданий, в соответствии с требованиями СП 51.13330.2011 [51].

Данную задачу можно решить путем применения многослойных конструкций, в частности сэндвич-панелей. Такие конструкции состоят из двух внешних листовых облицовок приклеенных к среднему слою из жесткого и легкого материала заключенному между ними (см. рисунок 1.1 б).

Сэндвич-панели представляют собой самонесущие конструкции, несущая способность которых обеспечивается совместной работой внешних облицовок и жесткого среднего слоя (см. рисунок 1.1 б).

Звукоизоляция сэндвич-панелей зависит от физико-механических характеристик материалов внешних облицовок и среднего слоя, а также способа соединения слоев ограждения между собой. Для создания сэндвич-панелей с высокими звукоизолирующими свойствами необходим способ расчета их звукоизоляции учитывающий все вышеперечисленные параметры. Влияние различных факторов на звукоизоляцию сэндвич-панелей подробно рассмотрено в главах 3 и 4. В данной работе проектирование рациональных конструктивных решений сэндвич-панелей осуществляется по звукоизоляции с учетом требований прочности и пожарной безопасности.

Основным преимуществом сэндвич-панелей перед другими типами перегородок является быстрый монтаж по принципу «пол – потолок» (см. рисунок 1.1 а). Монтаж ограждающих конструкций из сэндвич-панелей осуществляется крупногабаритными элементами высокой заводской готовности (не требуют оштукатуривания), что обеспечивает высокую скорость и низкую стоимость строительно-монтажных работ (см. приложение 10). Применение крупногабаритных сэндвич-панелей позволяет производить быстрый демонтаж, без образования строительного мусора, позволяя создавать помещения со свободными планировками и легко изменять существующую планировку.

Сравнение характеристик различных типов перегородок применяющихся в строительстве и ограждений из сэндвич-панелей приведено в таблице 1.1. Расчет сметной стоимости возведения  $100 \text{ м}^2$  каждого из рассматриваемых типов ограждений приведен в приложении 10.

Сэндвич-панели имеют большой потенциал применения в качестве базового элемента внутренних ограждающих конструкций при малоэтажном строительстве, быстровозводимых перегородок в офисных и административных помещениях со свободными планировками, а также при изготовлении выгородок, кожухов для оборудования и кабин наблюдения на производстве.

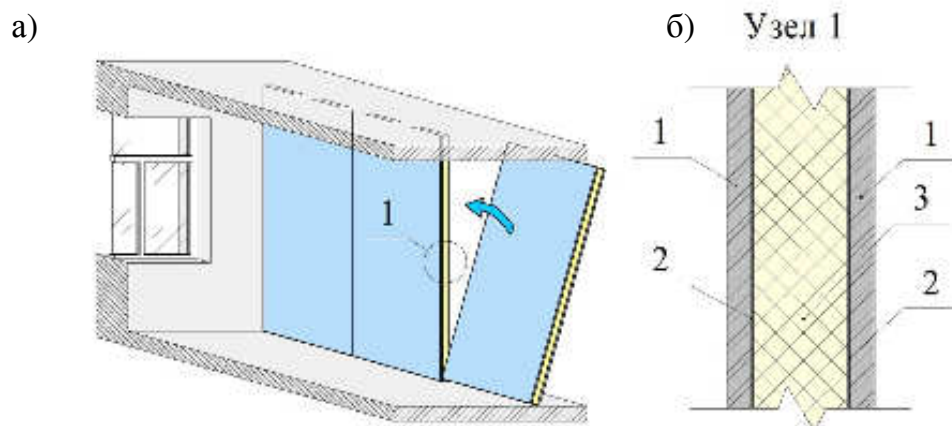


Рисунок 1.1 – Схема монтажа перегородки из сэндвич-панелей («пол – потолок»):

а) схема монтажа; б) узел 1: 1 – внешние листовые облицовки; 2 – клеевой слой; 3 – средний слой из жесткого легкого материала

Таблица 1.1 – Характеристики перегородок, применяемых в строительстве

Наименование конструкции	Толщина, мм	Масса 1м <sup>2</sup>	Стоимость возведения 100 м <sup>2</sup> , руб
Перегородка из кирпичной кладки	120	216	148 624
Перегородка из газосиликатных блоков	100	50	97 213
Каркасно-обшивная перегородка	100	57	124 014
Перегородка из сэндвич-панелей	108	57	86 947

## 1.2 Состояние вопроса

Для решения задачи о повышении звукоизоляции сэндвич-панелей без увеличения их массы, прежде всего, необходимо знать механизм прохождения звука через такие ограждения. Точное представление физических основ данного процесса позволит установить параметры ограждающих конструкций, изменяя которые, возможно регулирование звукоизоляцией сэндвич-панелей в различных частотных диапазонах.

### 1.2.1 Прохождение звука через однослойные ограждающие конструкции

Большое практическое значение имеют аналитические зависимости, знание которых позволяет строить частотную характеристику звукоизоляции однослойной пластины, т. к. она является базовым элементом многослойных ограждающих конструкций зданий и сооружений (сэндвич-панелей).

Прохождение звука через однослойную пластину неограниченной протяженности было впервые теоретически рассмотрено лордом Рэлеем [41]. При этом предполагалось, что плоская звуковая волна падает нормально к плоскости ограждения. Ограждающая конструкция рассматривалась как однородная пластина, толщина которой намного меньше длины продольных волн в материале. Под действием падающей звуковой волны ограждение совершает поршневые колебания и излучает звук. Из этого следовало, что угол падения звуковых волн не имеет принципиального значения, а основное влияние на звукоизоляцию ограждения оказывает его механическое сопротивление, определяемое массой. На основании исследований проведенных Рэлеем, был сформулирован «закон масс», согласно которому увеличение массы ограждения в два раза приводит к повышению его звукоизоляции на 6 дБ.

На основе большого количества проведенных экспериментальных исследований Р. Бергер [64] установил, что звукоизоляция реальных ограждающих конструкций определяется не только их поверхностной массой, но и другими физико-механическими характеристиками.

А. Шох [104] представив пластину как совокупность элементарных частей, независимых друг от друга, каждая из которых представляет собой колебательную систему, установил зависимость звукоизоляции однослойного ограждения от угла падения на него звуковых волн  $\theta$ :

$$R = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{\mu \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (1.1)$$

где  $\mu$  – поверхностная плотность ограждения,  $\text{кг/м}^2$ ;  $\omega$  – круговая частота звука, Гц;  $\rho_0 c_0$  – характеристический импеданс среды,  $\text{кг/м}^2\text{с}$ ;  $\theta$  – угол падения звуковых волн на ограждение, град.

Экспериментальные значения звукоизоляции реальных ограждающих конструкций значительно расходились с расчетными данными по формуле (1.1). В области высоких частот это расхождение составляло  $10 \div 20$  дБ для различных ограждений. Таким образом, представление однослойной пластины в виде колеблющегося поршня или совокупности несвязанных между собой масс, не позволило достоверно определить ее звукоизоляцию.

В дальнейшем основываясь на явлении волнового совпадения обнаруженного Ф. Сандерсом в области ультразвука [103] Л. Кремер [71] разработал теорию звукоизоляции тонких бесконечных однослойных пластин, в которой учитывались их изгибные колебания.

Л. Кремер установил, что при определенных углах падения плоских звуковых волн, их фазовая скорость вдоль пластины совпадает с фазовой скоростью изгибных волн в самой пластине. При этом происходит полное прохождение звука через однослойное ограждение и резкое снижение его звукоизоляции.

На основе эффекта волнового совпадения Дж. Готцем были объяснены результаты работ Рейснера [102]. Он показал, что полное прохождение звука происходит, если фазовая скорость падающей звуковой волны совпадает с фазовыми скоростями сдвиговых и продольных волн, распространяющихся вдоль пластины [79].

Согласно теории Л. Кремера, весь диапазон частот делится на две области с различными механизмами прохождения звука. Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойной пластины по теории Л. Кремера приведена на рисунке 1.1.

В области 1 (см. рисунок 1.2), где эффект волнового совпадения отсутствует, звукоизоляция описывается законом масс:

$$R = 20 \lg(f\mu) - 47,5, \quad (1.2)$$

где  $\mu$  – то же, что в формуле (1.1);  $f$  – частота звука, Гц.

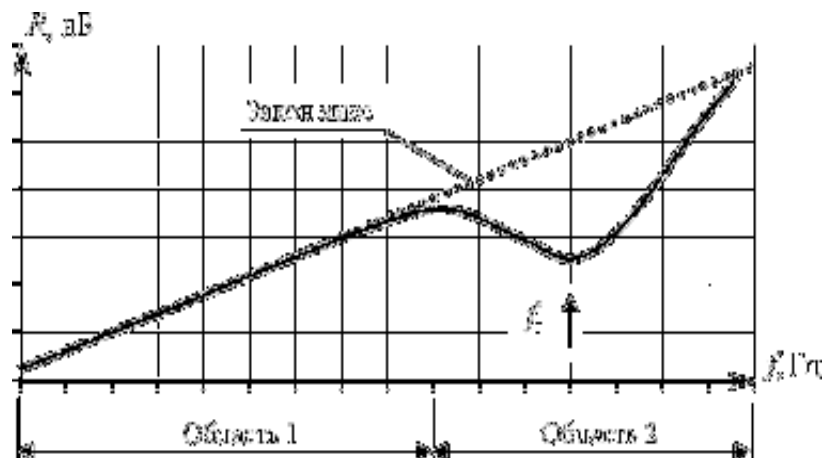


Рисунок 1.2 – Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения по теории Л. Кремера

Формула (1.2) является преобразованием формулы (1.1) для диффузного падения звука. На частотах выше граничной частоты  $f_{\Gamma}$  (область 2) звукоизоляция определяется массой ограждения, частотой звука и коэффициентом потерь материала  $\eta$ :

$$R = 20 \lg \left( \frac{\pi f_{\Gamma} \mu}{\rho_0 c_0} \right) + 30 \lg \left( \frac{f}{f_{\Gamma}} \right) + 10 \lg(\eta) - 3, \quad (1.3)$$

где  $\mu$ ;  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (1.1);  $f$  – то же, что в формуле (1.2),  $\eta$  – коэффициент потерь;  $f_{\Gamma}$  – граничная частота волнового совпадения, Гц.

Л. Беранек предложил разделять частотную шкалу на три области (см. рисунок 1.3).

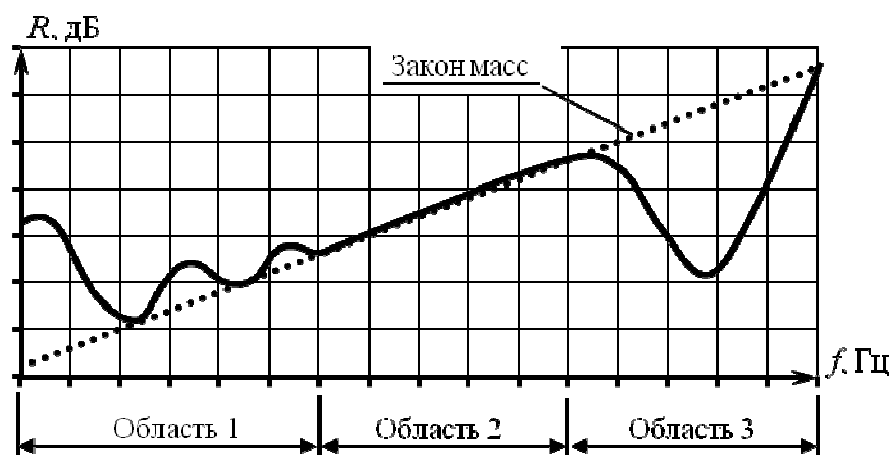


Рисунок 1.3 – Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения по Л. Беранеку



Согласно его предположению, в области 1 (см. рисунок 1.3) звукоизоляция ограждения управляется его жесткостью и резонансными явлениями, в зоне 2 действует «закон масс», а в зоне 3 преобладающее влияние на звукоизоляцию оказывает волновое совпадение и коэффициент потерь [59].

В дальнейшем теоретические исследования Шоха [105], [106] подтвердили результаты работ Рейснера, Кремера и Гетца относительно условий полного прохождения звука через однослойное ограждение неограниченных размеров.

В. И. Заборов при подробном рассмотрении прохождения звука через однослойное ограждение неограниченных размеров вновь получил формулу звукоизоляции Кремера в области волнового совпадения [21].

А. Лондон произвел уточнение расчетной формулы звукоизоляции для реальных ограждений введя в выражение импеданса безграничной пластины при изгибных колебаниях дополнительное слагаемое, учитывающее диссипативные потери энергии [89].

Г. Л. Осипов установил, что полученное А. Лондоном выражение может быть использовано для расчета частотной характеристики звукоизоляции однослойных ограждений. При этом слагаемое, учитывающее рассеяние энергии при прохождении звука определяется из данных экспериментальной частотной зависимости [39].

В своих работах, А. Лондон [89], Ф. Флеминг [76], Г. Бобран [65], В. Пьютц [100] обнаружили, что на низких частотах экспериментально полученная звукоизоляция реальных однослойных ограждений значительно превышает расчетные величины для идеализированного случая бесконечной пластины. Для точного и полного представления механизма прохождения звука через ограждающие конструкции необходимо учитывать конечность их размеров.

Такие исследования были проведены А. Шохом и К. Фейером [106], В. Пьютцем [101], М. Хеклем [81], [82], Т. Кихлманом [84], [85], и другими учеными [93 ÷ 96]. Однако, расчетных выражений звукоизоляции, которые позволяли бы учесть реальные размеры ограждений, получено не было.

Р. Жос и К. Лямюр [83] установили некоторую зависимость звукоизоляции от размеров ограждения и коэффициента потерь при прохождении звука через прямоугольную шарнирно опертую однослойную пластину:

$$R = 10 \lg \left[ \left( \frac{\pi \mu f}{\rho_0 c_0} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[ \left( \frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lg \left( \frac{2f}{\Delta f} \right) \right) + \frac{2c_0^2}{\pi^2 \eta f_\Gamma \sqrt{ff_\Gamma}} \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} \left( 1 + \frac{2f}{f_\Gamma} + \frac{3f^2}{f_\Gamma^2} \right) \right], \quad (1.4)$$

где  $\mu$ ,  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (1.1);  $f$  – то же, что в формуле (1.2);  $\eta$ ,  $f_\Gamma$  – то же, что в формуле (1.3);  $a$  – длина пластины, м;  $b$  – ширина пластины, м.

Однако, численные значения звукоизоляции ограждений, рассчитанные по формуле (1.4) имеют расхождения с экспериментально полученными данными, особенно в диапазоне низких частот.

Для расчета прохождения энергии через реальные строительные ограждающие конструкции Р. Лайон и Г. Майданик использовали метод статистического энергетического анализа [91]. Затем этот метод подробно разрабатывали М. Крокер, М. Баттачария и А. Прайс [37]. При этом воздушные пространства и элементы конструкции рассматриваются как резонансные системы, а поток энергии между любыми двумя системами пропорционален разности средних энергий колебаний этих двух систем.

Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций зданий с использованием метода статистического энергетического анализа проведены С. Н. Овсянниковым [38], [99].

Физические основы механизма прохождения звука через однослойные ограждающие конструкции конечных размеров были подробно исследованы в работах проф. М.С. Седова. Им была создана теория самосогласования волновых полей (далее СВП), которая устанавливает двойственный характер прохождения звука через однослойное ограждение – резонансное и инерционное прохождение [1], [42]. В основе данной теории лежит явление самосогласования звуковых полей со стороны «шумного» и «тихого» помещений и волновых полей собственных и инерционных колебаний самого ограждения. С помощью теории СВП можно аналитически рассчитывать звукоизоляцию реальных ограждающих конструкций зданий и сооружений с учетом их физико-механических параметров: геометрических размеров, изгибной жесткости, коэффициента потерь и текущей частоты звука.

Согласно теории самосогласования практически важный диапазон частот разделяется на пять областей резонансного прохождения: дорезонансная область,

область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (далее ПрПР), неполных пространственных резонансов (далее НПР) и полных пространственных резонансов (далее ППР). Данные области разделяют граничные частоты: основная резонансная частота ( $f_0$ ), граничный простой пространственный резонанс ( $f_{\Gamma m_0 n_0}$ ), граничный неполный пространственный резонанс ( $f_{\Gamma mn_0}$ ) и граничный полный пространственный резонанс ( $f_{\Gamma mn}$ ) соответственно [1].

Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения, построенная по теории самосогласования волновых полей приведена на рисунке 1.4.

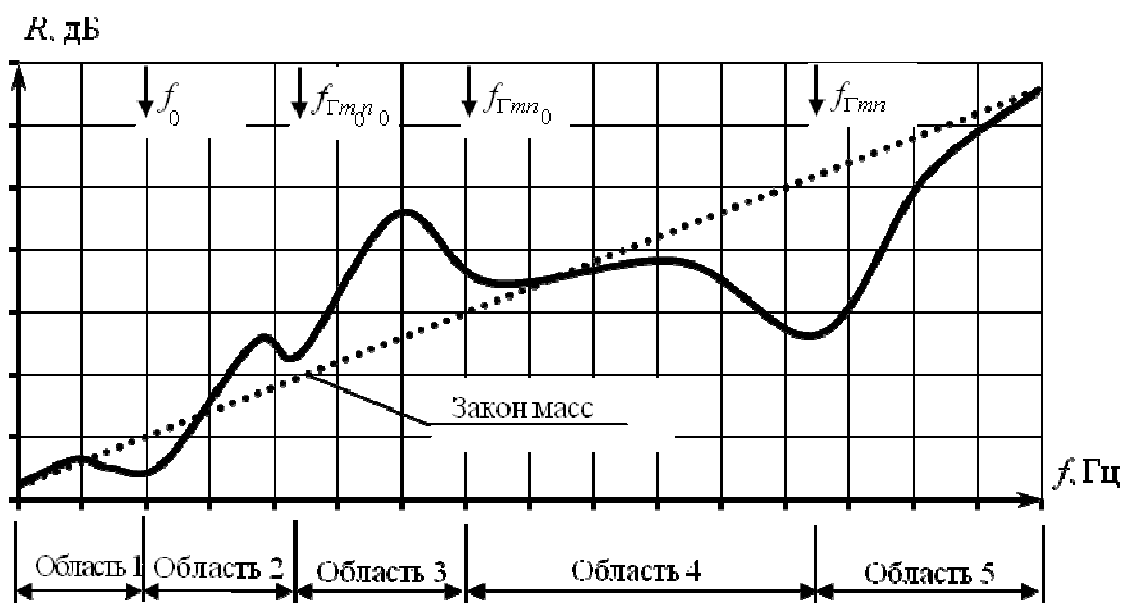


Рисунок 1.4 – Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции однослойного ограждения конечных размеров, построенная по теории самосогласования волновых полей М. С. Седова

В каждой из областей прохождение звука через ограждение различно и определяется соотношением резонансной и инерционной составляющих. Инерционное прохождение звука зависит от поверхностной массы ограждения и его размеров, а резонансное – от степени самосогласования звуковых полей и волнового поля собственных колебаний пластины, а также от потерь энергии на рассеяние.

Таким образом, с учетом двойственной природы прохождения звука, выражение звуковой мощности, излучаемой ограждающей конструкцией, запишется как [1]:

$$W_2 = W_{2c} + W_{2и}, \quad (1.5)$$

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

Теорией самосогласования волновых полей [1] установлено, что ограждающие конструкции конечных размеров имеют предельные значения звукоизоляции, определяемые инерционным прохождением звука, которые нельзя превысить. Предельная звукоизоляция реального ограждения зависит от его поверхностной плотности и геометрических размеров.

Повышение звукоизоляции реальных ограждений над «законом масс» на низких частотах, наблюдаемое экспериментально, объясняется снижением инерционного прохождения звука в этом диапазоне благодаря конечности их геометрических размеров. Теоретически и экспериментально доказано, что путем изменения размеров ограждающих конструкций, можно смещать эту область повышения по частотной шкале, управляя тем самым их звукоизоляцией.

На базе теории самосогласования волновых полей проведены многочисленные исследования звукоизоляции различных типов строительных ограждений. В. Н. Бобылевым изучены вопросы прохождения звука через ограждающие конструкции на низких частотах (ниже граничной частоты полного пространственного резонанса) [3]. Теоретические выводы и инженерный метод расчета звукоизоляции реальных ограждений подтверждены многочисленными экспериментальными данными [4], [5]. В. А. Тишков провел исследования звукоизоляции и разработал инженерный метод расчета ограждающих конструкций при наклонном падении звука (при различных углах падения звука) [44]. Д. В. Монич исследовал влияние цилиндрической жесткости на звукоизоляцию однослойных ограждений. Разработан инженерный метод расчета оптимальных параметров ограждающей конструкции, позволяющих эффективно использовать резервы ее звукоизоляции, определяемые соотношением собственной и предельной звукоизоляции [2], [6].

### 1.2.2 Прохождение звука через многослойные ограждающие конструкции

Многослойные ограждающие конструкции представляют собой ограждения, состоящие из двух тонких внешних листовых облицовок (толщиной менее  $1/6$  длины изгибной волны), между которыми находится воздушный промежуток или средний слой, выполненный из различных материалов.

Одним из первых исследователей процесса прохождения звука через двойные ограждения является Е. Винтергерст [116], который предложил модель ограждения в виде двух масс, не связанных между собой. В своей работе им было установлено, что при увеличении воздушного промежутка происходит повышение звукоизоляции двойного ограждения. Им также было установлено наличие провала в звукоизоляции по причине резонанса «масса – упругость – масса». Однако, полученные Е. Винтергерстом расчетные значения звукоизоляции имели существенное расхождение с экспериментальными данными.

Беранек и Уорк [60] разработали теоретическую модель прохождения звука через бесконечное двойное ограждение, при нормальном падении звука.

Беранек также рассматривал прохождение нормально падающих звуковых волн через систему чередующихся между собой слоев, используя импедансный метод [61 ÷ 63]. В. Томсон использовал матричный метод для описания уравнения движения [114]. В своей работе он указывает, что уравнения для отдельно взятого слоя должны быть связаны с уравнениями примыкающего слоя непрерывностью скорости частиц и нормальных, и касательных напряжений на их границе. Данный метод позволяет учесть также потери энергии в любом из составляющих ограждение слоев.

Исследования прохождения звука при диффузном падении на бесконечное двухслойное ограждение с воздушным промежутком проведены А. Лондоном [90], при этом он рассматривал несколько типов волн, оказывающих существенное влияние на звукоизоляцию. Лондон обнаружил, что многократно отраженные звуковые волны внутри воздушного промежутка не только могут значительно снизить звукоизоляцию ограждения, но и сделать ее хуже звукоизоляции однослойного ограждения равной массы. На резонансной частоте воздух между

облицовками работает как пружина, резко понижая звукоизоляцию ограждающей конструкции. Используя данную теорию, А. Лондон получил достаточно достоверные результаты, однако для конструкций с малыми воздушными промежутками, а также в диапазоне высоких частот обнаруживались значительные расхождения теории с экспериментом.

А. Камминс и К. Маллхолланд [72] на основе лучевой теории рассчитали потери звуковой энергии при прохождении звука через воздушный промежуток двойного бесконечного ограждения.

В работах Е. Сьюэлла [107] облицовки двойного ограждения с воздушным промежутком ограждения опирались шарнирно на абсолютно жесткие экраны, не имеющие между собой никаких связей. Математическая модель промежутка между обшивками представляла собой бесконечное пространство, не учитывающее отраженный звук от второй пластины. Расчет звукоизоляции выполнялся для двух областей (до граничной частоты волнового совпадения и после нее). Расчеты Е. Сьюэлла показали хорошую сходимость с экспериментальными данными по сравнению с другими существовавшими на то время расчетными моделями. Позже исследователь дополнил теоретическую модель путем учета внутреннего демпфирования в материале обшивок.

Шарп [108] получил теоретические выражения для прогнозирования звукоизоляции двухслойных ограждающих конструкций в трех областях прохождения звука (см. рисунок 1.5), разделенных частотой системы «масса-упругость-масса» и первым пространственным резонансом воздушного промежутка ( $f_B$  на рисунке 1.14).

В первой области (ниже резонансной частоты системы «масса-упругость-масса») двухслойное ограждение вело себя как однослойное равной массы, и рост звукоизоляции составлял 6 дБ на октаву. Во второй области, находящейся в диапазоне между граничной частотой «масса – упругость – масса» и первым пространственным резонансом воздушного промежутка рост звукоизоляции составлял 18 дБ на октаву. В третьей области, расположенной в диапазоне выше первого пространственного резонанса воздушного промежутка, сильное влияние на прохождение звука оказывали физико-механические свойства облицовок. Модель Шарпа показала неплохую сходимость с экспериментально полученными данными.

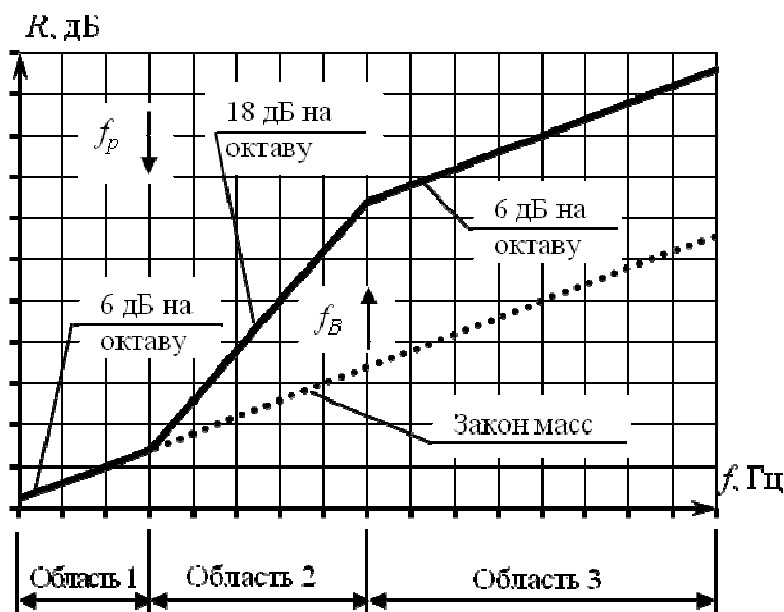


Рисунок 1.5 – Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции двойного ограждения, построенная по методике Шарпа

С. Н. Овсянников и О. В. Старцева в работе [49] приводят теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции двухслойных перегородок с воздушным промежутком и с заполнением звукопоглощающим материалом. Для расчета звукоизоляции двойных ограждений с воздушным промежутком авторы используют импедансный метод. Расхождение между экспериментально и теоретически полученными значениями индекса изоляции воздушного шума исследуемой конструкции составляют 3 дБ.

А. П. Юфев на базе теории самосогласования выполнил теоретическое исследование процесса прохождения звука через двустенные ограждающие конструкции конечных размеров [54]. Автором установлены способы регулирования звукоизоляции двустенного ограждения путем изменения его геометрических размеров.

М. С. Седов внес большой вклад в исследование звукоизоляции двойных ограждений конечных размеров. На базе теории самосогласования волновых полей им была создана методика расчета двойного ограждения с воздушным промежутком с учетом резонансного и инерционного прохождения [1].

М. С. Седов установил основные пути прохождения звука через двойные ограждения с воздушным промежутком [1]: прохождение через облицовки и через воздушный промежуток как самостоятельные колебательные структуры;

прохождение через всю конструктивную систему в целом, звуковые колебания ограждений в которой взаимосвязаны упругостью воздуха.

Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции двойных ограждений с воздушным промежутком, в практически важном диапазоне частот, приведена на рисунке 1.6.

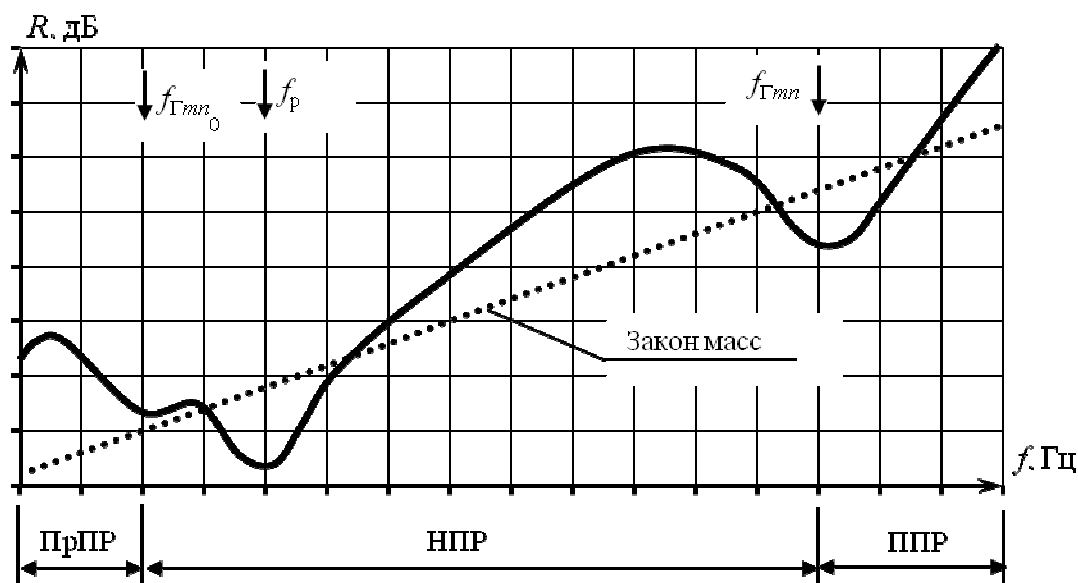


Рисунок 1.6 – Обобщенная частотная характеристика звукоизоляции двойного ограждения с воздушным промежутком по теории М. С. Седова

Аналитические зависимости позволяют строить теоретические частотные характеристики звукоизоляции реальных ограждений, которые хорошо согласуются с экспериментальными значениями во всех рассматриваемых частотных диапазонах.

И. И. Боголеповым были проведены серии экспериментальных исследований влияния на звукоизоляцию ограждения различных параметров – вибродемпфирующих покрытий обшивок, звукопоглощающего материала в промежутке между обшивками и др. [10]. На основании теоретических исследований И. И. Боголеповым был разработан метод расчета звукоизоляции двустенных судовых конструкций.

М. Коббле в своей работе решил задачу о продольных колебаниях бесконечной пластины, состоящей из произвольного числа разнородных слоев [70]. В местах соприкосновения слои предполагаются жёстко склеенными, что



соответствует равенству смещений и напряжений на противоположных сторонах промежуточных границ.

Шарп теоретически и экспериментально исследовал влияние различных факторов на звукоизоляцию многослойных ограждений [109], теория показала неплохую сходимость с экспериментальными данными для ограждений с небольшой толщиной среднего слоя.

Г. Куртце произвел работу по анализу изгибных и сдвиговых волн в слоистых структурах [86], [87]. Он учитывал различные случаи деформации (изгиб и сдвиг) слоистой панели. Автором были сделаны следующие выводы: при низких частотах панель ведет себя как однородная пластина и ее жесткость, выраженная через момент инерции поперечного сечения, относительно высока; на высоких частотах решающей является жесткость отдельной внешней облицовки.

Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции многослойных ограждений в диффузном звуковом поле представлены в работе И. Гиадер и К. Леже [80]. Решение получено на основании преобразований Фурье звукового поля и разложения в ряд по собственным функциям скорости колебаний ограждения. Звукоизоляция ограждений в диффузном поле рассчитывается по формуле, учитывающей только сопротивление излучения форм ее собственных колебаний и проводимость ограждающей конструкции.

В работах [69], [88] Ланг и Дим рассматривают задачу о прохождении звука через трёхслойные сэндвич-панели. Ими получено решение уравнения для свободных колебаний таких панелей конечного размера. Отмечено участие наружных жёстких листовых облицовок панели в высоких потерях на прохождение звука.

Звукоизоляцию сэндвич-панелей с тонкими листовыми облицовками и толстым, легким средним слоем теоретически и экспериментально исследовали в работе [92] Мур и Лайон. Авторами рассмотрена модель прохождения звука через сэндвич-панели с ортотропным и изотропным материалом среднего слоя. На рисунке 1.7 приведено сравнение экспериментально и теоретически полученных по данной теории результатов для сэндвич-панели с относительно толстым материалом среднего слоя, отмечается недостаточная сходимость в диапазоне высоких частот. Следует отметить панелей с тонким средним слоем (пенопласт

12,7 мм) и тонкими облицовками (фанера 6,3 мм) сходимость результатов по данной методике несколько лучше.

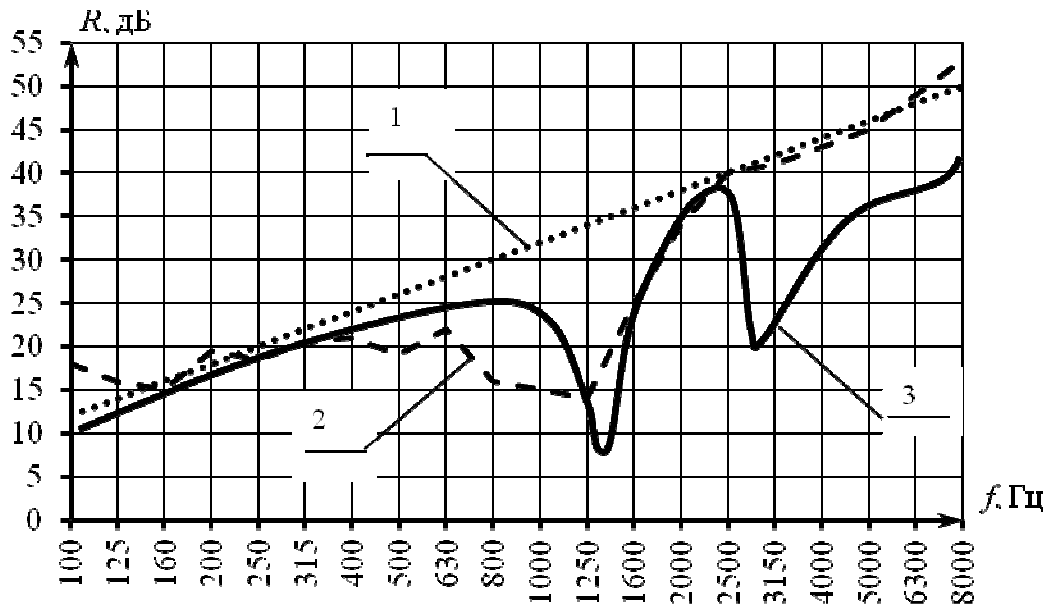


Рисунок 1.7 – Сравнение теоретически и экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели (облицовки из листов фанеры толщиной по 25,4 мм каждая, средний слой из пенопласта толщиной 76,2 мм): 1 – закон масс; 2 – эксперимент [92]; 3 – расчет по теории Мура, Лайона [92]

В работе [74] Дурочер и Солески получили уравнение четвертого порядка для описания колебаний трёхслойной панели произвольной конструкции, а также выражения для собственных частот изгибных колебаний свободно опёртой прямоугольной пластины.

Нильсон в работе [97] предложил методику определения звукоизоляции сэндвич-панели с легким средним слоем основанную на «законе масс» с добавками, учитывающими демпфирование и волновое совпадение для областей прохождения звука до и после резонансной частоты сэндвич-панели. В работе [115] Вискариди и Наполетано уточнили методику расчета, предложенную Нильсоном, получив лучшую сходимость в области выше резонансной частоты системы.

Теоретические и экспериментальные исследования прохождения звука через трехслойные сэндвич-панели со средним слоем с виде сот, применяемые в авиа и судостроении приводятся в работах [75], [98].

Значительный вклад в теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций внесли ученые НИИСФ РААСН: Л.А. Борисов [40], М. А. Пороженко, В. Н. Сухов.

Исследования механизма прохождения звука через слоистые ограждения и разработка на этой основе эффективных конструктивных решений звукоизолирующих ограждений выполнены Н.И. Ивановым [23].

Вопросы колебаний слоистых структур, а также прохождения звука через них рассмотрены в работах [11 – 15], [20], [52], [110 – 113].

Большой вклад в исследования прохождения звука через сэндвич-панели с жестким средним слоем внес В. И. Юлин [56], [57]. В работе [55] им получено выражение для определения скорости распространения изгибных и сдвиговых волн в слоистой панели (см. рисунок 1.8).

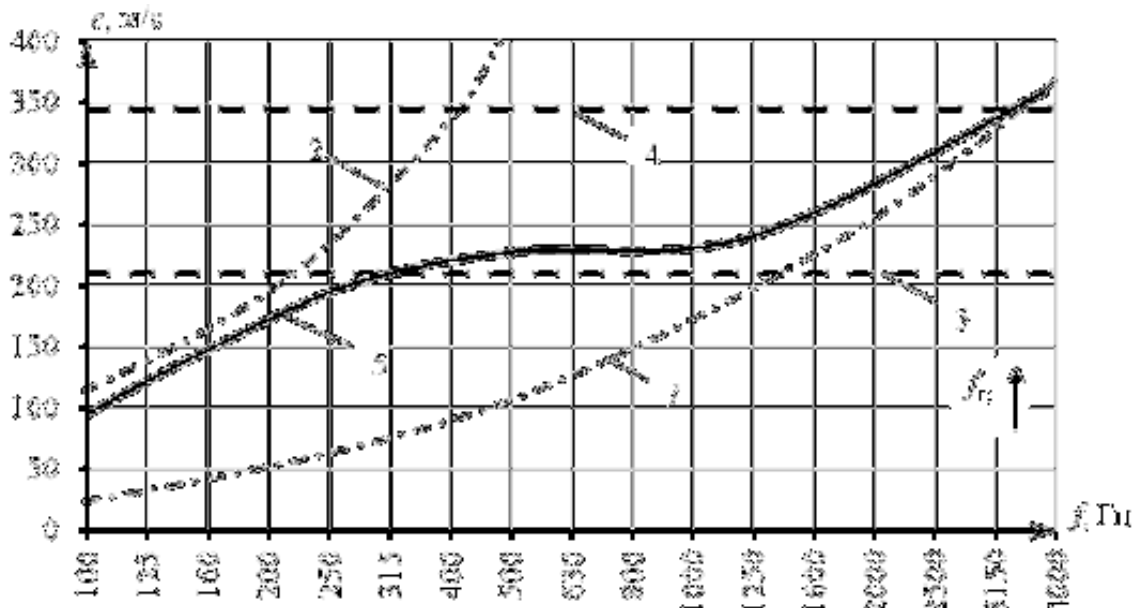


Рисунок 1.8 – Обобщенные дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели: 1 – скорости изгибных волн в условных однослойных пластинах с цилиндрическими жесткостями рассчитанными по методике [55] ( $c_1$ ); ( $c_2$ ); 3 – скорость сдвиговых волн среднего слоя, нагруженного массами облицовок ( $c_s$ ); 4 – скорость звука в воздухе ( $c_0$ ); 5 – скорость распространения бегущей волны ( $c_n$ )

Интересны также исследования В. И. Юлина [58] по определению граничной частоты трёхслойной пластины с жестким средним слоем. Автором получено решение уравнения свободных изгибных колебаний трёхслойной пластины,

содержащей несжимаемый наполнитель. Для ряда конкретных примеров получены численные решения и зависимость скорости распространения колебаний от частоты. Предложена формула для определения граничной частоты трёхслойной пластины. Отмечено, что подходящим подбором среднего слоя можно увести граничную частоту панели из нормируемого диапазона частот и тем самым добиться увеличения звукоизоляции, не уменьшая жёсткости конструкции и не увеличивая её поверхностной плотности. Автором разработана методика расчета звукоизоляции трехслойных сэндвич-панелей с жестким средним слоем относительно небольшой толщины, позволяющая получить звукоизоляцию таких ограждений с достаточной степенью точности (см. рисунок 1.9).

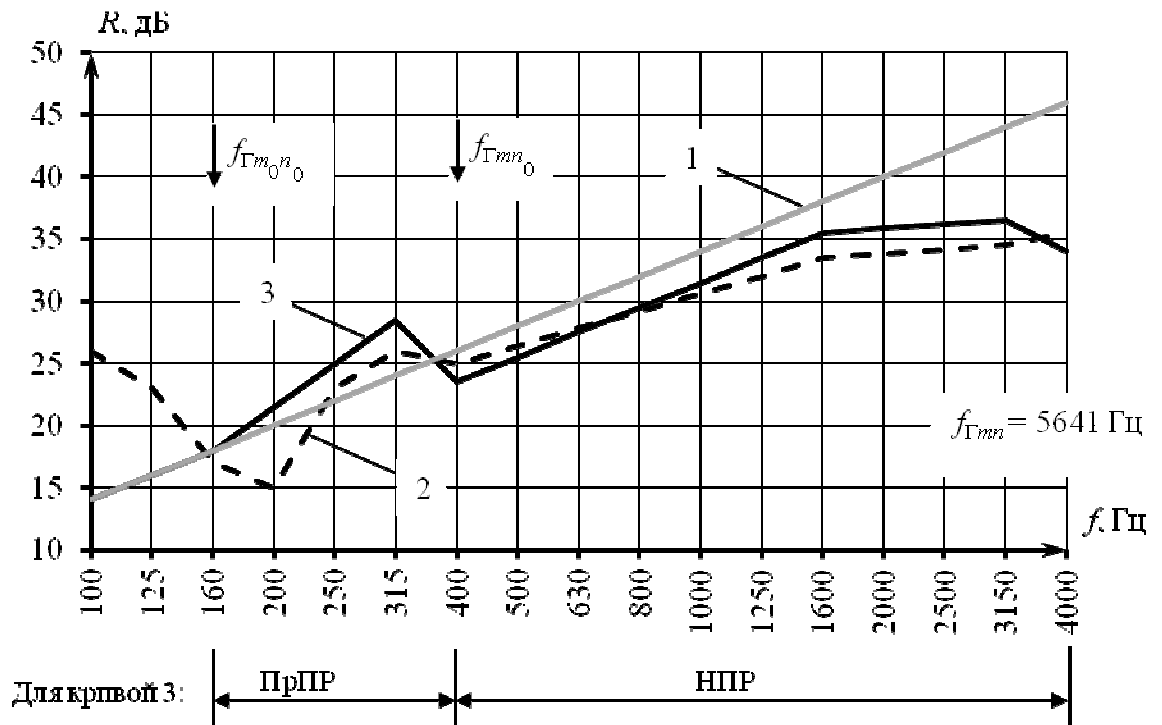


Рисунок 1.9 – Сравнение теоретически и экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели (облицовки из дюралюминия толщиной по 2 мм каждая, средний слой из пенопласта ПХВ-1 толщиной 25 мм): 1 – закон масс; 2 – эксперимент [55]; 3 – расчет В. И. Юлина

М. С. Седов предложил методику расчета слоистых ограждающих конструкций на основе теории СВП [1]. Принимая гипотезу о том, что проскальзывание слоев отсутствует и что на их границах наблюдается непрерывность скорости частиц, нормальных и касательных напряжений, он предложил описать волновые поля слоистой пластины по аналогии с однослойной.

Отличие при этом состоит в том, что скорость распространения упругих волн изменяет свое значение за счет наличия в заполнителе сдвиговых деформаций.

Р. Форд, П. Лорд, А. Уолкер [77], [78] исследовали звукоизоляцию трёхслойных панелей с заполнителями различной жёсткости.

А. А. Кочкин на базе теории самосогласования волновых полей провел теоретические исследования легких многослойных ограждающих конструкций конечных размеров с вибродемпфирующими слоями [25]. Автором исследовано влияние различных параметров многослойных демпфированных ограждений на их звукоизоляцию [26 ÷ 28], разработан метод расчета частотных характеристик таких конструкций. Совместно с Л. Э. Шашковой исследованы способы увеличения звукоизоляции многослойных ограждений с вибродемпфирующими слоями путем уменьшения их изгибной жесткости [30], [31].

Дишкманс, Вермей и Ниггебруг в работе [73], используя модель передаточных матриц, исследовали звукоизоляцию сэндвич-панелей. Авторы отмечают недостаточную звукоизоляцию сэндвич-панелей с жестким заполнителем и необходимость оптимизации их параметров для использования в строительстве. В работе представлены зависимость звукоизоляции сэндвич-панелей от модуля упругости среднего слоя и толщины внешних листовых облицовок, на основе экспериментальных данных.

Чжоу, Бхаскар и Занг в работе [117] исследуют звукоизоляцию сэндвич-панелей с пористым средним слоем при различных вариантах соединения слоев. Рассматриваются три типа ограждений: сэндвич-панель со слоями связанными между собой, панель с одной облицовкой связанной с материалом среднего слоя, а второй – свободной, сэндвич-панель с облицовками не связанными со средним слоем. Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей выполнен на базе теории Болтона [67], [68] для диффузного падения звука. Авторы рассматривают каждое пространство между несвязанной облицовкой и средним слоем как отдельный воздушный промежуток. Показано повышение звукоизоляции в сэндвич-панели с несвязанными облицовками по сравнению со связанными, а также значительное смещение резонансной частоты системы для такого ограждения в область низких частот.

## Выводы по главе 1 и определение направлений исследований

1. Звукоизоляция сэндвич-панелей с жестким средним слоем зависит от физико-механических характеристик материалов, применяемых для изготовления облицовок и среднего слоя, конструктивного решения сэндвич-панели (условий соединения слоев между собой), геометрических размеров ограждения. Разработка сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением требует комплексного учета всех перечисленных параметров.

Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей является важной составляющей при разработке их конструктивного решения, т. к. он позволяет определять положение областей повышенного прохождения звука, а также резервы повышения звукоизоляции ограждения.

2. Для повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения их массы и толщины необходимо использовать резервы повышения звукоизоляции. Данные резервы могут быть определены на базе теории самосогласования волновых полей М. С. Седова с учетом двойственной природы прохождения звука через ограждения (резонансное и инерционное прохождение звука).

3. Для обоснования новых конструктивных решений многослойных ограждений на основе сэндвич-панелей необходима разработка метода расчета звукоизоляции с учетом двойственной природы прохождения звука.

4. Обоснование достоверности теоретических результатов необходимо проводить на основе экспериментальных данных в лабораторных и натурных условиях.

Исходя из поставленной цели и выполненного анализа, **основными направлениями исследований** являются:

- теоретические исследования прохождения звука через сэндвич-панели конечных размеров с учетом двойственной природы прохождения звука (резонансное и инерционное прохождение звука);

- определение резервов повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения их массы и толщины;

- теоретическое и экспериментальное исследование влияния физико-механических параметров облицовок и среднего слоя сэндвич-панелей на их звукоизоляцию;
- теоретическое и экспериментальное исследование влияния акустического разобщения слоев на звукоизоляцию сэндвич-панелей конечных размеров;
- разработка рациональных по звукоизоляции конструктивных решений сэндвич-панелей для применения в гражданском и промышленном строительстве;
- разработка метода расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров в нормируемом диапазоне частот с учетом физико-механических параметров облицовок и среднего слоя.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ**

Исходя из результатов анализа методов расчета звукоизоляции однослойных и многослойных ограждений, выполненного в первой главе установлено, что теория М. С. Седова о самосогласовании параметров внешних звуковых полей и волнового поля колебаний ограждения [1], [25], [58] позволяет исследовать прохождение звука через многослойные ограждения с учетом его двойственной природы (резонансное и инерционное прохождение). Данный подход позволяет определять предельную звукоизоляцию ограждений и их внутренние резервы звукоизоляции, необходимые для разработки рациональных по звукоизоляции конструктивных решений сэндвич-панелей.

В данной главе работы приведены аналитические выражения для расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с жестким средним слоем по данной методике, а также получены аналитические выражения для определения их предельной звукоизоляции.

### **2.1 Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей**

Бескаркасные перегородки из сэндвич-панелей являются перспективными конструкциями для применения в гражданском и промышленном строительстве. Данный тип ограждающих конструкций не требует установки каркаса, при этом прочность и устойчивость обеспечивается совместной работой жесткого среднего слоя и наружных листов облицовок.

В качестве объекта исследования будем рассматривать плоскую прямоугольную сэндвич-панель конечных размеров, с шарнирным опиранием по контуру в проеме акустически жесткого бесконечного экрана, на которую действует диффузное звуковое поле. Сэндвич-панель состоит из наружных листовых облицовок, по всей плоскости приклеенных к жесткому среднему слою.



Общий вид рассматриваемого ограждения и схема его конструкции приведены на рисунке 2.1.

Рассматриваются сэндвич-панели в которых внешние листовые облицовки изготавливаются из гипсоволокнистых (ГВЛ), гипсокартонных (ГКЛ), гипсофибровых (ГФЛ) листов, гипсо-стружечных (ГСП), ориентировано-стружечных (OSB) плит или тому подобных листовых материалов плотностью от  $650 \text{ кг/м}^3$  до  $1400 \text{ кг/м}^3$ , толщиной от 2 мм до 15 мм. Средний слой рассматриваемых сэндвич-панелей может быть выполнен из пенопласта, пенополиуретана, пенополистирола, и тому подобных жестких, легких, материалов плотностью до  $30 \text{ кг/м}^3$  толщиной от 50 мм до 100 мм с динамическим модулем упругости  $2,5 \cdot 10^6 < E_d < 1,0 \cdot 10^7 \text{ Па}$ . Схема конструктивного решения рассматриваемой сэндвич-панели приведена на рисунке 2.1.

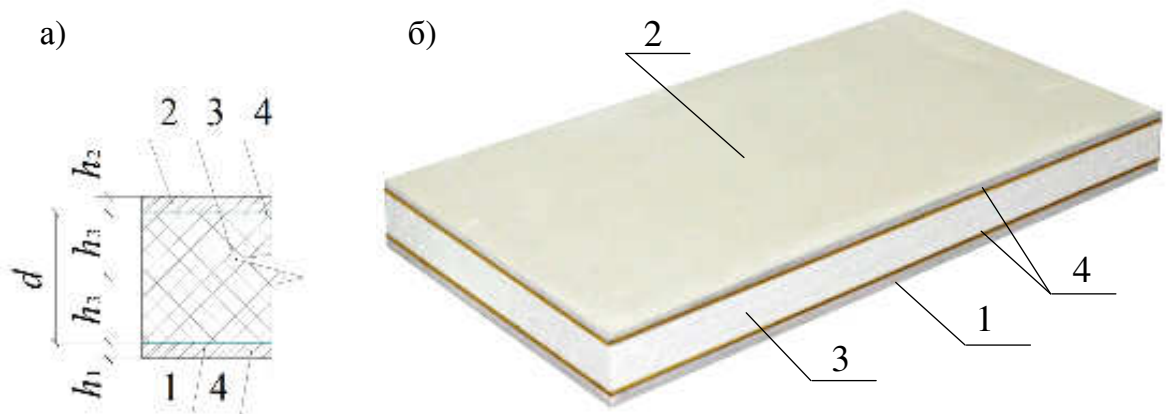


Рисунок 2.1 – Схема сэндвич-панели с жестким соединением (склеиванием) внешних листовых облицовок и среднего слоя. а) схема конструктивного решения; б) общий вид сэндвич-панели: 1, 2 – внешние листовые облицовки; 3 – средний слой жесткого легкого заполнителя; 4 – клеевой слой по всей плоскости облицовок

Для целей данного исследования примем допущение, что механизм прохождения звука через сэндвич-панель, состоящую из жестких внешних листовых облицовок и легкого среднего слоя, может сравниваться с механизмом прохождения звука через двойное ограждение с воздушным промежутком (равным по толщине среднему слою сэндвич-панели).

Под действием падающей звуковой волны в первой листовой облицовке двойного ограждения с воздушным промежутком возникают колебательные процессы, и она начинает излучать звук в пространство воздушного промежутка с последующей передачей энергии на вторую облицовку, излучающую звук в

изолируемое помещение. При прохождении звука через сэндвич-панель скорость распространения упругих волн изменяет свое значение за счет наличия сдвиговых деформаций в среднем слое, обладающем жесткостью.

Важным фактором при анализе прохождения звука через трехслойную сэндвич-панель является наличие у данного ограждения области повышенного прохождения звука («провал» звукоизоляции) вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ). Следствием этого является то, что сэндвич-панели с жестким соединением слоев обладают низкой звукоизоляцией в диапазоне средних и высоких частот (630 ÷ 1250 Гц) [18], [66]. Данный недостаток хорошо известен специалистам в области строительной акустики и является одним из сдерживающих факторов широкого внедрения сэндвич-панелей с жестким средним слоем в практику строительства.

Значение данной резонансной частоты для двойных ограждений с воздушным промежутком определяется по формуле [50]:

$$f_p = 60 \sqrt{\frac{\mu_1 + \mu_2}{d\mu_1\mu_2}}, \quad (2.1)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – поверхностные плотности первой и второй облицовок, соответственно, кг/м<sup>2</sup>;  $d$  – толщина воздушного промежутка, м.

Из формулы (2.1) можно заключить, что резонансная частота конструкции  $f_p^1$  (см. рисунок 2.2) для двустенных ограждений с облицовками из рассматриваемых материалов и толщиной воздушного промежутка 50 ÷ 100 мм находится в диапазоне низких частот (от 50 Гц до 100 Гц), вследствие чего ее негативное влияние на звукоизоляцию в нормируемом диапазоне частот незначительно.

Резонансная частота системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели с жестко склеенными по всей плоскости слоями определяется по формуле [50]:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{E_d(\mu_1 + \mu_2)}{d\mu_1\mu_2}}, \quad (2.2)$$

где  $E_d$  – динамический модуль упругости материала среднего слоя сэндвич-панели, МПа,  $d$  – толщина среднего слоя сэндвич-панели, м;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1).

Анализируя формулу (2.2), можно заключить, что область повышенного прохождения звука вблизи резонансной частоты  $f_p^2$  (см. рисунок 2.2) располагается в

областях средних и высоких частот для рассматриваемых сэндвич-панелей, применяемых в строительстве (толщиной от 50 до 150 мм), что значительно ухудшает их звукоизолирующие свойства по сравнению с двустенными ограждениями с воздушным промежутком.

Звукоизоляцию сэндвич-панелей с жестким легким средним слоем будем определять на основе методики расчета звукоизоляции двойных ограждений с воздушным промежутком, разработанной научной школой проф. М. С. Седова [1]. В данной методике рассматривается прохождение звука в различных диапазонах частот. Согласно теории самосогласования волновых полей [1], вся частотная шкала делится на пять областей: дорезонансную область, область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (ПрПР), неполных пространственных резонансов (НПР) и полных пространственных резонансов (ППР).

Для рассматриваемых двойных ограждений с воздушным промежутком и трехслойных сэндвич-панелей резонансная частота системы «масса – упругость – масса» находится в диапазоне частот НПР. Для удобства анализа теоретических результатов и экспериментальных данных нами введена разбивка частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панелей в области неполных пространственных резонансов на две дополнительные подобласти: НПР1:  $f_{\Gamma mn_0} < f < f_p$  и НПР2:  $f_p < f < f_{\Gamma mn}$  (см. рисунок 2.2) с границей на резонансной частоте системы  $f_p$  [106].

На основании вышеизложенного, при проектировании сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями, обеспечивающими высокую звукоизоляцию, следует стремиться вывести резонансную частоту системы за пределы нормируемого диапазона частот (100 ÷ 3150 Гц [50]).

При этом следует отметить, что резонансную частоту системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели нельзя сместить ниже значения резонансной частоты ограждения с воздушным промежутком равным толщине среднего слоя сэндвич-панели, определяемой по формуле (2.1). Значение резонансной частоты ограждения с воздушным промежутком ( $f_{p \text{ пред.}}$  на рисунке 2.2) будем считать предельным для сэндвич-панелей.

На рисунке 2.2 нанесены несколько кривых, позволяющих оценить возможность регулирования звукоизоляции сэндвич-панели при изменении резонансной частоты от  $f_p$  до  $f_{p \text{ пред.}}$  путем применения различных конструктивных мероприятий.

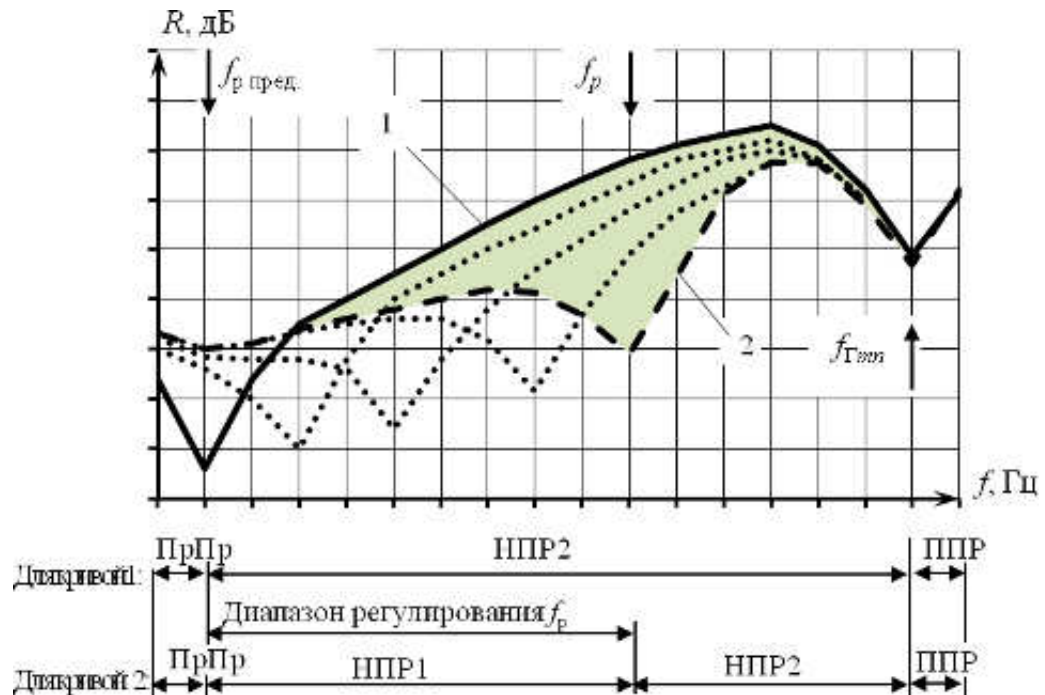


Рисунок 2.2 – Обобщенные частотные характеристики звукоизоляции ограждений: 1 – двойное ограждение с воздушным промежутком; 2 – сэндвич-панель (толщина среднего слоя равна толщине воздушного промежутка)

Из рисунка 2.2 видно, что сэндвич-панели обладают значительными резервами повышения звукоизоляции (область выделенная зеленым цветом на рисунке 2.2), которые можно реализовать, применяя комплекс конструктивных мер, описанный в данной работе. При этом подбор рационального конструктивного решения следует производить с учетом спектра изолируемого звука и нормативных требований по звукоизоляции ограждающих конструкций.

## 2.2 Звукоизоляция сэндвич-панели с предельными параметрами

Исходя из предпосылок, изложенных в п. 2.1, введем новое понятие – сэндвич-панель с предельными параметрами. Под этим понимается трехслойная сэндвич-панель, средний слой которой имеет физико-механические характеристики, максимально близкие к физико-механическим характеристикам воздуха:  $E_d = 0,15 \cdot 10^{-5}$  Па;  $\mu = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. В этом случае обобщенная частотная характеристика звукоизоляции трехслойной сэндвич-панели будет соответствовать кривой 1 на рисунке 2.2.

### 2.2.1 Коэффициенты прохождения звука

Для целей данной работы представляет интерес нормальная составляющая вектора колебательной скорости звуковых волн, прошедших через первую облицовку (со стороны источника шума). За счет наличия последней и за счет упругости среднего слоя сэндвич-панели возникают дополнительные взаимосвязанные звуковые колебания обеих облицовок. Таким образом, основные пути прохождения звука через трехслойные сэндвич-панели пролегают через обе пластины внешних облицовок и через средний слой, как через самостоятельные колебательные структуры и всю конструктивную систему в целом. При этом звуковые колебания обеих облицовок взаимосвязаны друг с другом за счет упругости материала среднего слоя, заключенного между ними.

С учетом двойственной природы прохождения звука (резонансное и инерционное прохождение) [1] запишем коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель в следующем виде:

$$\tau = \tau_{\text{и}} + \tau_{\text{с}}, \quad (2.3)$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – коэффициент инерционного прохождения звука;  $\tau_{\text{с}}$  – коэффициент резонансного прохождения звука.

Коэффициент инерционного прохождения звука при этом определяется по формуле [1]:

$$\tau_{\text{и}} = \tau_{\text{пи}} + \tau_{\text{1и}} \tau_{\text{2и}}, \quad (2.4)$$

где  $\tau_{\text{пи}}$  – коэффициент инерционного прохождения звука через облицовки с упругой связью между ними;  $\tau_{\text{1и}}$ ,  $\tau_{\text{2и}}$  – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую (на которую падают звуковые волны) и вторую облицовки, соответственно.

Коэффициент резонансного прохождения звука определяется по формуле [1]:

$$\tau_{\text{с}} = \tau_{\text{1с}} \tau_{\text{2с}} + \tau_{\text{пс}}, \quad (2.5)$$

где  $\tau_{\text{пс}}$  – коэффициент резонансного прохождения звука через облицовки с упругой связью между ними;  $\tau_{\text{1с}}$ ,  $\tau_{\text{2с}}$  – коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно.

### 2.2.2 Коэффициенты резонансного прохождения звука

Коэффициент резонансного прохождения звука определяется как отношение звуковых мощностей волн, прошедших через каждую облицовку и волн, падающих на них [1]:

$$\tau_{\text{с}} = \frac{W_{\text{2с}}}{W_1}, \quad (2.6)$$

где  $W_{\text{2с}}$  – мощность звуковых волн, излученных собственными волнами ограждения со стороны изолируемого от шума помещения;  $W_1$  – мощность падающих звуковых волн при диффузном падении звука.

Мощность звуковых волн, излученных собственными волнами ограждения со стороны изолируемого от шума помещения определяется как [1]:

$$W_{\text{2с}} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{\vartheta_{0mn}^{-2}}{\cos \theta \cos \theta_{\text{2с}}} \frac{A_2^2}{ab}, \quad (2.7)$$

где  $\rho_0 c_0$  – характеристический импеданс среды за ограждением, кг/м<sup>2</sup>с;  $A_2$  – характеристика самосогласования звукового поля за ограждением с его собственным волновым полем.

Мощность падающих звуковых волн, которая при диффузном падении звука определяется по формуле [50]:

$$W = \frac{P_{\text{ПАД}}^2 ab}{8\rho_0 c_0}, \quad (2.8)$$

где  $\rho_0 c_0$ ,  $A_2$  – то же, что в формуле (2.7);  $P_{\text{ПАД}}$  – амплитудное звуковое давление со стороны помещения с источником шума;  $a$  – длина ограждения, м;  $b$  – ширина ограждения, м.

Учитывая звуковое давление, как сумму давлений в падающих и отраженных волнах, получаем выражение суммарной звуковой мощности [1]:

$$W = \frac{P_{\text{ПАД}}^2 ab}{4\rho_0 c_0}, \quad (2.9)$$

где  $\rho_0 c_0$ ,  $A_2$  – то же, что в формуле (2.7);  $P_{\text{ПАД}}$ ,  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.8).

При резонансном прохождении звука через сэндвич-панель как конструктивную систему в целом, коэффициент прохождения звука определяется по формуле [1]:

$$\tau_{\text{ПС}} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 f^2}{A^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (2.10)$$

где  $\mu$  – поверхностная плотность ограждающей конструкции, кг/м<sup>2</sup>;  $A$  – характеристика самосогласования волнового поля первой облицовки и звуковых полей перед и за облицовкой, соответственно;  $f$  – текущая частота звука, Гц;  $f_p$  – резонансная частота системы «масса-упругость-масса», Гц;  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (2.7).

При резонансном прохождении звука в частотной области неполных пространственных резонансов ( $f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$ ) коэффициенты прохождения через первую и вторую облицовки [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1c} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A_{01}^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 \cos^2 \theta_{cp} + 1}, \quad (2.11)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2c} = \frac{1}{\frac{1,15\pi^3}{8\rho_0^2 c_0^2 A_{02}^4} \mu_2^2 f^2 \eta_2 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (2.12)$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – коэффициенты потерь материала первой и второй облицовок, соответственно;  $\theta_{cp.} = 51,76^\circ$  – средний угол падения волн диффузного звукового поля на первую облицовку;  $\theta_2$  – угол падения звуковых волн из объема, занимаемого средним слоем, на вторую облицовку, град;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $A, f$  – то же, что в формуле (2.10).

Для учета реальных размеров ограждения нами предложено вычислять угол падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели как среднее арифметическое углов падения по длинной и короткой стороне ограждения по формуле [19]:

$$\theta_2 = \frac{\theta_2' + \theta_2''}{2}, \quad (2.13)$$

где  $\theta_2'$  – угол падения звуковых волн на вторую облицовку по короткой стороне  $b$ , град;  $\theta_2''$  – угол падения звуковых волн на вторую облицовку по длинной стороне  $a$ , град (см. рисунок 2.3).

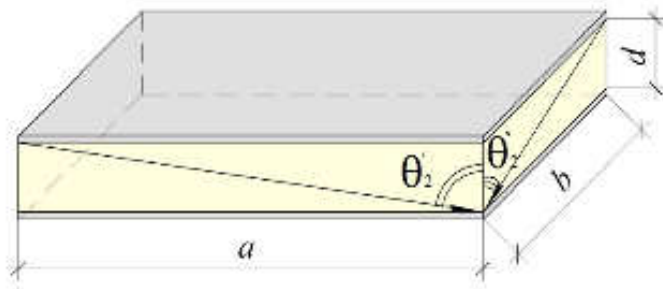


Рисунок 2.3 – Угол падения звука на вторую облицовку сэндвич-панели

Таким образом,  $\cos \theta_2$  будет определяться из выражения [8]:

$$\cos \theta_2 = \frac{d}{\sqrt{b^2 + d^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}, \quad (2.14)$$

где  $d$  – то же, что в формуле (2.2);  $a, b$  – то же, что в формуле (2.9).



При резонансном прохождении звука в области частот выше граничной частоты ППР ( $f > f_{\Gamma mn}$ ), характеристика самосогласования волновых полей  $A_{mn} = 1$  и определяется величиной коэффициента излучения звука [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1C} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_1 \cos \theta_{cp} \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (2.15)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2C} = \frac{1}{\frac{8\pi}{\rho_0^2 c_0^2} \mu_2^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_2 \cos \theta_{cp} \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (2.16)$$

где  $f_{\Gamma mn}$  – граничная частота области ППР, Гц;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\theta_{cp}$ ,  $\theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12).

Из выражений (2.10) и (2.11, 2.12) следует, что звукопроницаемость сэндвич-панели в резонансном режиме в частотном диапазоне НПР ( $f_{\Gamma mn0} < f < f_{\Gamma mn}$ ) зависит от потерь энергии на рассеивание в материале облицовки ( $\eta$ ) и от степени самосогласования собственного волнового поля первой обшивки и звуковых полей перед и за ней. В области ППР ( $f > f_{\Gamma mn}$ ) резонансное прохождение звука зависит также от величины граничной частоты ППР для облицовки (определяется соотношением  $\mu$  и  $D$ ). Таким образом, прохождение звука с собственными волнами различно для областей неполных и полных пространственных резонансов.

### 2.2.3 Поле инерционных волн сэндвич-панели

Теория самосогласования волновых полей устанавливает двойственную природу прохождения звука через ограждающие конструкции – резонансное и инерционное прохождение. Это обусловлено тем, что при воздействии звуковых волн в начальный момент времени в ограждении возникают вынужденные (инерционные) волны [46].

Характеристикой начального состояния ограждения можно считать смещение при таких вынужденных колебаниях, которые формируются однородной вынужденной волной, являющейся следом падающей звуковой волны, и краевыми неоднородными вынужденными волнами. Последние, отличаются от краевых неоднородных свободных волн скоростью распространения. Распространение инерционных волн происходит со скоростью следа падающей звуковой волны  $\left(\frac{c_0}{\sin \theta}\right)$  и не зависит от упругих характеристик материала, а определяется только массой ограждения, поэтому такие волны названы инерционными [46].

Уравнение смещений в инерционной волне записывается как [1]:

$$\xi_{\text{И}} = \xi_{0\text{И}} e^{i[k_{01}(x \sin \alpha_0) + \Psi]}. \quad (2.17)$$

Отсутствие смещений краев пластины приводит к образованию неоднородных краевых волн [1]:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\text{Ia}} &= \xi_{0\text{Ia}} e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2 \alpha_x}}; \\ \xi_{\text{IIa}} &= \xi_{0\text{IIa}} e^{-k_0 x \sqrt{1+\sin^2 \alpha_x}}; \\ \xi_{\text{Ib}} &= \xi_{0\text{Ib}} e^{k_0(y-b)\sqrt{1+\sin^2 \alpha_y}}; \\ \xi_{\text{IIb}} &= \xi_{0\text{IIb}} e^{-k_0 y \sqrt{1+\sin^2 \alpha_y}}; \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где  $\alpha_x, \alpha_y$  – углы скольжения звуковой бегущей волны соответственно вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Таким образом, под действием падающих звуковых волн в начальный момент времени в обшивке двухслойного ограждения с воздушным промежутком возникает поле инерционных волн. Это волновое поле формируется инерционной бегущей волной и краевыми неоднородными инерционными волнами.

Суммарное смещение панели в инерционных волнах определяется по формуле [1]:

$$\xi_{\text{И}} = \xi_{0\text{И}} X_{\text{И}} Y_{\text{И}}. \quad (2.19)$$

Здесь

$$X_{\text{И}} = \cos(k_0 x \sin \theta) - \left(1 + \gamma_a e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2 \alpha_x}}\right) e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2 \alpha_x}} + \gamma_a e^{k_0(x-a)\sqrt{1+\sin^2 \alpha_x}}, \quad (2.20)$$

$$Y_{\text{и}} = \cos(k_0 y \sin \theta) - \left(1 + \gamma_b e^{-k_0 b \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}}\right) e^{-k_0 y \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}} + \gamma_b e^{k_0 (y-b) \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}}, \quad (2.21)$$

где

$$\gamma_a = \frac{e^{-k_0 a \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_x}} - \cos(k_0 a \sin \theta)}{1 - e^{-2k_0 a \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_x}}}; \quad (2.22)$$

$$\gamma_b = \frac{e^{-k_0 b \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}} - \cos(k_0 b \sin \theta)}{1 - e^{-2k_0 b \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}}}. \quad (2.23)$$

## 2.2.4 Инерционное прохождение звука

Амплитуда поперечных колебаний сэндвич-панели в инерционных волнах определяется по формуле [1]:

$$\xi_{0\text{и}} = F_{\text{и}} \frac{P_{0m_0n_0} A_{\text{и}}}{\mu \omega^2}, \quad (2.24)$$

где  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);

$$P_{0m_0n_0} = P_{0\text{ПАД.}} + P_{0\text{ОТР.}} - P_{0\text{ПР.}}; \quad (2.25)$$

где  $P_{0\text{ПАД.}}$ ,  $P_{0\text{ОТР.}}$ ,  $P_{0\text{ПР.}}$  – амплитуды давления падающих, отраженных и прошедших звуковых волн, соответственно;  $A_{\text{и}}$  – характеристика самосогласования звуковых полей с полем инерционных волн пластины [1]:

$$A_{\text{и}} = \frac{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{n_0 \pi x}{a} \sin \frac{n_0 \pi y}{a} \sin \frac{m_{\text{и}} \pi x}{a} \sin \frac{n_{\text{и}} \pi y}{b} dx dy}{\int_0^a \int_0^b \sin \frac{m_{\text{и}} \pi x}{a} \sin \frac{n_{\text{и}} \pi y}{b} dx dy}, \quad (2.26)$$

где  $m_{\text{и}}$ ,  $n_{\text{и}}$  – числа длин проекций инерционных полувольт по сторонам  $a$  и  $b$  соответственно.

Функция отклика ограждения  $F_{\text{и}}$  определяется по формуле [1]:

$$F_{\text{и}} = \frac{G_{mn}}{Q_{mn}}. \quad (2.27)$$

Здесь

$$G_{mn} = \left\{ Q_m - \frac{\sin m\pi}{\pi(m^2 + m_1^2)} \left[ m_1 \sin m\pi + m e^{-m_1\pi} + m\beta_a (1 + e^{-2m_1\pi}) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ Q_n - \frac{\sin n\pi}{\pi(n^2 + n_1^2)} \left[ n_1 \sin n\pi + n e^{-n_1\pi} + n\beta_a (1 + e^{-2n_1\pi}) \right] \right\}, \quad (2.28)$$

где

$$\beta_a = \frac{e^{-2m_1\pi} - \cos m\pi}{1 - e^{-2m_1\pi}}; \quad (2.29)$$

$$\beta_b = \frac{e^{-2n_1\pi} - \cos n\pi}{1 - e^{-2n_1\pi}}; \quad (2.30)$$

$$m = \frac{k_0 a}{\pi} \cos \alpha_x; \quad (2.31)$$

$$n = \frac{k_0 b}{\pi} \cos \alpha_y; \quad (2.32)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0}; \quad (2.33)$$

$$m_1 = \frac{k_0 a}{\pi} \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_x}; \quad (2.34)$$

$$n_1 = \frac{k_0 b}{\pi} \sqrt{1 + \sin^2 \alpha_y}; \quad (2.35)$$

$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \theta_{\text{cp}}, \quad (2.36)$$

где  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\theta_{\text{cp}}$  – средний угол падения волн диффузного звукового поля на ограждение [46];  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  – углы падения звуковых волн вдоль сторон ограждения  $a$  и  $b$ , соответственно:

$$\alpha_x = \arccos \left( b \sin \frac{\theta_{\text{cp}}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right); \quad (2.37)$$

$$\alpha_y = \arccos \left( a \sin \frac{\theta_{\text{cp}}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right); \quad (2.38)$$

$$Q_{mn} = Q_m Q_n, \quad (2.39)$$

где

$$Q_m = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sin^2 m\pi}{2m\pi} \right); \quad (2.40)$$

$$Q_n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sin^2 n\pi}{2n\pi} \right). \quad (2.41)$$

### 2.2.5 Излучение звука в режиме инерционных колебаний

Рассмотрим излучение звука сэндвич-панелью в инерционном режиме в соответствии с теорией [1]. Звуковое давление, излученное инерционными волнами со стороны изолированного от шума помещения, определится из выражения [46]:

$$P_{2И} = P_{0И} \cos \frac{m_{02}\pi x}{a} \cos \frac{n_{02}\pi x}{b} e^{ik_{02} \cos \theta_2}. \quad (2.42)$$

Здесь

$$P_{0И} = \rho_0 c_0 \frac{\vartheta_{0И} A_{2И}}{\cos \theta_{2И}}, \quad (2.43)$$

где

$$\vartheta_{0И} = \frac{\vartheta_{0m_0 n_0}}{\cos \theta}; \quad (2.44)$$

$$\vartheta_{0m_0 n_0} = i\omega \xi_{0m_0 n_0}, \quad (2.45)$$

где  $P_{0И}$  – амплитудное звуковое давление, излученное инерционными волнами со стороны помещения с источником шума;  $\vartheta_{0m_0 n_0}$  – амплитуда колебательной скорости сэндвич-панели в инерционных волнах;  $A_{2И}$  – характеристика самосогласования волновых полей, определяемая по формуле (2.26).

Звуковая мощность, излучаемая инерционными волнами, определяется по формуле [1]:

$$W_{2И} = \frac{\rho_0 c_0}{8} \frac{\vartheta_{0m_0 n_0}^2}{\cos \theta \cos \theta_{2И}} \frac{A_{2И}^2}{ab}, \quad (2.46)$$

где  $A_{2И} = 1$ , так как инерционные волны являются следами падающих звуковых волн и для них  $m_{И} \equiv m_0$ ,  $n_{И} \equiv n_0$ ;  $\vartheta_{0m_0 n_0}^2$  – амплитуда колебательной скорости ограждения в инерционных волнах, определяемая из выражения:

$$\vartheta_{0m_0 n_0}^2 = F_{И}^2 \frac{P_{0m_0 n_0}^2}{\mu^2 (2f)^2}, \quad (2.47)$$

где  $\mu$ ,  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $F_{\text{и}}$  – функция отклика ограждения;  $P_{0m_0n_0}$  – сумма амплитуд давления падающих, отраженных и прошедших через ограждение звуковых волн.

Из анализа выражения (2.46) следует, что акустическое излучение пластиной в инерционных волнах определяется ее поверхностной плотностью, величиной функции отклика ограждения, углом падения звуковых волн и текущей частотой звука.

Для ограждения конечных размеров функция отклика изменяется в зависимости от соотношения длины проекции падающей звуковой волны и размеров ограждения ( $a$ ,  $b$ ), то есть определяется величиной чисел  $m$ ,  $n$  и  $m_1$ ,  $n_1$  (см. формулу (2.26)).

При нецелочисленных  $m$ ,  $n$  отклик ограждения в инерционных волнах снижается. Особенно значительно это снижение при  $0 < m < 1$ ;  $0 < n < 1$ , что для реальных строительных конструкций соответствует диапазону низких частот. На средних и высоких частотах отклик ограждения стабилизируется и  $F_{\text{и}} \rightarrow 1$ .

### 2.2.6 Коэффициенты инерционного прохождения звука

Коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между ними, определяются по формуле [1]:

$$\tau_{\text{пи}} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu^2 f^2}{F_{\text{и}}^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (2.48)$$

где  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$ ,  $f$ ,  $f_p$  – то же, что в формуле 2.10;  $F_{\text{и}}$  – функция отклика первой облицовки, на которую падет звук.

Определяем коэффициент инерционного прохождения звука по аналогии с коэффициентом резонансного прохождения (см. п. 2.2). Используя формулы (2.8) и (2.46), получаем выражение для коэффициента инерционного прохождения звука для первой и второй облицовки сэндвич-панели [1]:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1и} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu_1^2 f^2 \cos^2 \theta_{cp}}{F_{1и}^2} + 1}, \quad (2.49)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2и} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\rho_0^2 c_0^2} \frac{\mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2и}^2} + 1}, \quad (2.50)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $\rho_0 c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\theta_{cp}$ ,  $\theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12);  $F_{2и}$  – то же, что в формуле (2.48);  $F_{2и}$  – функция отклика второй облицовки.

Из выражений (2.49), (2.50) следует, что звукопроницаемость сэндвич-панели с предельными параметрами определяется ее поверхностной плотностью, размерами, а также углом падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели и текущей частотой звука.

### **2.2.7 Звукоизоляция сэндвич-панели с предельными параметрами с учетом двойственной природы прохождения звука**

В параграфах 2.1 – 2.6 на базе теории самосогласования волновых полей [1] рассмотрены волновые процессы, возникающие в облицовках сэндвич-панели при воздействии на них диффузного звукового поля. При этом отдельно рассмотрено прохождение звука с собственными и инерционными волнами. На данном этапе необходимо исследовать собственную звукоизоляцию сэндвич-панели с учетом двойственной природы прохождения звука.

В соответствии с рассмотренным выше механизмом прохождения звука, в волновом движении ограждения, при воздействии на него звуковых волн, участвуют собственные и инерционные волны. Согласно теории [46] инерционные волны существуют на каждой частоте, а на частотах собственных колебаний ограждения инерционная и свободная волны отличаются начальной фазой движения. Следовательно, можно говорить о независимости этих волн и справедливости принципа суперпозиции [1]:

$$\tau = \tau_{\text{ПИ}} + \tau_{1\text{И}}\tau_{2\text{И}} + \tau_{1\text{С}}\tau_{2\text{С}} + \tau_{\text{ПС}}, \quad (2.51)$$

где  $\tau_{\text{ПИ}}$  – коэффициент инерционного прохождения звука через облицовки с упругой связью между ними;  $\tau_{1\text{И}}$ ,  $\tau_{2\text{И}}$  – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую (на которую падают звуковые волны) и вторую облицовки, соответственно;  $\tau_{\text{ПС}}$  – коэффициент резонансного прохождения звука через облицовки с упругой связью между ними;  $\tau_{1\text{С}}$ ,  $\tau_{2\text{С}}$  – коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно.

Выражение (2.51) отражает двойственную природу прохождения звука – акустическая мощность в изолируемое помещение излучается как свободными упругими, так и инерционными волнами.

Звукоизоляция ограждающей конструкции – это величина, обратно пропорциональная коэффициенту прохождения звука  $\tau$ . Следовательно, выражение для определения звукоизоляции (дБ):

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}. \quad (2.52)$$

Для получения частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панели с предельными параметрами рассмотрим прохождение звука в различных диапазонах частот. Согласно теории самосогласования волновых полей [1], вся частотная шкала делится на пять областей: дорезонансная область, область простых резонансов, область простых пространственных резонансов (ПрПр), неполных пространственных резонансов (НПр) и полных пространственных резонансов (ППР). Для реальных строительных ограждений, имеющих геометрические размеры  $a \times b > 2,5 \times 2,5$  м три первые области находятся в диапазоне низких частот ( $f < 100$  Гц) и не попадают в нормируемый диапазон частот ( $100 \div 3150$  Гц [50]).

Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать звукоизоляцию трехслойных сэндвич-панелей в областях неполных и полных пространственных резонансов.



### 2.2.7.1 Область неполных пространственных резонансов

Область НПР ( $f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$ ) находится в диапазоне частот между граничной частотой НПР и граничной частотой ППР. В данной области частот выполняются условия самосогласования для существования неполных пространственных резонансов:

$$m = m_0, n \neq n_0; \quad (2.53a)$$

$$m \neq m_0, n = n_0, \quad (2.53b)$$

Граничная частота области НПР является наименьшей частотой, для которой выполняются условия (2.53). Ее величину можно определить по формуле [1]:

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta (\sin^2 \alpha_{mn_0} + N^2 \cos^2 \alpha_{mn_0})} \sqrt{\frac{\mu}{D}}, \quad (2.54a)$$

или

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta (M^2 \sin^2 \alpha_{m_0 n} + \cos^2 \alpha_{m_0 n})} \sqrt{\frac{\mu}{D}}, \quad (2.54b)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $\alpha_{mn_0}$ ,  $\alpha_{m_0 n}$  – углы скольжения звуковых волн вдоль сторон ограждения  $a$  и  $b$  при простом пространственном резонансе, соответственно;  $\theta$  – угол падения звуковой волны на ограждение;  $D$  – цилиндрическая жесткость облицовки сэндвич-панели;  $M = \frac{m}{m_0}$ ,

$N = \frac{n}{n_0}$  – коэффициенты самосогласования длин проекций свободных и звуковых полуволн по сторонам  $a$  и  $b$  ограждения, соответственно.

Принимая наименьшие возможные условия падения звуковой волны:  $\theta = \pi/2$ ;  $m_0 = m = 1$  (при  $a \geq b$ ) [1]:

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab} + \Delta f_{\Gamma mn_0}, \quad (2.55)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $\Delta f_{\Gamma mn_0}$  – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний пластины, Гц, определяемая по формуле [1]:

$$\Delta f_{\Gamma mn_0} = \frac{\pi O_{mn}}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \left( n_H + \frac{O_{mn}}{2} \right), \quad (2.56)$$

где  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $D$  – то же, что в формуле (2.54), Па·м<sup>3</sup>;  $O_{mn}$  – нерегулярная ступенчатая функция со значениями от 0 до 1 определяемая по формуле [1]:

$$O_{mn} = n - n_H, \quad (2.57)$$

здесь  $n$  – целое число, ближайшее большее к  $n_H$ :

$$n_H = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{c_0 a \sqrt{a^2 + 4b^2}}{2\pi b} \sqrt{\frac{\mu}{D}} - 1}, \quad (2.58)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $D$  – то же, что в формуле (2.54), Па·м<sup>3</sup>.

В частотном диапазоне НПР характеристика  $A_0$  самосогласования определяется по формуле [1]:

$$A_0^2 = \frac{m_{0max} n^2}{(n^2 - n_{0cp}^2)^2} + \frac{n_{0max} n m^2}{(m^2 - m_{0cp}^2)^2}, \quad (2.59)$$

где

$$m_{0max} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{b^2}}; \quad (2.60)$$

$$n_{0max} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_0^2} - \frac{1}{a^2}}; \quad (2.61)$$

$$n_{0cp}^2 = \frac{n_{0max}}{2}; \quad (2.62)$$

$$m_{0cp}^2 = \frac{m_{0max}}{2}; \quad (2.63)$$

$$n^2 = b^2 \left( \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} f - \frac{m_{0cp}^2}{a^2} \right); \quad (2.64)$$

$$m^2 = a^2 \left( \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} f - \frac{n_{0cp}^2}{b^2} \right). \quad (2.65)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $D$  – то же, что в формуле (2.54), Па·м<sup>3</sup>.

В выражениях (2.59) ÷ (2.65) величины  $m_{0\text{ср}}$ ,  $n_{0\text{ср}}$ ,  $m_{0\text{max}}$ ,  $n_{0\text{max}}$ , являются характеристиками звуковых полей в плоскости ограждающей конструкции, а величины  $m$ ,  $n$  относятся к собственному волновому полю ограждения.

После определения граничной частоты НПР, подставив в формулу (2.51) значения коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука (формулы (2.10, 2.11, 2.12) и (2.48, 2.49, 2.50), соответственно), найдем значения коэффициента излучения звука в НПР. После подстановки полученных значений в формулу (2.52) найдем звукоизоляцию сэндвич-панели с предельными параметрами в данном частотном диапазоне.

### 2.2.7.2. Область полных пространственных резонансов

В области ППР выполняются условия полного самосогласования звуковых полей перед и за ограждением и волнового поля собственных колебаний самого ограждения [47]:

$$m = m_0, \quad n = n_0, \quad (2.66)$$

Наименьшая частота, при которой начинают выполняться условия (2.66) называется граничной частотой области ППР и определяется по формуле [1]:

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{\mu}{D}}, \quad (2.67)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $D$  – то же, что в формуле (2.54), Па·м<sup>3</sup>;  $\theta$  – то же, что в формуле (2.54).

Принимая наиболее неблагоприятные условия падения звуковой волны  $\theta = \pi/2$  [1] получим:

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{D}} + \Delta f_{\Gamma mn}, \quad (2.68)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $D$  – то же, что в формуле (2.54), Па·м<sup>3</sup>;  $\Delta f_{\Gamma mn}$  – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний ограждения, Гц.

Первое слагаемое в формуле (2.66) является известным выражением граничной частоты волнового совпадения  $f_{\Gamma}$  [71].

После определения граничной частоты ППР, подставив в формулу (2.51) значения коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука (формулы (2.10, 2.15, 2.16) и (2.48, 2.49, 2.50), соответственно), найдем значения коэффициента излучения звука в ППР. После подстановки полученных значений в формулу (2.52) найдем звукоизоляцию сэндвич-панели с предельными параметрами в данном частотном диапазоне.

Таким образом, на базе теории самосогласования волновых полей проведено теоретическое исследование звукоизоляции сэндвич-панелей с предельными параметрами.

### 2.3 Предельная звукоизоляция сэндвич-панелей

Анализируя выражения для определения звукоизоляции (2.51), (2.52) можно видеть, что она определяется соотношением резонансного и инерционного вкладов в прохождение звука.

Согласно теории самосогласования волновых полей [1] ограждение имеет максимально возможную (предельную) звукоизоляцию, когда основной вклад в излучение звука ограждением вносят инерционные волны, т. е. когда выполняется следующее условие:

$$\tau_{\text{и}} > \tau_{\text{с}}, \quad (2.69)$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – коэффициент инерционного прохождения звука;  $\tau_{\text{с}}$  – коэффициент резонансного прохождения звука.

Предельной звукоизоляцией для сэндвич-панелей будем считать звукоизоляцию в режиме только инерционных колебаний ( $\tau_{\text{с}} = 0$ ).

Для сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением резонансная частота системы «масса – упругость – масса» находится за пределами нормируемого диапазона частот, поэтому коэффициент инерционного

прохождения звука через облицовки с упругой связью между ними примем равным 0 ( $\tau_{\text{ПИ}} = 0$ ).

Таким образом, по формуле (2.4) коэффициент прохождения звука, соответствующий предельной звукоизоляции сэндвич-панели:

$$\tau_{\text{пред}} = \tau_{1\text{И}} \tau_{2\text{И}}, \quad (2.70)$$

где  $\tau_{1\text{И}}$ ,  $\tau_{2\text{И}}$  – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую (на которую падают звуковые волны) и вторую облицовки, соответственно.

Подставляем постоянные величины в выражения (2.47) и (2.48) и после алгебраических преобразований выражения коэффициентов инерционного прохождения принимают следующий вид:

- для первой облицовки:

$$\tau_{1\text{И}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1\text{И}}^2} + 1}, \quad (2.71)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2\text{И}} = \frac{1}{\frac{6 \cdot 10^{-5} \mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2\text{И}}^2} + 1}, \quad (2.72)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $\mu, f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12);  $F_{1\text{И}}$  – то же, что в формуле (2.48);  $F_{2\text{И}}$  – то же, что в формуле (2.50).

Таким образом, коэффициент прохождения звука, соответствующий предельной звукоизоляции сэндвич-панели определится из выражения:

$$\tau_{\text{пред}} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1\text{И}}^2} + 1} \cdot \frac{1}{\frac{6 \cdot 10^{-5} \mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2\text{И}}^2} + 1}. \quad (2.73)$$

Подставляя коэффициент прохождения звука в выражение (2.52), получим формулу для определения предельной звукоизоляции сэндвич-панели:

$$R_{\text{пред}} = 10 \log \left( \left[ \frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1\text{И}}^2} + 1 \right] \left[ \frac{6 \cdot 10^{-5} \mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{F_{2\text{И}}^2} + 1 \right] \right), \quad (2.74)$$

В рассматриваемом случае излучение звука в изолируемое помещение происходит только с инерционными волнами ( $\tau_{\text{с}} = 0$ ). Следовательно, звукоизоляция ограждения определяется только массой ограждающей

конструкции, углом падения звука на вторую облицовку сэндвич-панели, величинами функции отклика первой и второй облицовок и текущей частотой звука и не зависит от самосогласования волновых полей и от коэффициента потерь материала облицовок.

На рисунке 2.4 приведена частотная характеристика коэффициента прохождения звука, соответствующего предельной звукоизоляции сэндвич-панели с внешними облицовками из ЦСП и средним слоем из пенопласта.

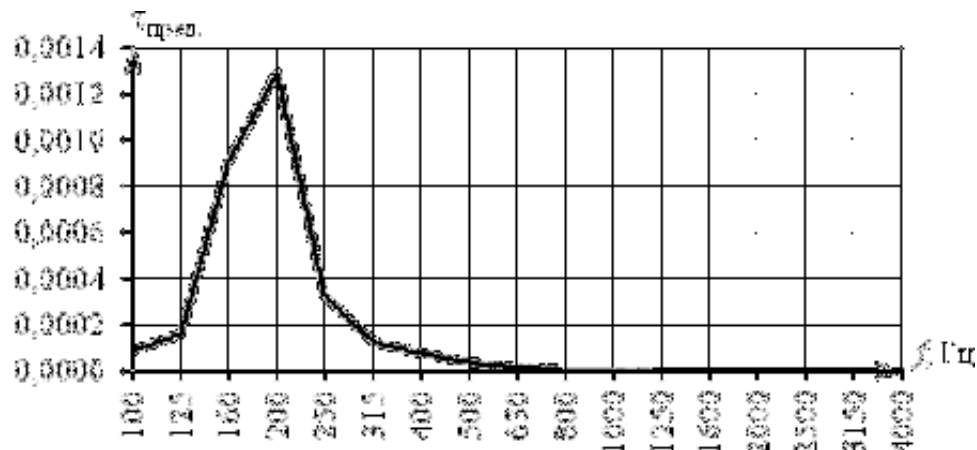


Рисунок 2.4 – Частотная характеристика коэффициента прохождения звука, соответствующего предельной звукоизоляции сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ЦСП толщиной по 10,0 мм (плотность 1250 кг/м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6$  Па) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм

Таким образом, формула (2.73) является выражением предельной звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров. Значения звукоизоляции сэндвич-панели с заданными поверхностной плотностью и геометрическими размерами, рассчитанные по формуле (2.73), не могут быть превышены.

На рисунке 2.5 приведены частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панели в сравнении с кривой её предельной звукоизоляции. Можно видеть, значения предельной звукоизоляции изменяются в соответствии с изменением значений функции отклика. Для иллюстрации этого явления на рисунке 2.6 приведены частотные характеристики функции отклика для первой и второй облицовок сэндвич-панели, определенные в соответствии с выражением (2.27).

При этом график функции отклика отличается для первой и второй облицовок сэндвич-панели, т.к. звук падает на вторую облицовку под углом  $\theta_2$  (см. пункт 2.2).

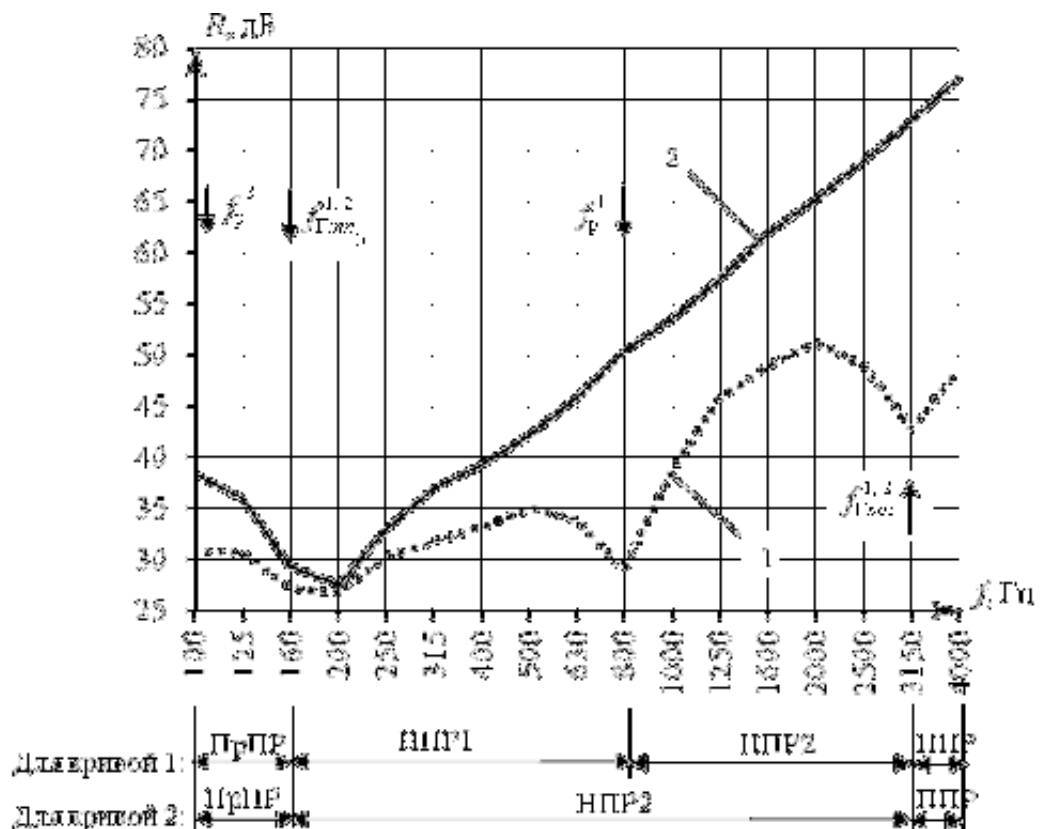


Рисунок 2.5 – Предельная звукоизоляция сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ЦСП толщиной 12,5 мм (плотность 1250 кг/м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,8 \cdot 10^9$  Па) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – экспериментально полученная частотная характеристика звукоизоляции; 2 – предельная звукоизоляция

Из анализа рисунков 2.5 и 2.6 следует, что излучение звука инерционными волнами значительно уменьшается на низких частотах, где  $0 < m < 1$  (см. формулу (2.27)), т. е. при  $f < f_{\text{ги}}$ , где  $f_{\text{ги}}$  – граничная частота инерционного прохождения звука, определяемая из следующего выражения [1]:

$$f_{\text{ги}} = \frac{c_0 \sqrt{a^2 + 4b^2}}{4ab \sin \theta}. \quad (2.75)$$

где  $c_0$  – то же, что в формуле (2.7);  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $\theta$  – угол падения звука на облицовку, град (для первой облицовки  $\theta = \theta_{\text{ср.}} = 51,76^\circ$  – средний угол падения волн диффузного звукового поля на первую облицовку; угол падения

звуковых волн из объема, занимаемого средним слоем, на вторую облицовку ( $\theta_2$ ) определится по формуле (2.13).

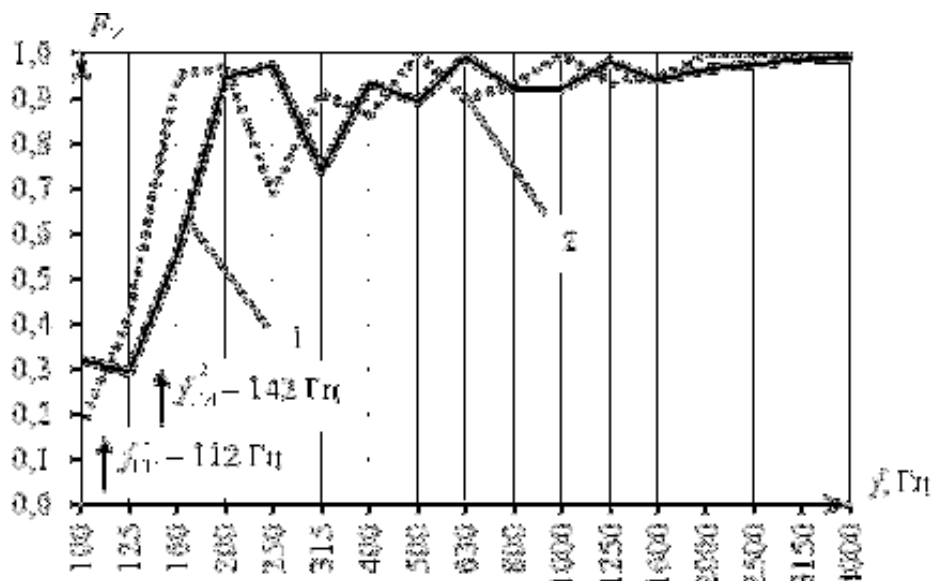


Рисунок 2.6 – Частотные характеристики функции отклика для облицовок сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ЦСП толщиной 12,5 мм (плотность 1250 кг/м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,8 \cdot 10^9$  Па) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – первая облицовка; 2 – вторая облицовка

Расположение области пониженного инерционного прохождения звука зависит от размеров ограждающей конструкции в плане  $a$  и  $b$ . При увеличении размеров панели данная область смещается на более низкие частоты. Для ограждения бесконечных размеров  $a \rightarrow \infty$ ,  $b \rightarrow \infty$  повышения звукоизоляции не будет, т. к.  $F_{\text{н}} \rightarrow \infty$  во всем диапазоне частот.

## 2.4 Звукоизоляция сэндвич-панелей с жесткой склейкой слоев

Рассмотрим сэндвич-панель с жесткой склейкой облицовок и среднего слоя. Отличие от рассчитанной выше сэндвич-панели с предельными параметрами состоит в том, что скорость распространения упругих волн изменяет своё значение за счет наличия в среднем слое сэндвич-панели сдвиговых деформаций.



### 2.4.1. Характеристики свободных упругих волн, распространяющихся вдоль сэндвич-панели

В процессе вывода дифференциальных уравнений свободных колебаний трёхслойной сэндвич-панели с жестким, легким, пористым средним слоем и жестким склеиванием слоев использованы общепринятые гипотезы [25]:

- материал всех трех слоев несжимаем в поперечном направлении;
- в процессе деформации трехслойной сэндвич-панели поперечные сечения среднего слоя, перпендикулярные к ее продольной оси, поворачиваются как жесткое целое на некоторый угол  $\gamma$  – в одной плоскости, и на угол  $\beta$  – в другой плоскости (гипотеза прямых сечений);
- материал облицовок предполагается абсолютно жестким на сдвиг;
- проскальзывание слоев ограждения относительно друг друга отсутствует.

Используя основные положения теории слоистых плит [20] с присоединением к получаемым усилиям и моментам силы инерции по Даламберу, можно получить дифференциальные уравнения [25]:

$$\left. \begin{aligned} F \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + \frac{T}{h^3} \frac{\partial^3 a}{\partial x^3} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= 0; \\ h_3 L \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + \frac{T}{h^3} \frac{\partial^2 a^2}{\partial x^2} + S \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{aS}{h_3} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.76)$$

где

$$\left. \begin{aligned} F &= D_1 + D_2 - F_1 - F_2; \\ T &= F_1 + F_2 + D_3; \\ L &= A_1 + A_2 - B_1 - B_2; \\ N &= D_3 + h_3 (B_1 + B_2), \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

где

$$A_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left[ \frac{h_1}{2} + h_3 \right]; \quad (2.78)$$

$$A_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{h_2}{2} + h_3 \right]; \quad (2.79)$$

$$B_1 = \frac{E_1 h_1 h_3}{1 - \nu_1^2}; \quad (2.80)$$

$$B_2 = \frac{E_2 h_2 h_3}{1 - \nu_2^2}; \quad (2.81)$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left[ \frac{h_1^2}{12} + \left( h_3 + \frac{h_1}{2} \right)^2 \right]; \quad (2.82)$$

$$D_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{h_2^2}{12} + \left( h_3 + \frac{h_2}{2} \right)^2 \right]; \quad (2.83)$$

$$D_3 = \frac{E_3}{1 - \nu_3^2} \frac{2h_3^2}{3}; \quad (2.84)$$

$$F_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left( \frac{h_3 h_1}{2} + h_3^2 \right); \quad (2.85)$$

$$F_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left( \frac{h_3 h_2}{2} + h_3^2 \right); \quad (2.86)$$

$$S = 2Gh_3, \quad (2.87)$$

где  $S$  – жесткость среднего слоя при сдвиге, Па·м;  $G$  – модуль поперечного сдвига среднего слоя сэндвич-панели, Па;  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициент Пуассона первой (на которую падает звук) и второй облицовок сэндвич-панели соответственно;  $\nu_3$  – коэффициент Пуассона среднего слоя сэндвич-панели;  $h_1, h_2$  – толщины первой и второй облицовок сэндвич-панели, соответственно, м;  $2h_3$  – толщина среднего слоя сэндвич панели, м (см. рисунок 2.1 а).

Решением уравнения (2.76) будут выражения [25]:

$$W = W_0 e^{i(\omega t + kx)}, \quad (2.88)$$

$$a = a_0 e^{i(\omega t + kx)}, \quad (2.89)$$

Подставив соотношения (2.88) и (2.89) в уравнения (2.76), получим [25]:

$$(FN - TLh_3)\omega^4 + [(F + T)S - \mu N c_{и}^2]c_{и}^2\omega^2 - \mu\omega^2 S = 0, \quad (2.90)$$

где  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $c_{и}$  – скорость распространения бегущей волны;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, Гц;  $h_3$  – половина толщины среднего слоя сэндвич панели, м;  $S$  – то же, что в формуле (2.87).

Обозначим [25]

$$c_1 = \sqrt{\omega^4 \sqrt{\frac{F - \frac{TLh_3}{N}}{\mu}}}; \quad (2.91)$$

$$c_2 = \sqrt{\omega^4 \sqrt{\frac{F+T}{\mu}}}; \quad c_3 = \sqrt{\omega^4 \sqrt{\frac{N}{\mu}}}; \quad (2.92)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{S}{\mu}}, \quad (2.93)$$

где  $\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $\omega$  – круговая частота, Гц;  $h_3$  – половина толщины среднего слоя сэндвич панели, м;  $c_1$  – скорость изгибных волн однослойной пластины с цилиндрической жесткостью  $F - TLh_3/N$ ;  $c_2$  – скорость изгибных волн однослойной пластины с цилиндрической жесткостью  $F + T$ ;  $c_3$  – скорость изгибных волн однослойной пластины с цилиндрической жесткостью  $N$ ;  $c_s$  – скорость изгибных колебаний среднего слоя, нагруженного массами облицовок сэндвич-панели.

Подставляя выражения (2.91), (2.92) и (2.93) в уравнение (2.90), получим следующее выражение [25]:

$$c_{II}^6 c_s^2 + c_{II}^4 c_3^4 - c_{II}^2 c_2^4 c_s^2 - c_1^4 c_3^4 = 0. \quad (2.94)$$

В нашем случае, при  $h_1 = h_2 \ll h_3$ , скорости  $c_2$  и  $c_3$  равны между собой.

Анализ уравнения (2.94) показывает, что частотный диапазон можно разделить на три области [55]:

- на низких частотах, когда  $c_1 \ll c_s$ , пренебрегая вторым и последним членами уравнения, будем иметь  $c_{II} \approx c_3$ , т.е. в данной области частот в сэндвич-панели образуются изгибные волны, и она колеблется как пластина с поверхностной плотностью  $\mu$  и цилиндрической жесткостью  $N$ ;

- на высоких частотах  $c_1 \gg c_s$ , пренебрегая первым и третьим членами, имеем  $c_{II} \approx c_1$ . Колебания сэндвич-панели в данном случае в основном определяются изгибными колебаниями облицовок, нагруженных массой среднего слоя;

- в промежуточном диапазоне частот от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , где  $c_s \approx c_{II}$  преимущественное значение будут иметь сдвиговые колебания среднего слоя сэндвич-панели. В случае жесткого, легкого среднего слоя сдвиговые деформации играют существенную роль в формировании скорости упругих волн.

Граничные частоты изменения характера скоростей могут быть определены по формулам [25]:

$$\omega_1 = \frac{S}{\sqrt{\mu N}}; \quad (2.95)$$

$$\omega_2 = \frac{S}{\sqrt{\mu \left( F - \frac{TLh_3}{N} \right)}}, \quad (2.96)$$

$\mu$  – то же, что в формуле (2.10);  $S$  – то же, что в формуле (2.87);

На рисунках 2.7 и 2.8 приведены дисперсионные кривые скоростей изгибных и сдвиговых волн в сэндвич-панелях из различных материалов, полученные по представленной методике.

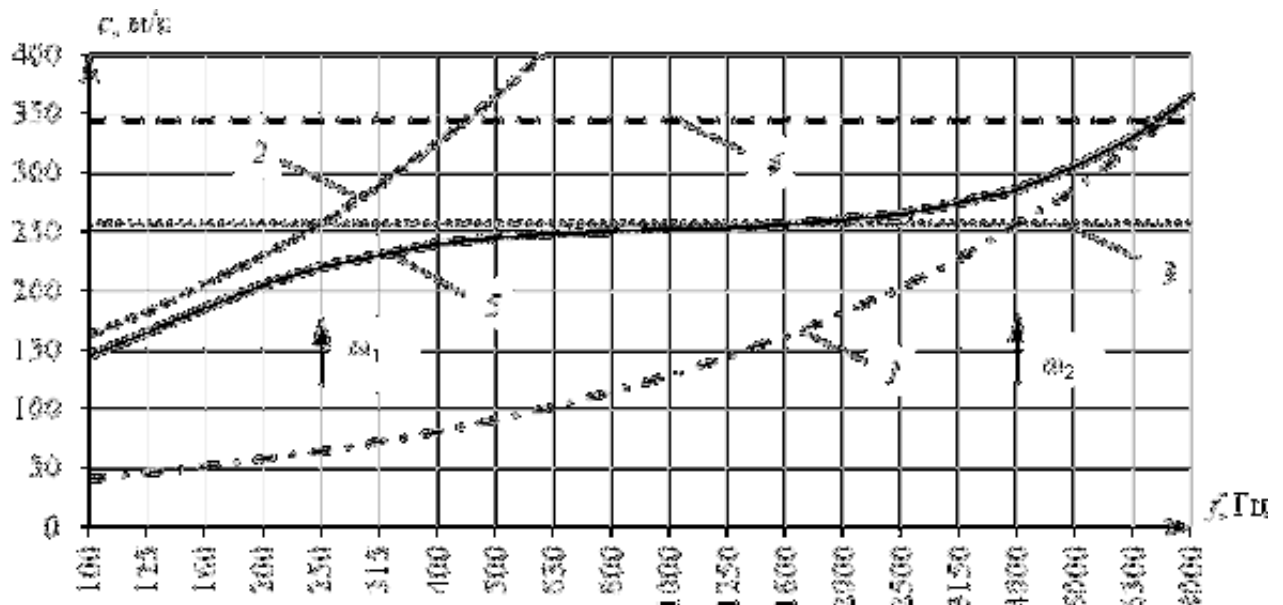


Рисунок 2.7 – Дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними листовыми облицовками из ГФЛ, толщиной по 6 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 –  $c_1$ ; 2 –  $c_2$ ; 3 –  $c_s$ ; 4 –  $c_0$ ; 5 –  $c_{II}$

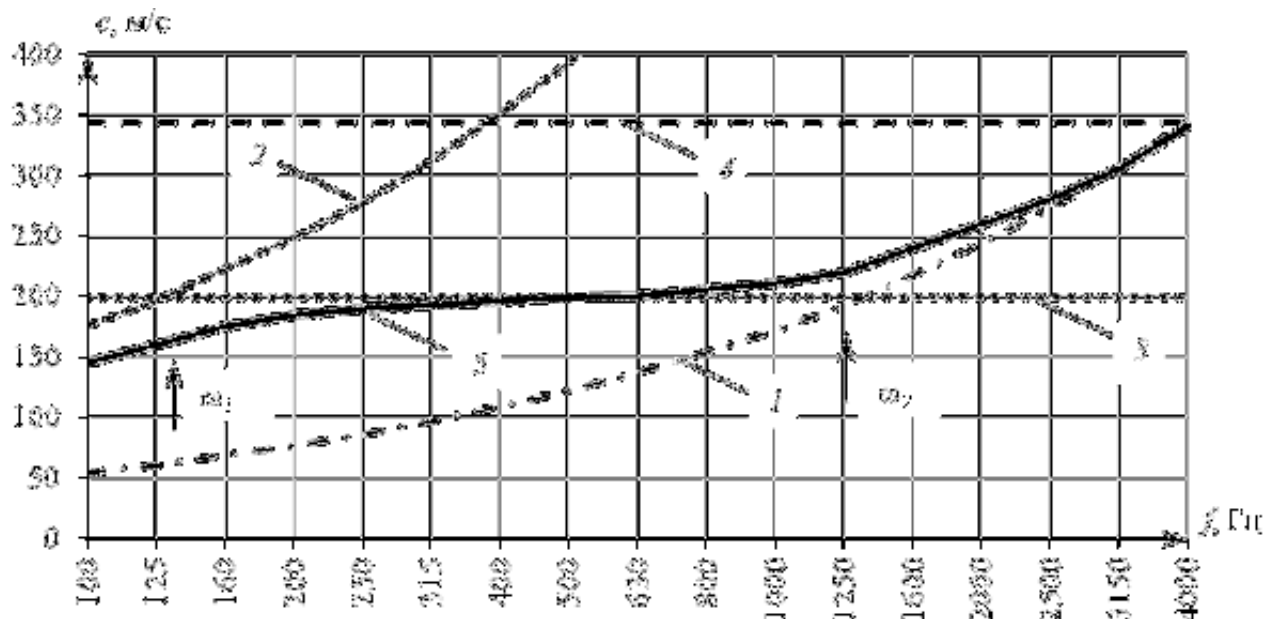


Рисунок 2.8 – Дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели с внешними листовыми облицовками из ЦСП, толщиной по 10 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм (размер 2,0 м × 1,2 м): 1 –  $c_1$ ; 2 –  $c_2$ ; 3 –  $c_3$ ; 4 –  $c_0$ ; 5 –  $c_{\text{н}}$

Анализируя рисунки 2.7 и 2.8, можно заключить, что легкий жесткий пористый заполнитель с малым коэффициентом потерь изменяет характер скорости распространения упругих волн вдоль пластины принципиально так же, как и вибродемпфирующий промежуточный слой в слоистых панелях [7], [26], [30].

Из анализа дисперсионных кривых скоростей изгибных и сдвиговых волн, полученных при решении уравнения (2.90) (рисунки 2.7, 2.8), видно, что на низких частотах ( $f < \omega_1$ ) скорости  $c_{\text{н}}$  приближаются к кривой  $c_3$ , на высоких ( $f > \omega_2$ ) частотах – к кривой  $c_1$ . В промежуточной области частот ( $\omega_1 < f < \omega_2$ ), вследствие влияния волн сдвига среднего слоя сэндвич-панели, кривая  $c_{\text{н}}$  приближается к горизонтальной линии.

В трехслойных сэндвич-панелях с легким, жестким пористым средним слоем сдвиговые деформации дают существенный вклад в суммарное волновое движение ограждения в широкой области частот от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , находящейся для исследуемых панелей в диапазоне средних частот.

## 2.4.2 Расчет звукоизоляции сэндвич-панели с жестким соединением слоёв

Учитывая резонансное и инерционное прохождение звука, звукоизоляцию сэндвич-панели конечных размеров с жесткой склейкой слоев по всей плоскости можно определить по методике, изложенной в п. 2.2.

Значение резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ) сэндвич-панели следует рассчитывать по формуле (2.2).

Граничные частоты областей прохождения звука НПР и ППР определяются по формулам (2.55), (2.68)

Подставляя постоянные величины в выражение (2.10), получим формулу для определения коэффициента резонансного прохождения звука через сэндвич-панель как всю конструктивную систему в целом:

$$\tau_{\text{ПС}} = \frac{1}{\frac{6,8}{c_{\text{И}}^2} \frac{\mu^2 f^2}{A^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (2.97)$$

где  $f_p$ ;  $\mu$ ;  $A$ ;  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $c_{\text{И}}$  – то же, что в формуле (2.90).

Характеристику самосогласования  $A_0$ , учитывая изменение скорости изгибных колебаний вследствие наличия среднего слоя, определяем по формуле (2.59) с помощью соотношений [1]:

$$m_{0\text{max}} = a \sqrt{\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{1}{b^2}}, \quad (2.98)$$

$$n_{0\text{max}} = b \sqrt{\frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{1}{a^2}}, \quad (2.99)$$

$$m^2 = a^2 \left( \frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{n_{0\text{cp}}^2}{b^2} \right), \quad (2.100)$$

$$n^2 = b^2 \left( \frac{4f^2}{c_{\text{И}}^2} - \frac{m_{0\text{cp}}^2}{a^2} \right). \quad (2.101)$$

где  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $a$ ,  $b$  – то же, что в формуле (2.9);  $n_{0\text{cp}}$ ,  $m_{0\text{cp}}$  – определяются по формулам (2.62), (2.63), соответственно;  $c_{\text{И}}$  – то же, что в формуле (2.90).

При резонансном прохождении звука в частотной области НПР ( $f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$ ) коэффициенты прохождения звука для первой и второй облицовок получим, подставляя постоянные величины в формулы (2.11) и (2.12):

- для первой облицовки:

$$\tau_{1c} = \frac{1}{\frac{10^{-5}}{A_{01}^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 + 1}, \quad (2.102)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2c} = \frac{1}{\frac{3,1}{c_{и}^2 A_{02}^4} \mu_2^2 f^2 \eta_2 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (2.103)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $A, f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\eta_1; \eta_2; \theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12);  $c_{и}$  – то же, что в формуле (2.90).

При резонансном прохождении звука в области частот выше граничной частоты ППР ( $f > f_{\Gamma mn}$ ), для первой и второй облицовок получим, подставляя постоянные величины в формулы (2.15) и (2.16):

- для первой облицовки:

$$\tau_{1c} = \frac{1}{9,1 \cdot 10^{-5} \cdot \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_1 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (2.104)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2c} = \frac{1}{\frac{10,7}{c_{и}^2} \mu_2^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_2 \cos \theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (2.105)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\eta_1, \eta_2, \theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12);  $f_{\Gamma mn}$  – то же, что в формулах (2.15) и (2.16);  $c_{и}$  – то же, что в формуле (2.90).

Коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки сэндвич-панели с упругой связью между собой определяем, подставляя постоянные величины в формулу (2.48):

$$\tau_{пи} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu^2 f^2}{c_{и} F_{и}^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (2.106)$$

где  $\mu, f, f_p$ , – то же, что в формуле 2.10;  $F_{1и}$  – то же, что в формуле 2.48;  $c_{и}$  – то же, что в формуле (2.90).

При инерционном прохождении звука коэффициенты прохождения для первой и второй облицовок сэндвич-панели получим, подставляя постоянные величины в формулы (2.49) и (2.50):

- для первой облицовки:

$$\tau_{1и} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1и}^2} + 1}, \quad (2.107)$$

- для второй облицовки:

$$\tau_{2и} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{c_{и} F_{2и}^2} + 1}, \quad (2.108)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – то же, что в формуле (2.1);  $f$  – то же, что в формуле (2.10);  $\theta_2$  – то же, что в формулах (2.11) и (2.12);  $F_{1и}$  – то же, что в формуле (2.48);  $F_{2и}$  – то же, что в формуле 2.50;  $c_{и}$  – то же, что в формуле (2.90).

Подставив в формулу (2.51) значения коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука в областях НПР (формулы (2.98), (2.102), (2.103) и (2.106), (2.107), (2.108)) и ППР (формулы (2.97), (2.104), (2.105) и (2.106), (2.107), (2.108)) найдем значения коэффициента излучения звука в данных частотных диапазонах. Подставив полученные значения в формулу (2.52), определим звукоизоляцию сэндвич-панели в рассматриваемом диапазоне частот.

На рисунках 2.9 – 2.11 приведены частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким соединением слоев из различных материалов, полученные по представленной методике расчета.



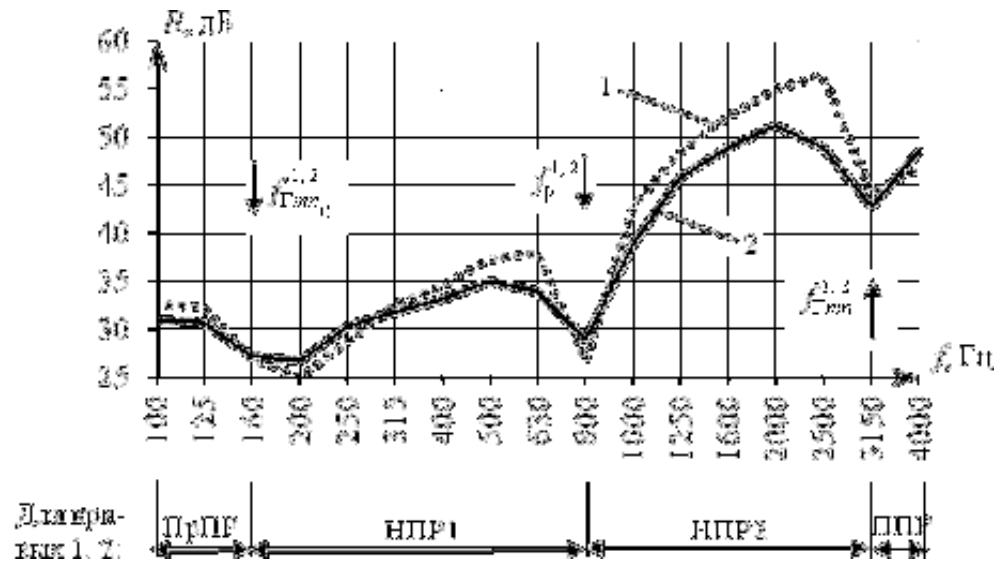


Рисунок 2.9 – Сравнение теоретически и экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ЦСП толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет

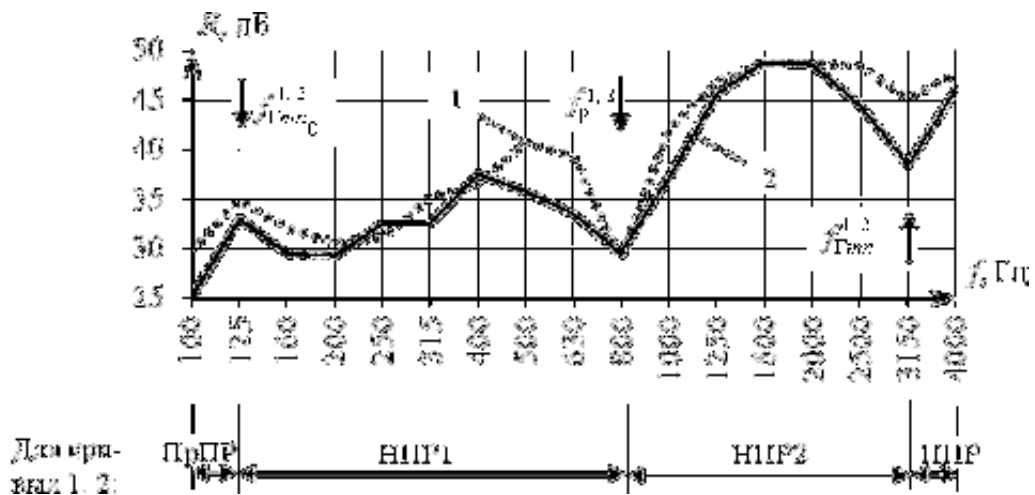


Рисунок 2.10 – Сравнение теоретически и экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм (плотность 1150 кг/м<sup>3</sup>,  $E_d = 2,95 \cdot 10^6$  Па, размерами 2,0 м × 1,2 м) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет

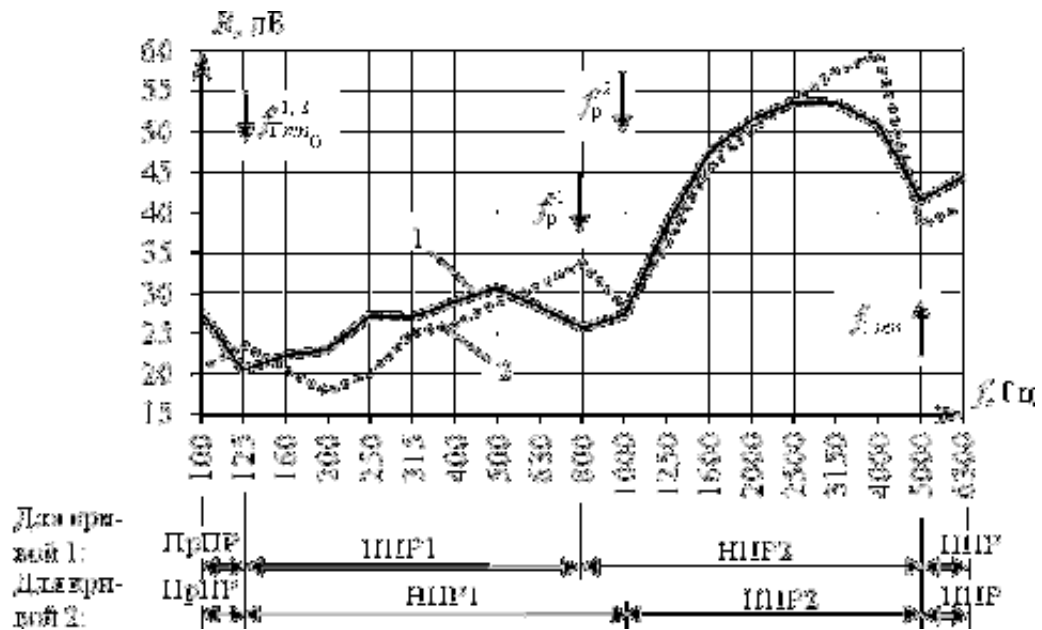


Рисунок 2.11 – Сравнение теоретически и экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели (слои жестко склеены, размер 2,0 м × 1,2 м) с внешними облицовками из ГФЛ толщиной по 6 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм: 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет

Анализируя рисунки 2.9 ÷ 2.11, можно видеть, что представленная методика позволяет проводить теоретический расчет звукоизоляции сэндвич-панелей со сплошной склейкой слоев. При этом наблюдается совпадение характера частотных характеристик и положения граничной частоты области ППР ( $f_{gm}$ ) и резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ) для теоретически и экспериментально полученных результатов.

## Выводы по главе 2

На основании материала, изложенного в главе 2, можно сделать следующие выводы:

1. На основе метода расчета звукоизоляции двустенных ограждений с воздушным промежутком по теории самосогласования волновых полей разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким средним слоем.

2. Определено, что сэндвич-панели конечных размеров обладают резервами повышения звукоизоляции, которые определяются соотношением резонансного и инерционного прохождения звука.
3. Получено новое аналитическое выражение для определения угла падения звуковой волны из объема среднего слоя на вторую облицовку сэндвич-панели, учитывающее соотношение геометрических размеров ограждений.
4. Для удобства анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований введена разбивка частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панелей в области неполных пространственных резонансов на две подобласти: НПР1:  $(f_{\Gamma_{mn_0}} < f < f_p)$  и НПР2:  $(f_p < f < f_{\Gamma_{mn}})$ .
5. Проанализированы аналитические выражения для расчета звукоизоляции трехслойных сэндвич-панелей, которые учитывают ширину воздушного промежутка между облицовками, их поверхностную плотность, геометрические размеры, коэффициент потерь материала облицовок и частоту звука. При этом отдельно рассмотрена звукоизоляция ограждения в областях неполных и полных пространственных резонансов.
6. Впервые получены аналитические зависимости для определения предельной звукоизоляции сэндвич-панелей, определяемой инерционным прохождением звука, с учетом геометрических и физико-механических параметров.

### **ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИЕЙ**

На основании методики расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким средним слоем, приведенной в главе 2, и полученных аналитических зависимостей для определения их предельной звукоизоляции, в данной главе определены резервы повышения звукоизоляции ограждающих конструкций данного типа. Рассмотрены способы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей за счет использования внутренних резервов, без значительного увеличения их массы резервов. Даны рекомендации для проектирования конструктивных решений сэндвич-панелей с высокими звукоизолирующими свойствами и метод расчета их звукоизоляции.

#### **3.1 Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей**

Сэндвич-панели конечных размеров во всех частотных диапазонах обладают предельными значениями звукоизоляции, которые определяются инерционным прохождением звука (см. пункт 2.3). Собственная звукоизоляция реального ограждения всегда меньше своих предельных значений из-за наличия резонансной составляющей прохождения звука.

Из этого следует, что ограждающие конструкции зданий и сооружений обладают резервами повышения звукоизоляции, которые можно определить как разницу между ее предельными значениями и собственной звукоизоляцией ограждения. Резервы повышения звукоизоляции реальных ограждений, применяемых в строительстве, характеризуются величиной  $\Delta r$ , (дБ) [2], [6]:

$$\Delta r = R_{\text{ПРЕД}} - R, \quad (3.1)$$

где  $\Delta r$  – величина резонансных отклонений, которая показывает, на сколько снижается звукоизоляция ограждения относительно своих предельных значений за

счет резонансного прохождения звука, дБ;  $R_{\text{ПРЕД}}$  – предельная звукоизоляция ограждения, определяемая для сэндвич-панелей по формуле (2.74);  $R$  – собственная звукоизоляция ограждения, определяемая по формуле (2.52).

Величина  $\Delta r$  определяется во всем рассматриваемом диапазоне частот и зависит от соотношения резонансного и инерционного прохождения звука через сэндвич-панель.

Рассмотрим резервы повышения звукоизоляции реальных сэндвич-панелей, выделив три типа таких ограждений:

- тип №1: сэндвич-панель толщиной 62 мм ( $\mu = 15 \text{ кг/м}^2$ ) (облицовки из ГФЛ толщиной 6 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50мм, слои склеены по плоскости);
- тип №2: сэндвич-панель толщиной 75 мм ( $\mu = 28 \text{ кг/м}^2$ ) (облицовки из ГВЛ толщиной 12,5 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм, слои склеены по плоскости);
- тип №3: сэндвич-панель толщиной 125 мм ( $\mu = 35 \text{ кг/м}^2$ ) (облицовки из ЦСП толщиной 12,5мм и средний слой из пенопласта толщиной 100 мм, слои склеены по плоскости).

На рисунках 3.1, 3.2 и 3.3 приведены частотные характеристики звукоизоляции вышеуказанных типов сэндвич-панелей, рассчитанные по методике, описанной в п. 2.4.2, в сравнении с их предельной звукоизоляцией, рассчитанной по формуле (2.74). Можно видеть, что для трех типов сэндвич-панелей резервы повышения звукоизоляции (области, выделенные заливкой) имеют качественные и количественные различия.

Для сэндвич-панели типа №1 с легкими внешними облицовками из ГФЛ резервы повышения звукоизоляции наименьшие из рассматриваемых типов сэндвич-панелей и находятся в области частот  $630 \div 1600$  Гц. Для сэндвич-панели типа №2 с облицовками из ГВЛ резервы повышения звукоизоляции находятся в областях средних и высоких частот, начиная с частоты 200 Гц. У ограждения типа №3 с толстым средним слоем и облицовками из ЦСП резервы повышения звукоизоляции находятся в области средних частот ( $200 \div 800$  Гц), а также в диапазоне высоких частот, начиная с частоты 1600 Гц.

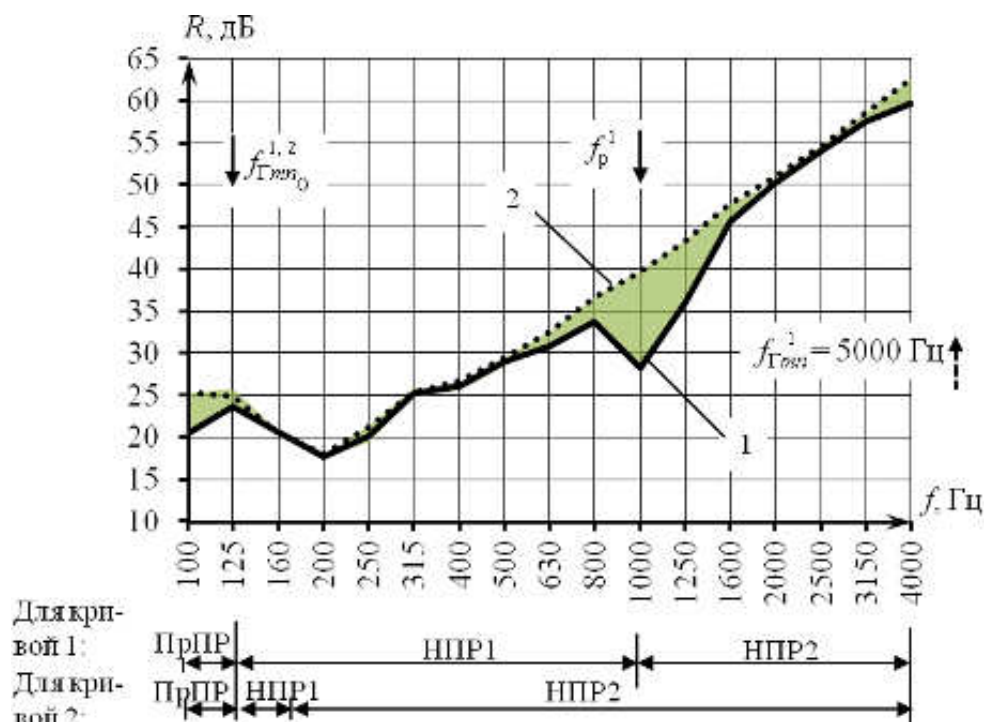


Рисунок 3.1 – Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панели, тип №1:

1 – теоретический расчет звукоизоляции; 2 – предельная звукоизоляция

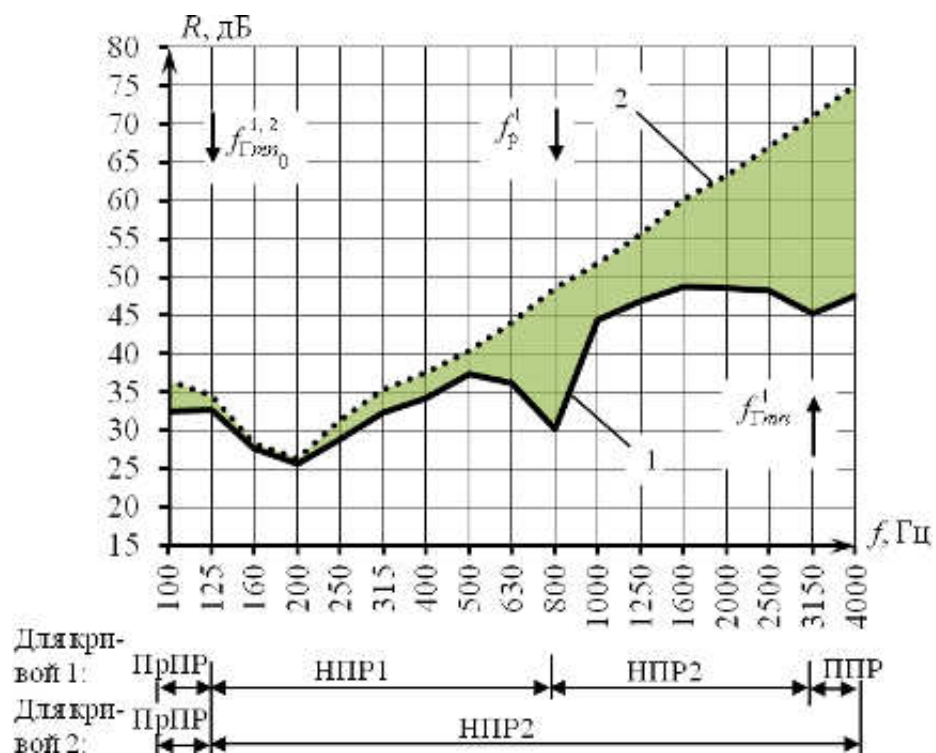


Рисунок 3.2 – Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панели, тип №2:

1 – теоретический расчет звукоизоляции; 2 – предельная звукоизоляция

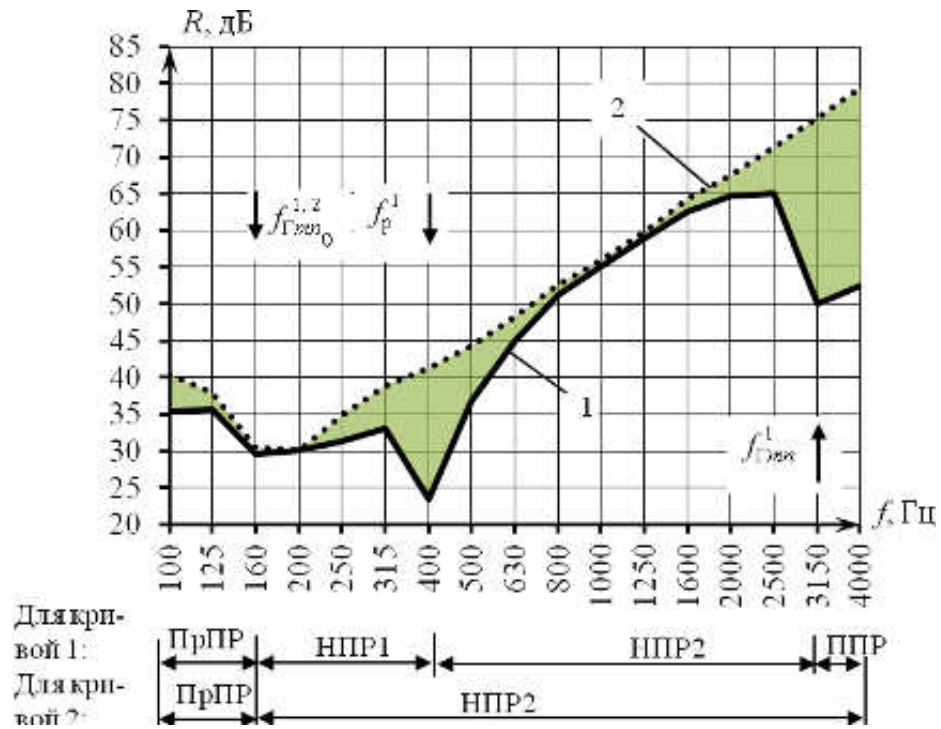


Рисунок 3.3 – Резервы звукоизоляции сэндвич-панели тип №3: 1 – теоретический расчет звукоизоляции; 2 – предельная звукоизоляция

На рисунке 3.4 представлены частотные зависимости резонансных отклонений для трех рассмотренных типов сэндвич-панелей (см. выражение (3.1)), которые характеризуют резервы повышения звукоизоляции данных ограждающих конструкций.

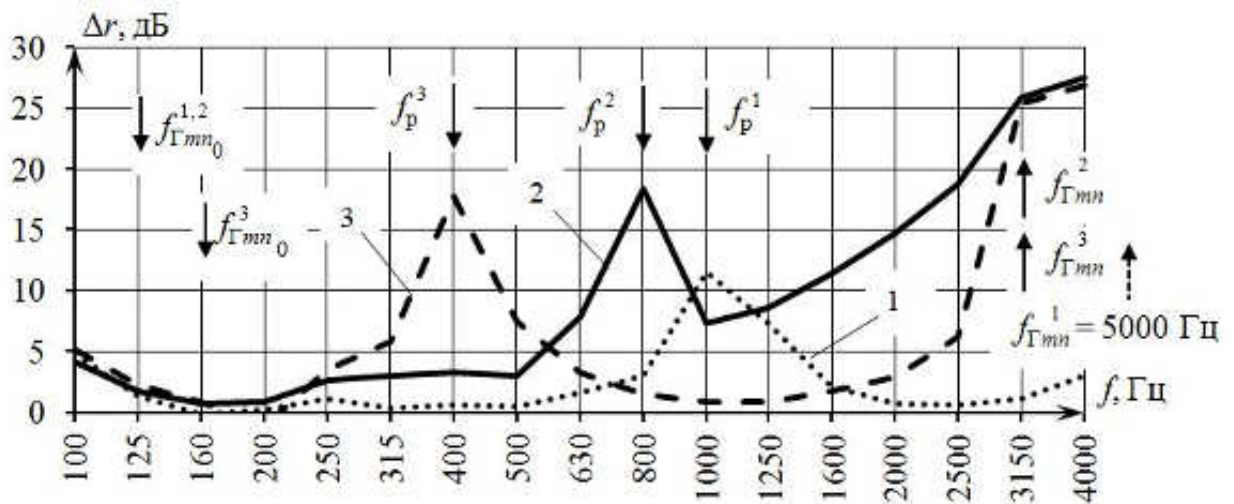


Рисунок 3.4 – Частотные характеристики резонансных отклонений: 1 – сэндвич-панель, тип №1; 2 – сэндвич-панель, тип №2; 3 – сэндвич-панель, тип №3

Анализируя рисунок 3.4, можно видеть, что для сэндвич-панелей существуют две области, где наблюдаются наибольшие резонансные отклонения и,

соответственно, области наибольших резервов повышения звукоизоляции. Первая из них расположена в диапазоне средних частот, вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ), вторая область расположена в диапазоне высоких частот вблизи граничной частоты ППР ( $f_{mn}$ ). В данных областях частот происходит наибольшее снижение звукоизоляции ограждений вследствие резонансного прохождения звука.

Из вышеприведенных исследований следует, что резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей определяются следующими параметрами:

1) соотношение поверхностной плотности и цилиндрической жесткости внешних облицовок ( $\mu/D$ ) определяет резервы повышения звукоизоляции вблизи граничной частоты ППР ( $f_{mn}$ ). При этом для рассматриваемых ограждений область с преобладающим влиянием резонансного прохождения звука ( $\tau_c > \tau_{и}$ ) расположена на высоких частотах, а при значительном увеличении  $\mu/D$  (сэндвич-панели с тонкими облицовками, см. рисунок 3.1), данная область смещается в диапазон более высоких частот, выходя за пределы нормируемого диапазона.

2) резервы повышения звукоизоляции вблизи граничной частоты ( $f_p$ ) определяются соотношением поверхностных плотностей облицовок, толщины и динамического модуля упругости среднего слоя, жесткостью сэндвич-панели.

Кроме того, на величину резонансных отклонений  $\Delta r$  и их частотную характеристику оказывают влияние и другие параметры сэндвич-панели (геометрические размеры, коэффициент потерь облицовок и среднего слоя и др.), которые входят в выражения для определения коэффициентов прохождения звука  $\tau_c$  и  $\tau_{и}$  (см. формулы (2.97), (2.102), (2.103), (2.104), (2.105) и (2.106), (2.107), (2.108) соответственно).

### **3.2. Способы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения массы**

По результатам выполненных теоретических исследований можно определить основную задачу при проектировании рациональных конструктивных



решений звукоизолирующих ограждающих конструкций зданий и сооружений: *необходимо эффективно использовать резервы повышения звукоизоляции ограждения, определяемые инерционным прохождением звука* [2], [6].

Для решения поставленной задачи необходимо установить основные способы, позволяющие повышать звукоизоляцию сэндвич-панелей и приближать ее к предельным значениям без значительного увеличения массы, то есть путем использования их внутренних резервов.

На рисунке 3.5 представлены способы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей, которые разработаны по результатам теоретических исследований, проведенных во второй главе.

Из выражения (2.3) следует, что для снижения коэффициента прохождения звука через ограждение необходимо снижать резонансное или инерционное прохождение. Для этого необходимо установить степень влияния физико-механических параметров строительной панели на прохождение звука в режимах свободных и инерционных колебаний.

### **3.2.1. Снижение инерционного прохождения звука через сэндвич-панели**

Согласно выражениям (2.106), (2.107), (2.108) звукопроницаемость сэндвич-панели в инерционном режиме определяется следующими параметрами: поверхностной плотностью облицовок ( $\mu_1$ ;  $\mu_2$ ), величинами функций отклика первой и второй облицовок ( $F_{1и}$ ;  $F_{2и}$ ), скоростью распространения изгибных колебаний сэндвич-панели ( $c_{и}$ ), и углом падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели ( $\theta_2$ ). Ниже рассмотрена возможность регулирования коэффициентом инерционного прохождения звука путем изменения каждого из этих параметров.

1) Коэффициент инерционного прохождения звука  $\tau_{и}$  обратно пропорционален поверхностной плотности ограждения  $\mu$ . Однако, возможность увеличения поверхностной плотности ограждения здесь не рассматривается, т. к.

ведет к значительному повышению его массы и не соответствует цели диссертационной работы.

2) Коэффициенты инерционного прохождения звука через первую  $\tau_{1и}$  и вторую облицовку сэндвич-панели  $\tau_{2и}$  прямо пропорциональны функциям отклика первой и второй облицовок ограждения ( $F_{1и}$  и  $F_{2и}$ , соответственно). Регулирование величиной  $F_{1и}$  возможно путем изменения размеров панели ( $a$ ;  $b$ ), т. к. уменьшение размеров панели приводит к смещению области частот с пониженным прохождением в режиме инерционных колебаний на более высокие частоты. Однако, если стоит задача повысить звукоизоляцию конкретного ограждения (например, перегородки в здании), то в этом случае его геометрические размеры фиксированы и не могут значительно изменяться. Можно заключить, что для трехслойной сэндвич-панели функция отклика  $F_{1и1} = \text{const}$ .

Регулирование величиной  $F_{1и2}$  возможно путем изменения размеров панели  $a$ ;  $b$  (по аналогии с  $F_{1и1}$ ), а также путем изменения толщины среднего слоя сэндвич-панели. При этом угол падения звуковых волн на вторую облицовку сэндвич-панели изменяет свою величину, согласно зависимости (2.13). При увеличении толщины среднего слоя угол  $\theta_2$  увеличивается, коэффициент инерционного прохождения через вторую облицовку сэндвич-панели при этом снижается.

Увеличение толщины среднего слоя в данной работе ограничено размерами рассматриваемых конструкций. При проектировании сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями должна подбираться оптимальная толщина среднего слоя, с учетом резервов повышения звукоизоляции (формула (2.74))

3) Импеданс среды со стороны помещения с источником шума принимаем постоянным – для воздуха  $\rho_0 c_0 = 420 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ .

4) На вторую облицовку сэндвич-панели звук падает из среднего слоя, при этом скорость распространения изгибных волн определяется по методике, описанной в пункте 2.4.1, и зависит от параметров материала среднего слоя – толщины, модуля упругости и модуля сдвига. При увеличении динамического модуля упругости материала среднего слоя увеличивается скорость изгибных колебаний, при этом повышается прохождение звука.

Из рассмотрения пунктов 1 ÷ 4 следует, что для трехслойной сэндвич-панели с неизменной поверхностной массой и фиксированными геометрическими размерами  $a$  и  $b$  коэффициент инерционного прохождения звука может быть снижен путем подбора рациональной толщины материала среднего слоя и снижением его динамического модуля упругости.

### 3.2.2. Снижение резонансного прохождения звука через сэндвич-панель

Звукопроницаемость сэндвич-панели с собственными волнами определяется следующими параметрами: поверхностной плотностью облицовок ( $\mu_1$ ;  $\mu_2$ ) и среднего слоя ( $\mu$ ), характеристикой самосогласования волновых полей ( $A$ ), коэффициентом потерь облицовок ( $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ) и среднего слоя ( $\eta$ ), импедансом среды со стороны шумного помещения ( $\rho_0 c_0$ ), скоростью изгибных колебаний сэндвич-панели ( $c_{\text{и}}$ ), толщиной ( $d$ ) и динамическим модулем упругости среднего слоя ( $E_{\text{д}}$ ), а также углом падения звуковых волн на первую ( $\theta_1$ ) и вторую ( $\theta_2$ ) облицовки и текущей частотой звука (см. формулы (2.97), (2.102), (2.103), (2.104) и (2.105)). При этом значительное влияние на звукоизоляцию сэндвич-панели оказывает положение резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ) (см. формулу (2.2)), определяющееся динамическим модулем упругости материала среднего слоя, толщиной среднего слоя и поверхностными плотностями облицовок и среднего слоя. Величины импеданса среды со стороны шумного помещения, угла падения звуковых волн на первую облицовку и диапазон частот постоянны. Возможность значительного увеличения поверхностной плотности сэндвич-панели в данной работе нами не рассматривается. В качестве параметров регулирования резонансным прохождением звука ( $\tau_c$ ) остаются коэффициенты потерь облицовок и среднего слоя сэндвич-панели, характеристика самосогласования волновых полей, угол падения звуковых волн на вторую облицовку и положение резонансной частоты  $f_p$ .



Рисунок 3.5 – Способы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей

1) Коэффициент резонансного прохождения звука обратно пропорционален величине коэффициента потерь ограждения. Это означает, что для уменьшения излучения звука ограждением с собственными волнами необходимо увеличивать потери колебательной энергии. Повышение коэффициента потерь ограждающей конструкции достигается путем нанесения на ее поверхность вибродемпфирующих покрытий различных типов. Звукоизоляция таких ограждений подробно исследовалась многими учеными [7], [27], [30].

Использование вибродемпфирующих покрытий с высоким коэффициентом потерь в качестве разобщающих в данной работе не рассматривается, так как для эффективной работы их толщина должна быть соизмерима с толщиной внешних листовых облицовок сэндвич-панели, что приведет к значительному приросту ее массы.

2) Звукопроницаемость ограждения в режиме собственных колебаний прямо пропорциональна характеристике самосогласования волновых полей. Поэтому наибольшее прохождение звука происходит на граничной частоте ППР ( $f_{\Gamma mn}$ ), где выполняются условия (2.66).

Для сэндвич-панелей положение резонансной частоты ППР ( $f_{\Gamma mn}$ ) соответствует положению резонансной частоты ППР однослойной пластины, представляющей собой одну облицовку сэндвич-панели. Для снижения резонансного прохождения звука вблизи частоты ППР необходимо подбирать материал облицовок с высоким значением отношения  $\mu/D$ . Чем выше значение данного отношения, тем сильнее резонансная частота области ППР ( $f_{\Gamma mn}$ ) смещается в диапазон высоких частот, вплоть до выхода за пределы нормируемого диапазона частот, таким образом, оказывая меньшее негативное влияние на звукоизоляцию сэндвич-панели.

В таблице 3.1 приведены значения отношения  $\mu/D$  для наиболее распространенных листовых материалов.

На рисунке 3.6 представлено сравнение частотных характеристик звукоизоляции полученных по теории самосогласования волновых полей [1] для однослойных ограждений из различных материалов.

Анализируя рисунок 3.6 и данные, приведенные в таблице 3.1, можно заключить, что в качестве облицовок сэндвич-панелей необходимо использовать

материал с  $2,3 \times 10^{-2} < \mu/D < 3,6 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4$ . Исходя из этого условия, в качестве базового материала для облицовок сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями выбран ГВЛ толщиной 12,5 мм.

Таблица 3.1 – Значения отношения  $\mu/D$  для наиболее распространенных листовых строительных материалов

Материал	Толщина, мм	$\mu/D, \text{ с}^2/\text{м}^4$	$f_{Гmn}, \text{ Гц}$	$f_{Гmn}$ , округленная до ближайшей среднегеометрической третьоктавной частоты, Гц
ГФЛ	20,0	$0,8 \times 10^{-2}$	1677	1600
ЦСП	16,0	$1,3 \times 10^{-2}$	2131	2000
ГФЛ	12,5	$2,1 \times 10^{-2}$	2684	2500
ГКЛ	12,5	$2,2 \times 10^{-2}$	2739	2500
ГВЛ	12,5	$2,8 \times 10^{-2}$	3174	3150
ЦСП	10,0	$3,3 \times 10^{-2}$	3409	3150
OSB	9,0	$5,9 \times 10^{-2}$	4548	5000
ГФЛ	6,0	$8,9 \times 10^{-2}$	5592	5000
OSB	6,3	$1,2 \times 10^{-1}$	6496	6300

3) На вторую облицовку сэндвич-панели звук падает из среднего слоя, при этом скорость распространения изгибных волн, определяемая по формулам (2.91), (2.92), (2.93) (см. пункт 2.4.1) зависит от поверхностной плотности ограждения и от толщины, модуля упругости и модуля сдвига среднего слоя. При увеличении жесткости среднего слоя скорость изгибных колебаний увеличивается, при этом повышается прохождение звука через сэндвич-панель.

4) Угол падения звука на вторую облицовку сэндвич-панели ( $\theta_2$ ) зависит от ее геометрических размеров ( $a, b$ ) и толщины среднего слоя ( $d$ ). Увеличение толщины среднего слоя при постоянных размерах  $a$  и  $b$  приводит к увеличению угла падения и снижению прохождения звука через сэндвич-панель.

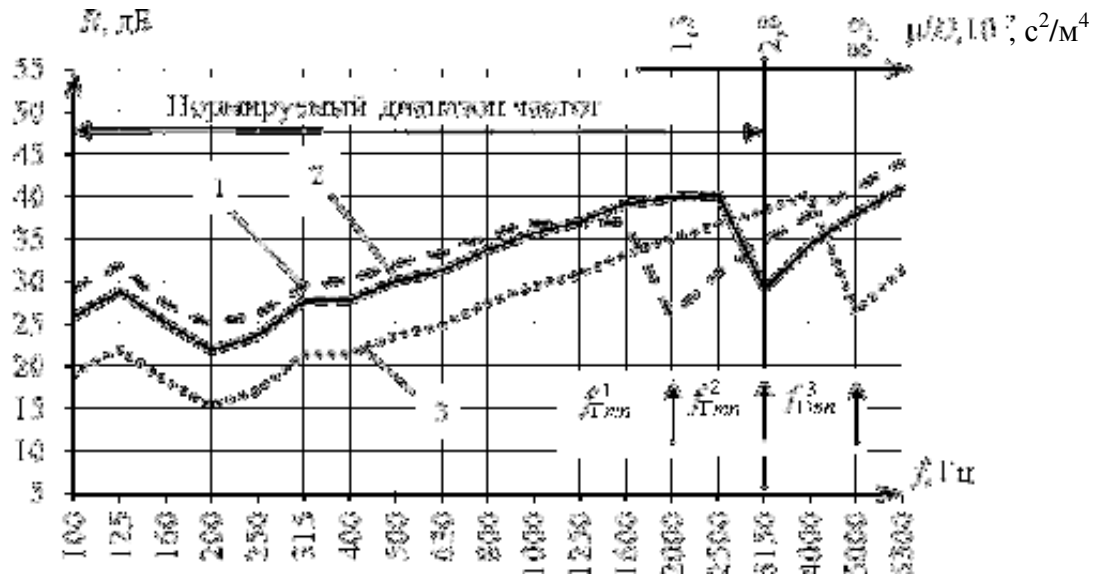


Рисунок 3.6 – Теоретические частотные характеристики звукоизоляции однослойных ограждений (размер  $2,0 \times 1,2$  м) с различными значениями отношения  $\mu/D$ : 1 – ЦСП, толщиной 16 мм,  $\mu/D = 1,3 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4$ ; 2 – ГВЛ, толщиной 12,5 мм,  $\mu/D = 2,8 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4$ ; 3 – ГФЛ, толщиной 6 мм,  $\mu/D = 8,9 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4$

5) Значительное увеличение прохождения звука через сэндвич-панель вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ) является основным фактором, негативно влияющим на их звукоизоляцию. Этот эффект обусловлен тем, что для рассматриваемых сэндвич-панелей, с толщиной среднего слоя  $50 \div 100$  мм, которые подходят для применения в строительстве, резонансная частота системы находится в области средних и высоких частот ( $630 \div 1250$  Гц).

При понижении значения резонансной частоты  $f_p$  звукоизоляция сэндвич-панели в области НПР2 увеличивается, а в области НПР1 уменьшается (см. рисунок 2.2). Можно сделать вывод, что при проектировании сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями, необходимо стремиться сместить положение резонансной частоты в диапазон низких частот, сузив при этом область НПР1 и расширив область НПР2.

Регулирование звукоизоляции сэндвич-панелей путем изменения значения резонансной частоты  $f_p$  подробнее будет рассмотрено в пункте 3.2.3.

### 3.2.3 Влияние резонансной частоты сэндвич-панели $f_p$ на коэффициент прохождения звука

Механизм прохождения звука через трехслойную сэндвич-панель как систему из двух облицовок, соединенных средним слоем, имеет резонансную и инерционную составляющие, характеризующиеся коэффициентами прохождения звука  $\tau_{ПС}$  и  $\tau_{ПИ}$ . Обозначим коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель как систему «масса – упругость – масса»  $\tau_{П}$ . Данный коэффициент прохождения звука определяется из выражения:

$$\tau_{П} = \tau_{ПИ} + \tau_{ПС}, \quad (3.2)$$

где  $\tau_{ПИ}$ ;  $\tau_{ПС}$  – то же, что в формуле (2.51).

Коэффициент инерционного прохождения  $\tau_{ПИ}$  определяется по формуле (2.106) и пропорционален функции отклика первой облицовки сэндвич-панели ( $F_{1И}$ ), зависит от частоты звука ( $f$ ) и частоты резонанса системы ( $f_p$ ). Коэффициент резонансного прохождения  $\tau_{ПС}$  определяется по формуле (2.97) и пропорционален характеристике самосогласования ограждения ( $A$ ), зависит от частоты звука ( $f$ ) и от частоты резонанса системы ( $f_p$ ).

На рисунке 3.7 приведены частотные характеристики коэффициентов  $\tau_{ПИ}$  и  $\tau_{ПС}$  для сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ и средним слоем из пенопласта. Анализируя рисунок 3.7, можно заключить, что значения коэффициентов прохождения звука  $\tau_{ПИ}$  и  $\tau_{ПС}$  резко увеличиваются вблизи резонансной частоты  $f_p$ , поэтому основным параметром определяющим прохождение звука через сэндвич-панель как систему «масса – упругость – масса», является значение резонансной частоты  $f_p$ .

Таким образом, при проектировании сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями, снижение прохождения звука может быть достигнуто путем изменения коэффициента прохождения  $\tau_{П}$  с целью вывода области повышенного прохождения звука вблизи частоты  $f_p$  из нормируемого диапазона частот или максимальном ее смещении в диапазон низких частот.

Положение резонансной частоты  $f_p$  для сэндвич-панели определяется по формуле (2.2) и зависит от поверхностных плотностей облицовок ( $\mu_1$ ;  $\mu_2$ ) и



среднего слоя ( $\mu$ ), толщины среднего слоя ( $d$ ), и от динамического модуля упругости среднего слоя ( $E_d$ ).

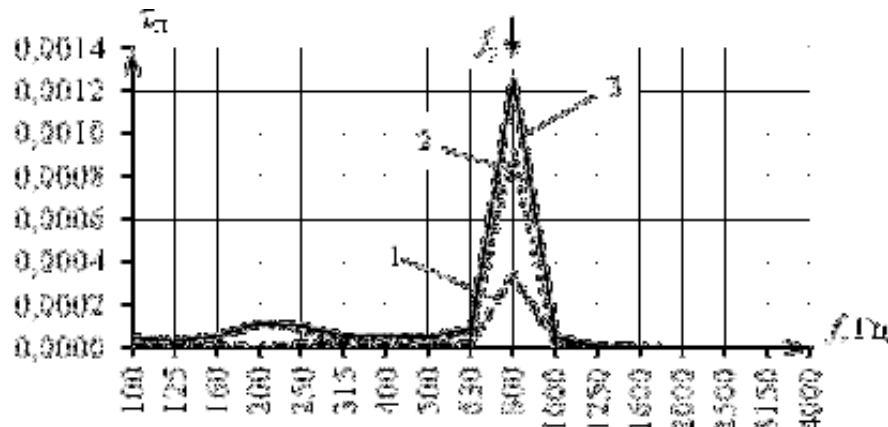


Рисунок 3.7 – Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через трехслойную сэндвич-панель (размеры 2,0 м × 1,2 м, слои склеены по плоскости, облицовки из ГВЛ толщиной 12,5 мм ( $\rho = 1150 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 14,3 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 528 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_d = 2,95 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ), средний слой из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )): 1 –  $\tau_{Пс}$ ; 2 –  $\tau_{Пн}$ ; 3 –  $\tau_{П}$

1) Согласно выражению (2.2), увеличение поверхностной плотности облицовок ( $\mu_1$ ;  $\mu_2$ ) приводит к снижению значения резонансной частоты  $f_p$ , однако значительное увеличение массы не соответствует цели диссертационной работы. При этом происходит смещение области повышенного прохождения звука в диапазон более низких частот с частоты  $f_p^1 = 1000 \text{ Гц}$  на частоту  $f_p^2 = 800 \text{ Гц}$  (см. рисунок 3.8). На частотах от 100 Гц до 500 Гц повышение кривой 1 над кривой 2 на рисунке 3.8 объясняется повышенным инерционным прохождением звука ( $\tau_{Пн}$ ) из-за более низкой поверхностной плотности облицовок.

На рисунке 3.9 представлено сравнение частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панелей с одинаковым средним слоем и облицовками с различной поверхностной плотностью.

Из рисунка 3.9 видно, что при увеличении поверхностной плотности облицовок сэндвич-панели в два раза, резонансная частота системы  $f_p$  смещается в диапазон более низких частот на третьоктаву (с частоты  $f_p^1 = 1000 \text{ Гц}$  на частоту  $f_p^2 = 800 \text{ Гц}$ ). При этом звукоизоляция сэндвич-панели также повышается, вследствие снижения инерционного прохождения звука в диапазонах НПР1и

НПР2, и уменьшается в диапазоне ППР из-за смещения граничной частоты ППР (с частоты  $f_{\Gamma_{\text{mn}}}^1 = 5000$  Гц на частоту  $f_{\Gamma_{\text{mn}}}^2 = 3150$  Гц) за счет снижения отношения  $\mu/D$  облицовок.

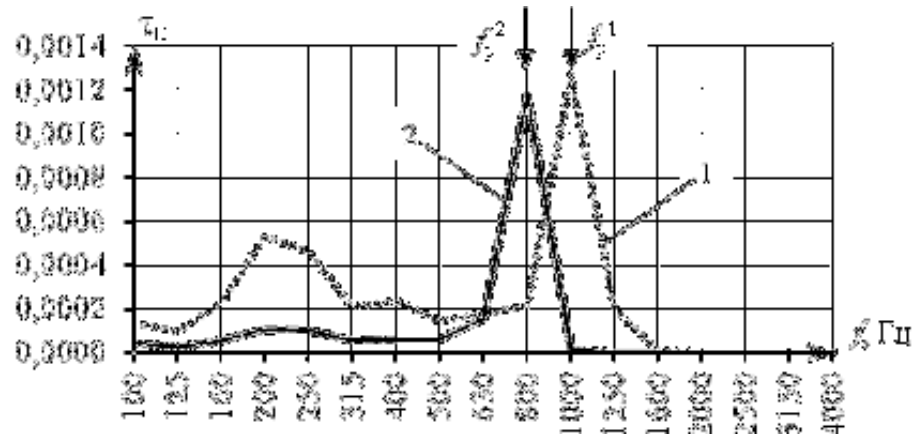


Рисунок 3.8 – Влияние поверхностной плотности облицовок на коэффициент прохождения звука  $\tau_{\Pi}$  через сэндвич-панель (размеры 2,0 м  $\times$  1,2 м, слои склеены по плоскости, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 1,0$  кг/м<sup>2</sup>,  $D = 92$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6$  Па)): 1 – с облицовками из ГФЛ, толщиной 6 мм, ( $\mu = 6,0$  кг/м<sup>2</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 67$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,4 \cdot 10^6$  Па); 2 – с облицовками из ГФЛ, толщиной 12,5 мм, ( $\mu = 12,5$  кг/м<sup>2</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 608$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,4 \cdot 10^6$  Па)

Материал облицовок сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями следует подбирать согласно критериям, описанным в пункте 3.2.2, позволяющим снизить резонансное прохождение звука через сэндвич-панель, с учетом нормативных требований предъявляемых к требуемой звукоизоляции конкретного ограждения в здании.

2) В качестве среднего слоя сэндвич-панелей рассматривается жесткие, легкие, пористые материалы, поэтому масса среднего слоя для исследуемых сэндвич-панелей, применимых в строительстве, мала по сравнению с массами облицовок ( $\mu_1/\mu > 10$ ) и не оказывает значимого влияния на положение резонансной частоты системы  $f_p$ .

3) Согласно выражению (2.2), для снижения значения резонансной частоты  $f_p$  необходимо увеличение толщины среднего слоя сэндвич-панели ( $d$ ). Это приводит к увеличению общей толщины ограждения и уменьшению полезной площади при

строительстве, поэтому толщину среднего слоя следует подбирать, учитывая резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панели (см. пункт 3.1).

На рисунке 3.9 представлено сравнение частотных характеристик коэффициента прохождения звука  $\tau_{\Pi}$  для сэндвич-панелей с одинаковыми облицовками и различной толщиной среднего слоя (минимальной и максимальной для рассматриваемых ограждений).

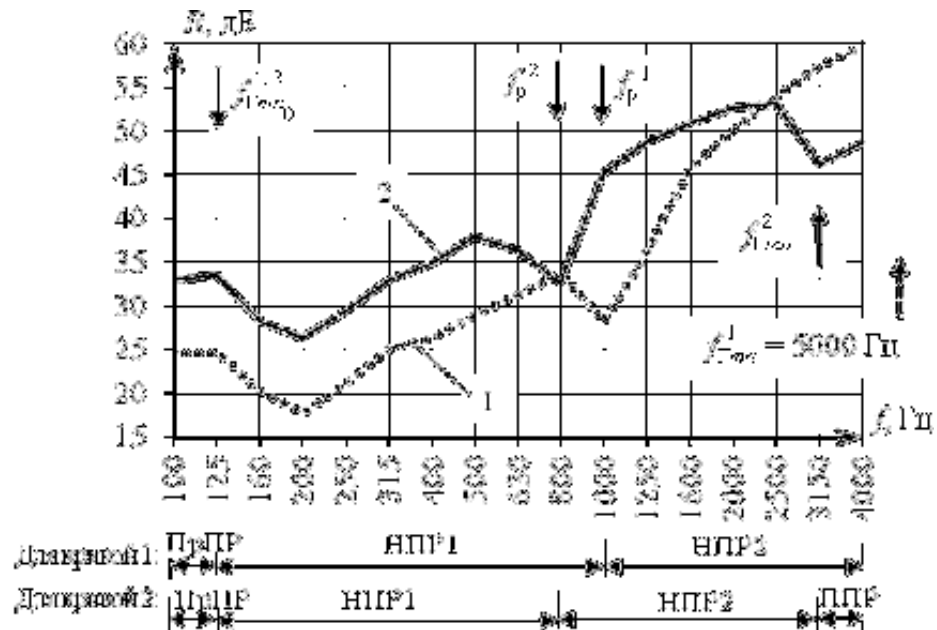


Рисунок 3.9 – Влияние поверхностной плотности облицовок на положение резонансной частоты  $f_p$  сэндвич-панели (размеры 2,0 м × 1,2 м, слои склеены по плоскости, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 1,0$  кг/м<sup>2</sup>,  $D = 92$  Па·м<sup>3</sup>,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6$  Па)): 1 – теоретическая частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели с облицовками из ГФЛ, толщиной по 6 мм, ( $\mu = 6,0$  кг/м<sup>2</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 67$  Па·м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,4 \cdot 10^6$  Па); 2 – теоретическая частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели с облицовками из ГФЛ, толщиной по 12,5 мм ( $\mu = 12,5$  кг/м<sup>2</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 608$  Па·м<sup>3</sup>,  $E_d = 3,4 \cdot 10^6$  Па)

Анализируя рисунок 3.9, можно сделать вывод, что увеличение толщины среднего слоя смещает область повышенного прохождения звука через сэндвич-панель в диапазон более низких частот. В нашем случае при увеличении толщины среднего слоя с 50 мм до 100 мм область повышенного прохождения звука смещается с частоты  $f_p^1 = 800$  Гц на частоту  $f_p^2 = 400$  Гц. Превышение коэффициента прохождения звука  $\tau_{\Pi}$  через ограждение с толщиной среднего слоя 100 мм (кривая 2 на рисунке 3.10) над коэффициентом для ограждения с толщиной

50 мм (кривая 1 на рисунке 3.10) в диапазоне частот 125 Гц ÷ 400 Гц объясняется увеличением скорости изгибных колебаний среднего слоя  $c_s$  (см. формулу 2.94) при увеличении его толщины.

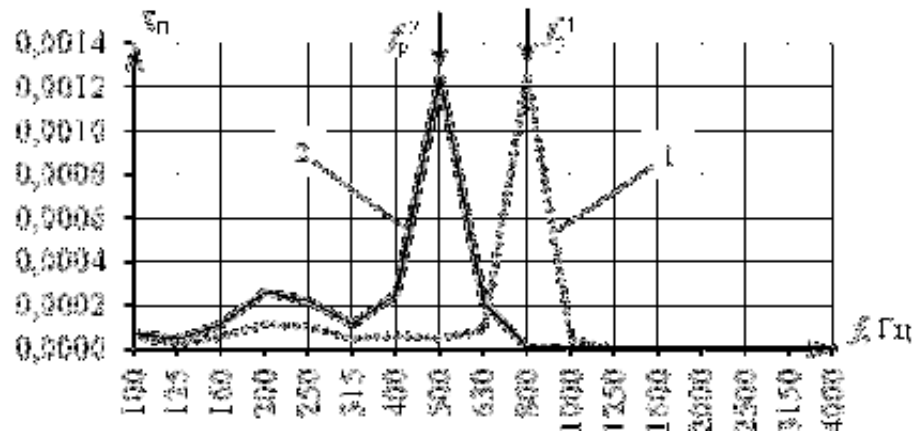


Рисунок 3.10 – Влияние толщины среднего слоя на коэффициент прохождения звука  $\tau_{\Pi}$  через сэндвич-панель (размеры 2,0 м × 1,2 м, слои склеены по плоскости, облицовки из ЦСП, толщиной по 12,5 мм ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 15,6 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 680 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_{\text{д}} = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )): 1 – средний слой из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_{\text{д}} = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ); 2 – средний слой из пенопласта толщиной 100 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 2,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 737 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_{\text{д}} = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )

На рисунке 3.11 представлено сравнение частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панелей с одинаковыми облицовками и различной толщиной среднего слоя (минимальной и максимальной) для рассматриваемых ограждений.

Анализируя рисунок 3.11, можно сделать вывод, что изменение толщины среднего слоя позволяет регулировать положение резонансной частоты  $f_p$  рассматриваемых сэндвич-панелей в пределах двух третьоктавных полос. При увеличении толщины среднего слоя с 50 до 100 мм резонансная частота  $f_p$  смещается вниз с частоты  $f_p^1 = 800 \text{ Гц}$  на частоту  $f_p^2 = 500 \text{ Гц}$ .

4) Согласно выражению (2.2), для снижения значения резонансной частоты  $f_p$  необходимо уменьшение динамического модуля упругости ( $E_{\text{д}}$ ) среднего слоя сэндвич-панели. Увеличение динамического модуля упругости среднего слоя не приводит к увеличению толщины ограждения, позволяя варьировать положением

резонансной частоты  $f_p$  не изменяя геометрические параметры панели и практически не изменяя ее массу.

На рисунке 3.12 представлено сравнение частотных характеристик коэффициента прохождения звука  $\tau_{\Pi}$  сэндвич-панелей с одинаковыми облицовками и средним слоем с различным модулем упругости.

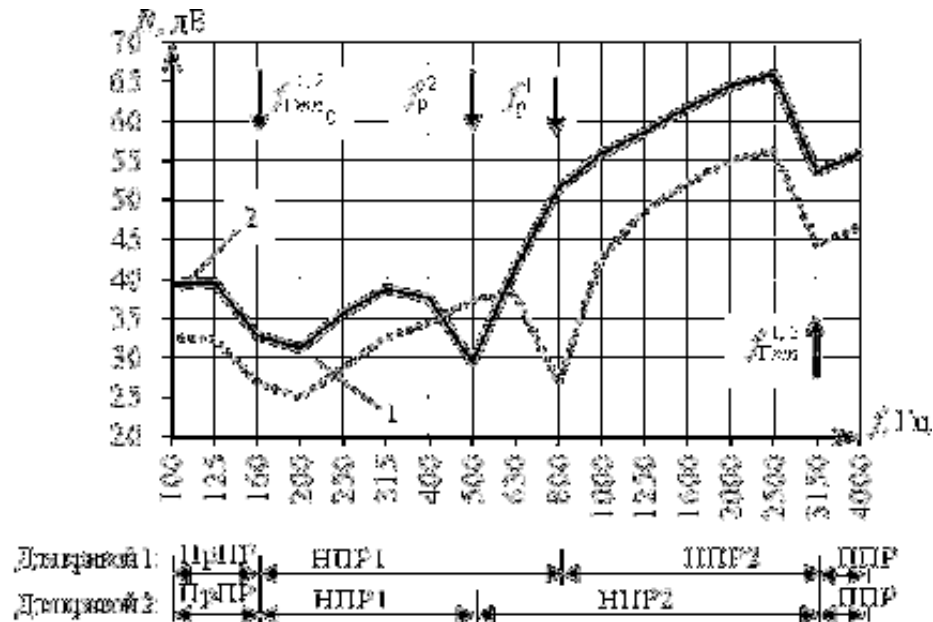


Рисунок 3.11 – Влияние толщины среднего слоя на положение резонансной частоты  $f_p$  сэндвич-панели (размеры 2,0 м × 1,2 м, слои склеены по плоскости, облицовки из ЦСП, толщиной по 12,5 мм ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 15,6 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 680 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )): 1 – теоретическая частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели со средним слоем из пенопласта толщиной 50мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ); 2 – теоретическая частотная характеристика звукоизоляции сэндвич-панели со средним слоем из пенопласта толщиной 100мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 2,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 737 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )

Анализируя рисунок 3.12, можно сделать вывод, что уменьшение динамического модуля упругости среднего слоя смещает область повышенного прохождения звука через сэндвич-панель в диапазон более низких частот. В нашем случае, при увеличении жесткости среднего слоя с  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$  до  $E_d = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$  область повышенного прохождения звука смещается с частоты  $f_p^1 = 800 \text{ Гц}$  на частоту  $f_p^2 = 500 \text{ Гц}$ .



Анализируя рисунок 3.13, можно сделать вывод, что изменение динамического модуля упругости материала среднего слоя сэндвич-панели позволяет регулировать положение резонансной частоты в пределах двух третьоктавных полос. При уменьшении динамического модуля упругости среднего слоя с  $E_d = 8,5 \cdot 10^6$  Па до  $E_d = 3,5 \cdot 10^6$  Па резонансная частота смещается с частоты  $f_p^1 = 800$  Гц на частоту  $f_p^2 = 500$  Гц.

5) Кроме описанных выше факторов, на положение резонансной частоты  $f_p$  в значительной степени оказывает влияние акустическое разобщение облицовок и среднего слоя сэндвич-панели.

В данной работе предлагается применение следующих конструктивных мер для акустического разобщения слоев сэндвич-панелей:

- 1) Введение разобщающих слоев упругого материала между облицовками и средним слоем;
- 2) Снижение площади склеивания слоев за счет их точечного склеивания.

Из рассмотрения пунктов 1 ÷ 5 можно заключить, что каждый из описанных методов по отдельности позволяет регулировать (снижать) величину резонансной частоты  $f_p$  в пределах 1 ÷ 2 третьоктавных полос. Для обеспечения большего эффекта данного регулирования, необходимо применять вышеуказанные методы совместно (комплексно).

### **3.3. Разработка сэндвич-панелей с рациональными по звукоизоляции конструктивными решениями**

В параграфе 3.2 нами было исследовано влияние факторов, влияющих на звукоизоляцию сэндвич-панели в различных частотных диапазонах.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) в качестве облицовок необходимо использовать листовые материалы с отношением поверхностной плотности и цилиндрической жесткости находящимся в диапазоне  $2,5 \times 10^{-2} < \mu/D < 3,4 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}$ ;

2) изменение значения резонансной частоты системы «масса – упругость – масса»  $f_p$  позволяет регулировать прохождение звука через ограждение в широком диапазоне частот без значительного увеличения его массы (менее 10%). Для повышения звукоизоляции сэндвич-панели необходимо вывести область повышенного прохождения звука, расположенную вблизи резонансной частоты  $f_p$  за пределы нормируемого диапазона частот (100 ÷ 3150 Гц), или максимально возможно сместить ее в диапазон низких частот. Для этого необходимо подбирать оптимальные величины упругих характеристик среднего слоя ( $E_d$ ), вводиться слои акустического разобщения, выбираться оптимальный способ склеивания слоев сэндвич-панели.

3) с помощью метода, изложенного в п. 2.4, можно проводить предварительный теоретический расчет звукоизоляции сэндвич-панели с заданными параметрами и подбирать рациональное конструктивное решение многослойного ограждения в зависимости от спектра изолируемого шума и требуемой звукоизоляции в конкретном случае его применения в здании.

Цель разработки сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями – это получение высокоэффективных звукоизолирующих ограждений, удовлетворяющих нормативным требованиям по звукоизоляции, предъявляемым к ограждающим конструкциям в гражданском и промышленном строительстве. При этом повышение звукоизоляции должно происходить без увеличения массы ограждения путем эффективного использования внутренних резервов.

На базе теоретических исследований, представленных выше, разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей, позволяющий рассчитать звукоизоляцию реальных сэндвич-панелей конечных размеров. Данный метод представлен в п. 3.7.

Проведенные исследования позволяют проектировать высокоэффективные звукоизолирующие ограждения на основе сэндвич-панелей с заранее заданными значениями звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот, максимально используя резервы повышения звукоизоляции, определяемые инерционным прохождением звука.



### 3.4. Метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей

Ниже представлена последовательность проведения расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом способа соединения слоев – в п. 3.4.1 со сплошной склейкой слоев, в п. 3.4.2 – с учетом акустического разобщения слоев. Нумерация формул, таблиц и рисунков для данных разделов принята самостоятельной.

#### 3.4.1 Метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей со сплошной склейкой слоев

*1. Определение физико-механических характеристик облицовок и среднего слоя сэндвич-панели.*

На начальном этапе расчета устанавливаются основные параметры проектируемой сэндвич-панели: размеры в плане, толщина среднего слоя и облицовок, характеристики материалов среднего слоя и облицовок (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент потерь). Эти параметры можно представить в табличной форме (см. таблицу 3.1).

*2. Вычисление цилиндрической (изгибной) жесткости и поверхностной плотности.*

Вычисление цилиндрической жесткости облицовок ( $D$ ), Па·м<sup>3</sup>, поверхностной плотности облицовок (для одинаковых облицовок  $\mu_1 = \mu_2$ ), кг/м<sup>2</sup>, и среднего слоя, по следующим формулам:

$$\mu_1 = \rho_1 h_1, \mu_2 = \rho_2 h_2, \mu = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + 2\rho_3 h_3, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности первой и второй облицовки, соответственно, кг/м<sup>2</sup>;  $\rho_3$  – поверхностная плотность среднего слоя, кг/м<sup>2</sup>;  $h_1$  и  $h_2$  – толщина первой и второй облицовки, соответственно, м;  $2h_3$  – толщина среднего слоя сэндвич-панели, м.

$$D = \frac{E_d h_1^3}{12(1-\nu)}, \quad (2)$$

где  $E_d$  – динамический модуль упругости облицовки, Па;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала облицовки,  $h_1$  – то же, что в формуле (1).

Таблица 3.1 – Характеристики сэндвич-панели

Геометрические размеры сэндвич-панели		Облицовки					Средний слой										
		Первая облицовка (со стороны помещения с источником шума)			Вторая облицовка (со стороны изолируемого помещения)												
Длина, $a$ , м	Ширина, $b$ , м	Толщина, $h_1$ , м	Плотность, $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E_d$ , Па	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Коэффициент потерь, $\eta$	Толщина, $h_2$ , м	Плотность, $\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E_d$ , Па	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Коэффициент потерь, $\eta$	Плотность, $\rho_3$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E_d$ , Па	Модуль сдвига, $G$ , Па	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Коэффициент потерь, $\eta$	Толщина, $d = 2h_3$ , м

### 3. Расчет граничных частот прохождения звука через сэндвич-панель.

Граничная частота  $f_{\Gamma mn}$  разделяет области НПР ( $f_{\Gamma mn0} < f < f_{\Gamma mn}$ ) и ППР ( $f > f_{\Gamma mn}$ ). Граничная частота области ППР определяется по формуле [1]:

$$f_{\Gamma mn} = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_1}{D}} + \Delta f_{\Gamma mn}, \quad (3)$$

где  $\mu_1$  – то же, что в формуле (1);  $\Delta f_{\Gamma mn}$  – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний обшивки, Гц;  $c_0$  – скорость звука в воздухе, м/с;  $D$  – цилиндрическая жесткость облицовок, Па·.

Резонансная частота системы для сэндвич-панели определяется по формуле [50]:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{E_d (\mu_1 + \mu_2)}{d \mu_1 \mu_2}}, \quad (4)$$

где  $E_d$  – то же, что в формуле (2);  $d$  – толщина среднего слоя, м;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – поверхностные плотности первой и второй облицовок соответственно, кг/м<sup>2</sup>.

#### 4. Определение коэффициентов прохождения звука через сэндвич-панель

Коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель вычисляется по формуле [1]:

$$\tau = \tau_{\text{пи}} + \tau_{\text{и1}}\tau_{\text{и2}} + \tau_{\text{и1}}\tau_{\text{и2}} + \tau_{\text{пс}}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{пи}}$  – коэффициент инерционного прохождения звука через внешние облицовки с упругой связью между собой;  $\tau_{\text{и1}}$ ,  $\tau_{\text{и2}}$  – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно;  $\tau_{\text{пс}}$  – коэффициент резонансного прохождения звука через облицовки с упругой связью между собой;  $\tau_{\text{и1}}$ ,  $\tau_{\text{и2}}$  – коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно.

##### 4.1 Расчет коэффициентов резонансного прохождения звука через сэндвич-панель

При резонансном прохождении звука через сэндвич-панель как конструктивную систему в целом коэффициент прохождения звука определяется по формуле:

$$\tau_{\text{пс}} = \frac{1}{\frac{6,8}{c_{\text{и}}^2} \frac{\mu^2 f^2}{A^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (6)$$

где  $f_p$  – резонансная частота системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели, Гц;  $c_{\text{и}}$  – скорость распространения бегущей волны, м/с;  $\mu$  – поверхностная плотность сэндвич-панели, кг/м<sup>2</sup>;  $A$  – характеристика самосогласования волновых полей;  $f$  – текущая частота звука, Гц.

При резонансном прохождении звука в частотной области НПР ( $f_{\Gamma_{mn0}} < f < f_{\Gamma_{mn}}$ ) коэффициенты прохождения определяются по следующим формулам:

– для первой облицовки:

$$\tau_{\text{и1}} = \frac{1}{\frac{10^{-5}}{A_{01}^4} \mu_1^2 f^2 \eta_1 + 1}, \quad (7)$$

– для второй облицовки:

$$\tau_{\text{и2}} = \frac{1}{\frac{3,1}{c_{\text{и}}^2 A_{02}^4} \mu_2^2 f^2 \eta_2 \cos^2 \theta_2 + 1}, \quad (8)$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты потерь материала первой и второй облицовок соответственно;  $A_{01}$  и  $A_{02}$  – характеристики самосогласования волнового поля облицовки и звуковых полей перед и за облицовкой;  $f_{\Gamma mn}$  – граничная частота области ППР, Гц;  $\mu_1, \mu_2$  – то же, что в формуле (4);  $c_{и}, f$  – то же, что в формуле (6);  $\theta_2$  – угол падения звуковых волн на вторую облицовку, определяющийся по формуле:

$$\cos \theta_2 = \frac{d}{\sqrt{b^2 + d^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}, \quad (9)$$

где  $a$  – длина сэндвич-панели, м;  $b$  – ширина сэндвич-панели, м;  $d$  – то же, что в формуле (4).

При резонансном прохождении звука в области частот выше граничной частоты ППР ( $f > f_{\Gamma mn}$ ):

– для первой облицовки:

$$\tau_{1с} = \frac{1}{9,1 \cdot 10^{-5} \cdot \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_1 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (10)$$

– для второй облицовки:

$$\tau_{2с} = \frac{1}{\frac{10,7}{c_{и}^2} \mu_2^2 \frac{f^3}{f_{\Gamma mn}} \eta_2 \cos \theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{\Gamma mn}}{f}} + 1}, \quad (11)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \theta_2, f_{\Gamma mn}$  – то же, что в формулах (7), (8);  $c_{и}, f$  – то же, что в формуле (6);  $\mu_1, \mu_2$  – то же, что в формуле (4).

#### 4.2 Расчет коэффициентов инерционного прохождения звука через сэндвич-панель

Коэффициент инерционного прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой определяем по формуле:

$$\tau_{ии} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu^2 f^2}{c_{и} F_{ии}^2} \left( \frac{f^2}{f_p^2} - 1 \right)^2 + 1}, \quad (12)$$

где  $F_{ии}$  – функция отклика первой облицовки, на которую падет звук;  $c_{и}, f, f_p, \mu$  – то же, что в формуле (6).

Выражение для определения коэффициента инерционного прохождения звука через облицовки:

– для первой облицовки:

$$\tau_{1и} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 10^{-5} \mu_1^2 f^2}{F_{1и}^2} + 1}, \quad (13)$$

– для второй облицовки:

$$\tau_{2и} = \frac{1}{\frac{6,8 \mu_2^2 f^2 \cos^2 \theta_2}{c_{и} F_{2и}^2} + 1}, \quad (14)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – то же, что в формуле (4);  $c_{и}, f$  – то же, что в формуле (6);  $\theta_2$  – то же, что в формулах (7), (8);  $F_{1и}$  – то же, что в формуле (12);  $F_{2и}$  – функция отклика второй облицовки. Значения функции отклика в нормируемом диапазоне частот определяются по формуле (2.27) при этом для  $F_{2и}$  угол падения звуковой волны вычисляется по формуле (11).

#### 4.3 Расчет скорости распространения изгибных колебаний сэндвич-панели

Определяем жесткостные параметры сэндвич-панели по формулам [88]:

$$B_1 = \frac{E_1 h_1 h_3}{1 - \nu_1^2}, \quad B_2 = \frac{E_2 h_2 h_3}{1 - \nu_2^2}, \quad (15)$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left[ \frac{h_1^2}{12} + \left( h_3 + \frac{h_1}{2} \right)^2 \right], \quad D_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{h_2^2}{12} + \left( h_3 + \frac{h_2}{2} \right)^2 \right], \quad D_3 = \frac{E_3}{1 - \nu_3^2} \cdot \frac{2h_3^3}{3} \quad (16)$$

$$A_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left[ \frac{h_1}{2} + h_3 \right], \quad A_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left[ \frac{h_2}{2} + h_3 \right], \quad (17)$$

$$F_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \nu_1^2} \left( \frac{h_3 h_1}{2} + h_3^2 \right), \quad F_2 = \frac{E_2 h_2}{1 - \nu_2^2} \left( \frac{h_3 h_2}{2} + h_3^2 \right), \quad (18)$$

$$N = D_3 + h_3 (B_1 + B_2), \quad (19)$$

$$S = 2Gh_3, \quad (20)$$

$$F = D_1 + D_2 - F_1 - F_2, \quad T = F_1 + F_2 + D_3, \quad L = A_1 + A_2 - B_1 - B_2, \quad (21)$$

где  $h_1, h_2, 2h_3$  – то же, что в формуле (1), м;  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициент Пуассона первой и второй облицовки, соответственно;  $\nu_3$  – коэффициент Пуассона среднего слоя;  $G$  – модуль сдвига среднего слоя, Па;  $S$  – жесткость среднего слоя при сдвиге, Па·м.

Определяем скорости изгибных волн условных однослойных пластин с изгибными жесткостями  $F - TLh_3/N$ ,  $N$  и  $S$ , соответственно [25]:

$$c_1 = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{F - \frac{TLh_3}{N}}{\mu}}, \quad c_3 = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{N}{\mu}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{S}{\mu}} \quad (22)$$

где  $h_3$  – то же, что в формуле (1);  $f$ ,  $\mu$  – то же, что в формуле (6).

Определяем частоты, на которых происходит изменение характера скорости, вследствие наличия сдвиговых деформаций среднего слоя [25]:

$$\omega_1 = \frac{S}{\sqrt{\mu N}}, \quad \omega_1 = \frac{S}{\sqrt{\mu \left( F - \frac{TLh_3}{N} \right)}}, \quad (23)$$

где  $h_3$  – то же, что в формуле (1);  $\mu$  – то же, что в формуле (6);  $S$  – то же, что в формуле (22).

По результатам проведенных расчетов строятся дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели. При этом принимаются следующие допущения: - на частотах  $f < \omega_1$  принимаем  $c_{и} \approx c_3$ ; - на частотах  $\omega_1 < f < \omega_2$  принимаем  $c_{и} \approx c_s$ ; - на частотах  $f > \omega_2$  принимаем  $c_{и} \approx c_1$ .

На рисунках 3.14, 3.15 приведены результаты расчетов для сэндвич-панели размерами 2,0 м × 1,2 м (длина × высота) с внешними листовыми облицовками из ЦСП (толщиной по 10 мм) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм.

#### 4.4 Построение частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панели

Звукоизоляция ограждающей конструкции обратно пропорциональна коэффициенту прохождения звука  $\tau$  и определяется по известной формуле:

$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right), \quad (21)$$

Используя значения коэффициентов прохождения звука, полученные для областей НПР и ППР по формулам (6) ÷ (8), (10) ÷ (12), вычисляются значения звукоизоляции сэндвич-панели в нормируемом диапазоне частот.

На рисунке 3.16 приведено сравнение расчетной частотной характеристики звукоизоляции сэндвич-панели с экспериментальными данными, полученными в реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Анализируя полученные данные, можно видеть совпадение резонансных частот ограждения

( $f_p = 800$  Гц,  $f_{Гmn} = 3150$  Гц), определенных теоретически и экспериментально.

Значения звукоизоляции имеют неплохую сходимость:

- в диапазоне ПрПР ( $100 \text{ Гц} < f < 160 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 2$  дБ;
- в диапазоне НПР1 ( $160 \text{ Гц} < f < 800 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 4$  дБ;
- в диапазоне НПР2 ( $800 \text{ Гц} < f < 3150 \text{ Гц}$ ) –  $2 \div 7$  дБ;
- в диапазоне ППР ( $f > 3150 \text{ Гц}$ ) – 1 дБ.

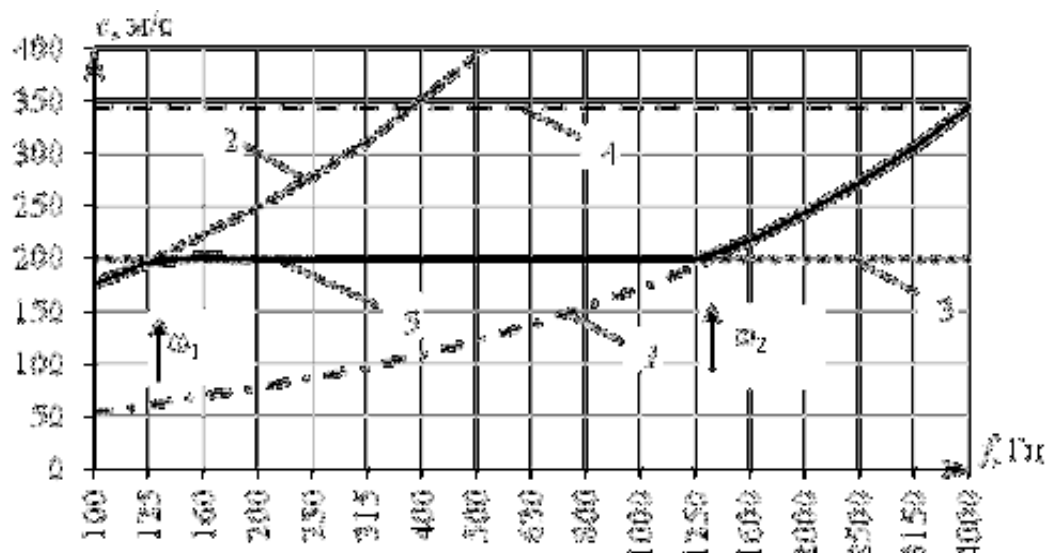


Рисунок 3.14 – Дисперсионные кривые скоростей изгибных колебаний сэндвич-панели (размер  $2,0 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$ , слои жестко склеены) с внешними листовыми облицовками из ЦСП толщиной по  $10 \text{ мм}$  ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 12,5 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 347 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) и средним слоем из пенопласта толщиной  $50 \text{ мм}$  ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ): 1 – скорость изгибных волн в условной однослойной пластине с цилиндрической жесткостью  $F - TLh_3/N$  ( $c_1$ ); 2 – скорость изгибных волн в условной однослойной пластине с цилиндрической жесткостью  $N$  ( $c_3$ ); 3 – скорость сдвиговых волн среднего слоя, нагруженного массами облицовок ( $c_s$ ); 4 – скорость звука в воздухе ( $c_0$ ); 5 – скорость распространения бегущей волны ( $c_{и}$ )

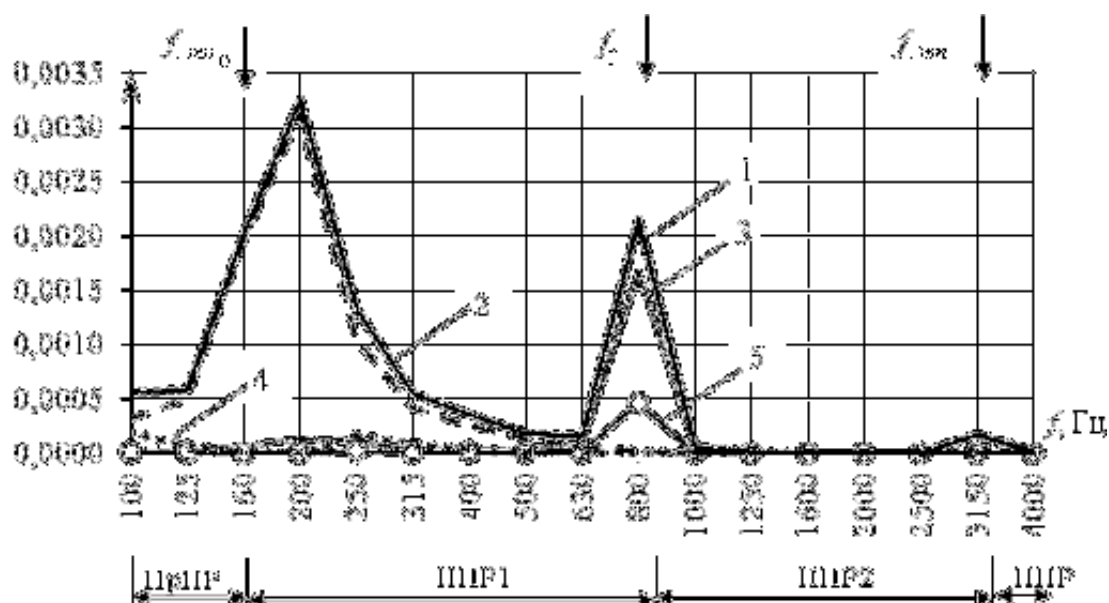


Рисунок 3.15 – Частотные характеристики коэффициентов прохождения звука через сэндвич-панель (размер 2,0 м × 1,2 м, слои жестко склеены) с внешними листовыми облицовками из ЦСП толщиной по 10 мм ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 12,5 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 347 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ): 1 – коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель ( $\tau$ ); 2 –  $\tau_{1и}\tau_{2и}$ , (где  $\tau_{1и}$ ,  $\tau_{2и}$  – коэффициенты инерционного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно); 3 – коэффициент инерционного прохождения звука через внешние облицовки с упругой связью между собой ( $\tau_{пи}$ ); 4 –  $\tau_{1с}\tau_{2с}$ , (где  $\tau_{1с}$ ,  $\tau_{2с}$  – коэффициенты резонансного прохождения звука через первую и вторую облицовки, соответственно); 5 – коэффициент резонансного прохождения звука через облицовки с упругой связью между собой ( $\tau_{пс}$ )



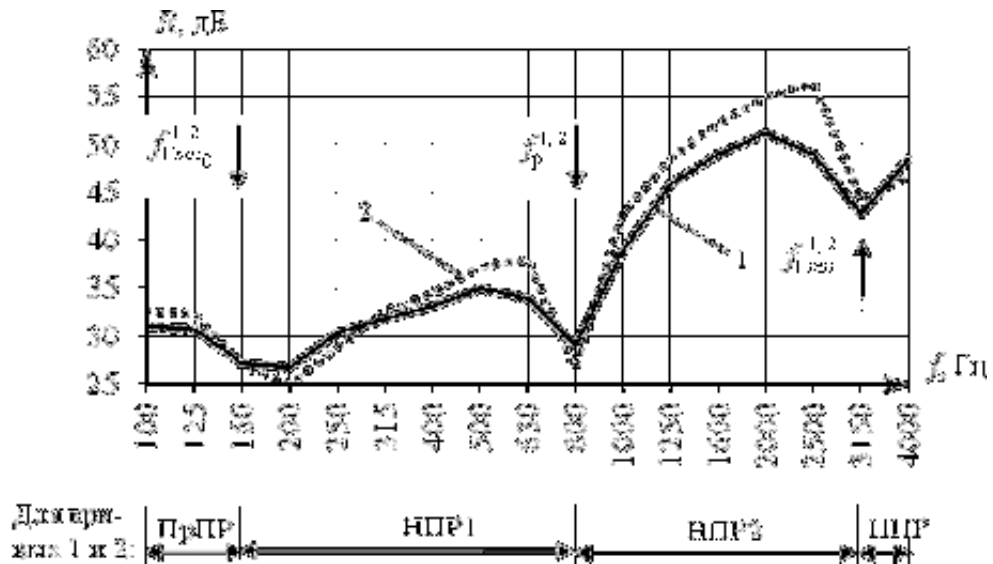


Рисунок 3.16 – Частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м, слои жестко склеены) с внешними листовыми облицовками из ЦСП толщиной по 10 мм ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 12,5 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 347 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ): 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет по разработанному методу

### 3.4.2 Расчет звукоизоляции сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев

При теоретических расчетах звукоизоляции сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев в данной работе предложено вычислять резонансную частоту системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев по формуле:

$$f_p = 0,16 \sqrt{\frac{E_0(\mu_1 + \mu_2)}{d\mu_1\mu_2}}, \quad (22)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – поверхностные плотности первой и второй облицовок соответственно,  $\text{кг/м}^2$ ;  $d = 2h_0 + 2h_3$  – толщина среднего слоя, м;  $h_0$  – толщина разобщающего слоя, м;  $E_0$  – величина характеризующая акустическое разобщение слоев сэндвич-панели, Па.

Введем величину  $E_0$ , которая характеризует степень акустического разобщения слоев сэндвич-панели:

$$E_0 = kE_d, \quad (23)$$

где  $E_d$  – динамический модуль упругости материала среднего слоя сэндвич-панели, Па;  $k$  – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий толщину разобщающего слоя между облицовкам и средним слоем сэндвич-панели ( $k \leq 1$ , см. рисунок 3.17).

График на рисунке 3.17 построен по результатам комплекса экспериментальных исследований звукоизоляции сэндвич-панелей с различной степенью акустического разобщения слоев:

- для сэндвич-панели с жестким склеиванием облицовок и среднего слоя по всей плоскости (акустическое разобщение слоев отсутствует) –  $k = 1$ ;
- для сэндвич-панели с акустическим разобщением в виде слоев упругого материала толщиной 1 мм –  $k = 0,5$ ;
- для сэндвич-панели с акустическим разобщением в виде слоев упругого материала толщиной 2 мм –  $k = 0,3$ ;
- для сэндвич-панели с акустическим разобщением в виде слоев упругого материала толщиной 3 мм –  $k = 0,2$ ;
- для сэндвич-панели с акустическим разобщением в виде слоев упругого материала толщиной 4 мм –  $k = 0,1$ ;

На рисунках 3.18 ÷ 3.21 приведены сравнения экспериментально и теоретически полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями. Теоретический расчет выполнен по методике, представленной в пункте 3.4. При этом резонансная частота системы  $f_p$  определялась по формуле (22).

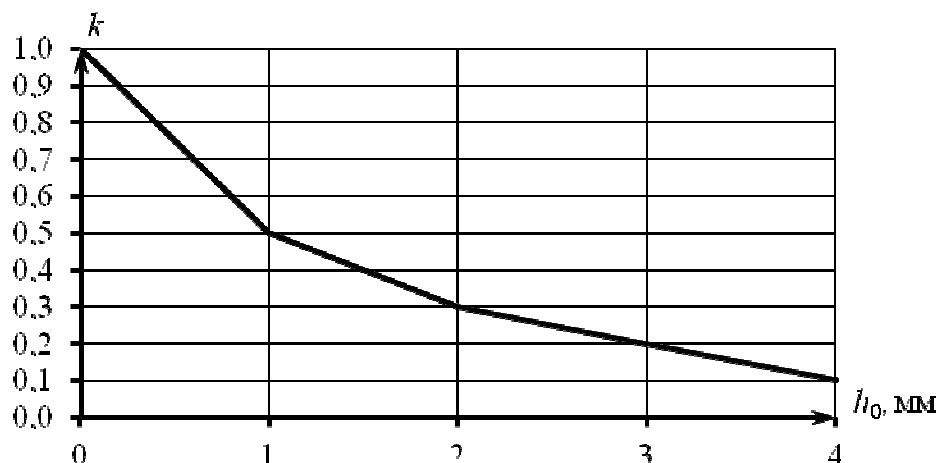


Рисунок 3.17 – Значения коэффициента  $k$  при различной толщине разобщающих слоев

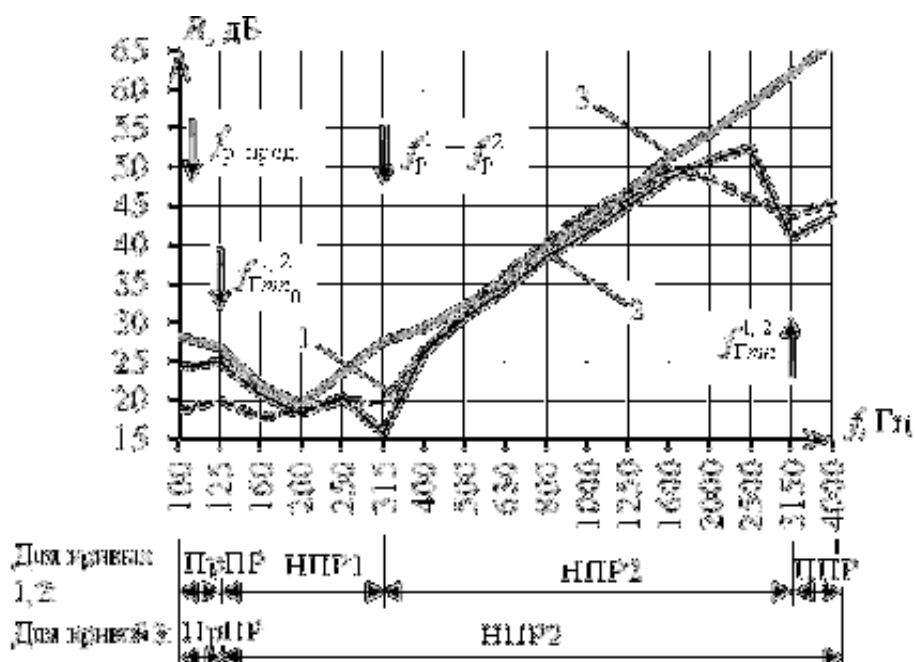


Рисунок 3.18 – Частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (размер 2,0 м × 1,2 м, облицовки из *OSB* ( $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 6,3 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 107 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) толщиной по 9 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )), акустическое разобщение в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по 4 мм): 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретические данные; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

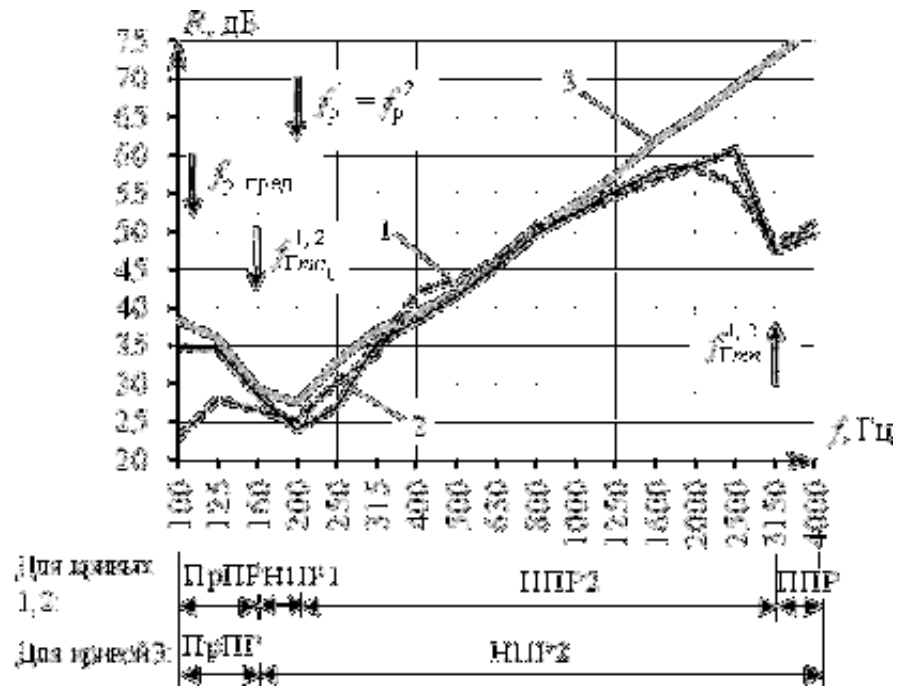


Рисунок 3.19 – Теоретический расчет звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (размер 2,0 м × 1,2 м, облицовки из ЦСП ( $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 12,5 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 347 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 3,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) толщиной по 10 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм, ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )), акустическое разобщение в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по 4 мм): 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретические данные; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Анализируя рисунки 3.17 ÷ 3.20, можно заключить, что разработанный метод позволяет рассчитать звукоизоляцию сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением с высокой степенью точности. Для всех рассмотренных ограждений наблюдается совпадение теоретически и экспериментально определенных резонансных частот системы «масса – упругость – масса», и характера частотной характеристики во всех рассматриваемых частотных диапазонах.

Значения звукоизоляции имеют неплохую сходимость. Для сэндвич-панели на рисунке 3.17:

- в диапазоне ПрПР ( $100 \text{ Гц} < f < 125 \text{ Гц}$ ) – 5 ÷ 6 дБ;
- в диапазоне НПР1 ( $125 \text{ Гц} < f < 315 \text{ Гц}$ ) – 1 ÷ 5 дБ;

- в диапазоне НПР2 ( $315 \text{ Гц} < f < 3150 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 6 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне ППР ( $f > 3150 \text{ Гц}$ ) –  $2 \text{ дБ}$ .

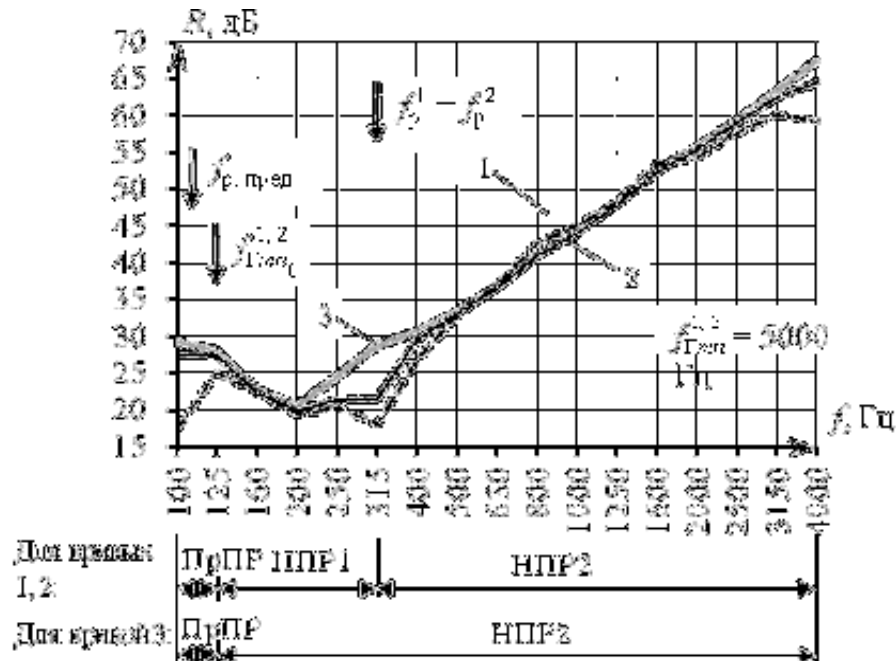


Рисунок 3.20 – Теоретический расчет звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (размер  $2,0 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$ , облицовки из ГФЛ ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 6,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 67 \text{ Па} \cdot \text{м}^2$ ,  $E_d = 3,4 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) толщиной по 6 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм, ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па} \cdot \text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )), акустическое разобшиение в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по 4 мм): 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретические данные; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Для сэндвич-панели на рисунке 3.18:

- в диапазоне ПрПР ( $100 \text{ Гц} < f < 160 \text{ Гц}$ ) –  $2 \div 10 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР1 ( $160 \text{ Гц} < f < 200 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 2 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР2 ( $315 \text{ Гц} < f < 3150 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 5 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне ППР ( $f > 3150 \text{ Гц}$ ) –  $1 \text{ дБ}$ .

Для сэндвич-панели на рисунке 3.19:

- диапазоне ПрПР ( $100 \text{ Гц} < f < 125 \text{ Гц}$ ) –  $3 \div 8 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР1 ( $125 \text{ Гц} < f < 315 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 3 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР2 ( $315 \text{ Гц} < f < 4000 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 5 \text{ дБ}$ .

Для сэндвич-панели на рисунке 3.20:

- диапазоне ПрПР ( $100 \text{ Гц} < f < 125 \text{ Гц}$ ) –  $5 \div 10 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР1 ( $125 \text{ Гц} < f < 200 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 10 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне НПР2 ( $200 \text{ Гц} < f < 3150 \text{ Гц}$ ) –  $1 \div 5 \text{ дБ}$ ;
- в диапазоне ППР ( $f > 3150 \text{ Гц}$ ) –  $1 \text{ дБ}$ .

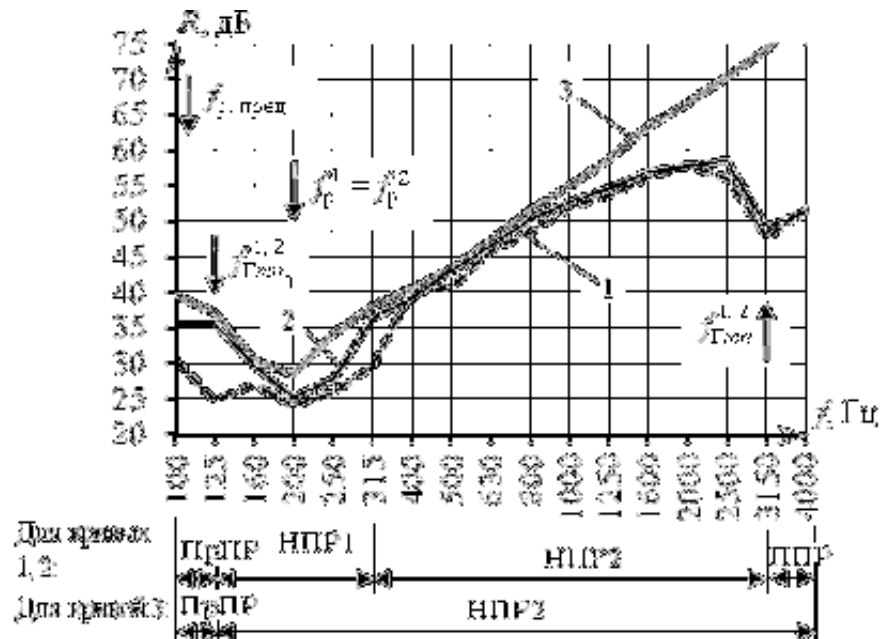


Рисунок 3.21 – Теоретический расчет звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (размер  $2,0 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$ , облицовки из ГВЛ ( $\rho = 1150 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 14,3 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 528 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 2,95 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) толщиной по  $12,5 \text{ мм}$ , средний слой из пенопласта толщиной  $50 \text{ мм}$ , ( $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $D = 92 \text{ Па}\cdot\text{м}^2$ ,  $E_d = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ )), акустическое разобшение в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по  $4 \text{ мм}$ ): 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретические данные; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

### Выводы по главе 3

На основании материала, изложенного в главе 3, можно сделать следующие  
ВЫВОДЫ:

1. Установлено, что сэндвич-панели имеют две области наибольших резервов повышения звукоизоляции, расположенные вблизи резонансных частот  $f_{Гmn}$  и  $f_p$ . Расположение области резервов повышения звукоизоляции вблизи частоты  $f_{Гmn}$  на частотной шкале определяется отношением цилиндрической (изгибной) жесткости и поверхностной плотности облицовок сэндвич-панели. Расположение области резервов повышения звукоизоляции вблизи частоты  $f_p$  на частотной шкале определяется параметрами среднего слоя, а также наличием акустического разобщения между облицовками и средним слоем сэндвич-панели.

2. Путем подробного анализа механизма прохождения звука через трехслойные сэндвич-панели определены основные способы снижения резонансного прохождения звука через сэндвич-панели путем использования внутренних резервов (без значительного увеличения массы и толщины): 1) подбор материала среднего слоя с низким динамическим модулем упругости ( $E_d$ ); 2) введение акустического разобщения между облицовками и средним слоем; 3) применение в качестве облицовок сэндвич-панелей листовых материалов с отношением  $\mu/D$  находящимся в диапазоне от  $2,3 \times 10^{-2}$  до  $3,6 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4$ .

3. Теоретически и экспериментально обоснован способ повышения звукоизоляции сэндвич-панелей путем акустического разобщения облицовок и среднего слоя.

4. Получено новое аналитическое выражение для определения резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панелей со слоями акустического разобщения, с учетом их толщины

5. На основе теории самосогласования волновых полей разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с учетом акустического разобщения слоев.

## **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ В РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ КАМЕРАХ**

Теоретические исследования, выполненные в главах 1 – 3, показывают, что звукоизоляция сэндвич-панелей с жестким средним слоем зависит от физико-механических характеристик материалов, применяемых для изготовления облицовок и среднего слоя, конструктивного решения сэндвич-панели (наличие или отсутствие акустического разобщения слоев), геометрических размеров ограждения. Данные параметры оказывают комплексное влияние на звукоизолирующую способность сэндвич-панелей, которое требует подробного экспериментального исследования. В главе приводится методика проведения экспериментальных исследований в больших реверберационных камерах. Полученные результаты дают возможность оценить степень влияния указанных выше параметров на звукоизолирующую способность исследуемых ограждений. По результатам экспериментальных исследований установлена степень достоверности предложенной в работе теоретической модели при оценке звукоизолирующих свойств сэндвич-панелей. Для оценки применимости разработанных ограждений в строительстве проведены экспериментальные исследования звукоизоляции в натуральных условиях.

### **4.1 Методика проведения исследований звукоизоляции сэндвич-панелей**

Экспериментальные исследования по определению звукоизоляции ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей проведены в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ и больших реверберационных камерах лаборатории акустики Вологодского государственного университета (ВоГУ). Конструктивное решение камер лаборатории акустики ННГАСУ и ВоГУ показано на рисунках 4.1 и 4.2 соответственно. Неправильная форма является условием создания диффузного звукового поля в измерительных



камерах и предотвращения образования в них стоячих волн. Фотографии реверберационных камер, приведены в приложении 8 (рисунки 1 ÷ 5).

В лабораториях акустики ННГАСУ и ВоГУ камеры низкого уровня (КНУ) и камеры высокого уровня (КВУ) выполнены на самостоятельных фундаментах (см. рисунки 4.1 и 4.2) для их акустического разобщения и предотвращения косвенной передачи звука.

Определение собственной звукоизоляции исследуемых конструкций на основе сэндвич-панелей проведено по стандартной методике ГОСТ [16].

Для измерений звукоизоляции использовалась прецизионная акустическая измерительная аппаратура фирм «*Soundbook*», «*RFT*» и «*Larson & Davis*». Измерительная установка включает в себя два электроакустических тракта, блок-схемы измерительных установок приведены на рисунках 4.3 и 4.4.

Передающий тракт:

- генератор «белого» шума типа 03004 заводской № 12021 (свидетельство о поверке № 000058823 от 25.12.2015 г., выданное Нижегородским ЦСМС, действительно до 25.12.2016 г.);
- третьоктавный фильтр типа 01018 заводской № 41096 (свидетельство о поверке № 000058822 от 25.12.2015 г., выданное Нижегородским ЦСМС, действительно до 25.12.2016 г.);
- предусилитель типа 00011, два усилителя мощности *LV* 103 и шесть громкоговорителей мощностью 100 Вт каждый.

Приемный тракт:

- шумомер-анализатор спектра «*Larson & Davis*» типа 2900*B* заводской №1089 с капсулями микрофона типа 2559 заводской № 2879 и № 2832, предусилителем типа КММ 400 заводской № 01154 и № 01179 (свидетельство о поверке № 30 000058741 от 25.12.2015 г., выданное Нижегородским ЦСМС, действительно до 26.12.2016 г.).

Повторяемость измерения изоляции воздушного шума в рабочем диапазоне частот при доверительной вероятности 0,95 отвечает требованиям п. 10 [16].

Перед проведением измерений и по их окончании выполнялась калибровка приемной измерительной установки с помощью калибратора «*Larson & Davis*» типа *CAL* 200 заводской № 2975 (свидетельство о поверке № 30 000058742 от

25.12.2015 г., выданное Нижегородским ЦСМС, действительно до 26.12.2016 г.). Измерения проводились в диапазоне частот  $100 \div 4000$  Гц.

При проведении измерений в камере высокого уровня создавались необходимые уровни звукового давления в пределах  $100 \div 120$  дБ. В камерах низкого уровня полезные сигналы превышали собственные шумы по уровню не менее чем на 25 дБ на всех частотах нормируемого диапазона ( $100 \text{ Гц} \div 3150 \text{ Гц}$  [50]).

Средние уровни звукового давления ( $L_m$ , дБ) в измерительных камерах рассчитывались по формуле [50]:

$$L_m = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} \right), \quad (4.1)$$

где  $n$  – количество точек измерения в измерительных камерах ( $n = 8$  для каждой камеры), шт.;  $L_i$  – уровень звукового давления в  $i$ -той измерительной точке, дБ.

Вычисление звукоизоляции ограждающих конструкций производился в соответствии с требованиями [50] по формуле:

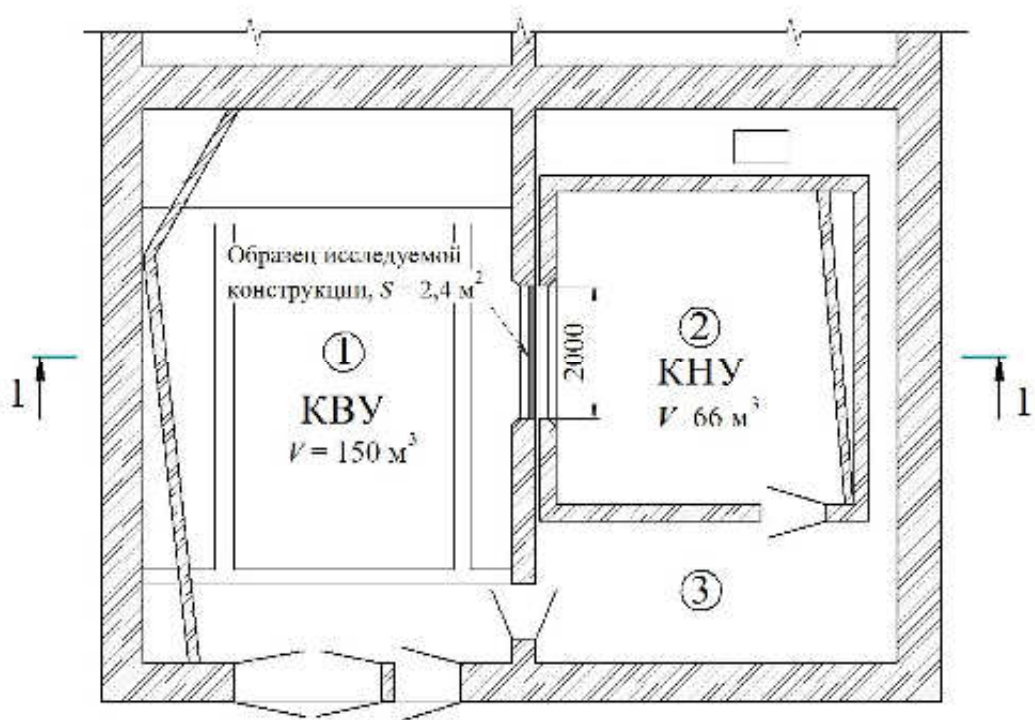
$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}, \quad (4.2)$$

где  $L_1$  – средний уровень звукового давления в КВУ, дБ;  $L_2$  – средний уровень звукового давления в КНУ, дБ;  $S$  – площадь исследуемого ограждения, м;  $A$  – общее звукопоглощение в КНУ, м<sup>2</sup>.

$$A = \frac{0,16V}{T}, \quad (4.3)$$

где  $V$  – объем КНУ, м<sup>3</sup>;  $T$  – среднее время реверберации, с.

## План



## Разрез 1 - 1

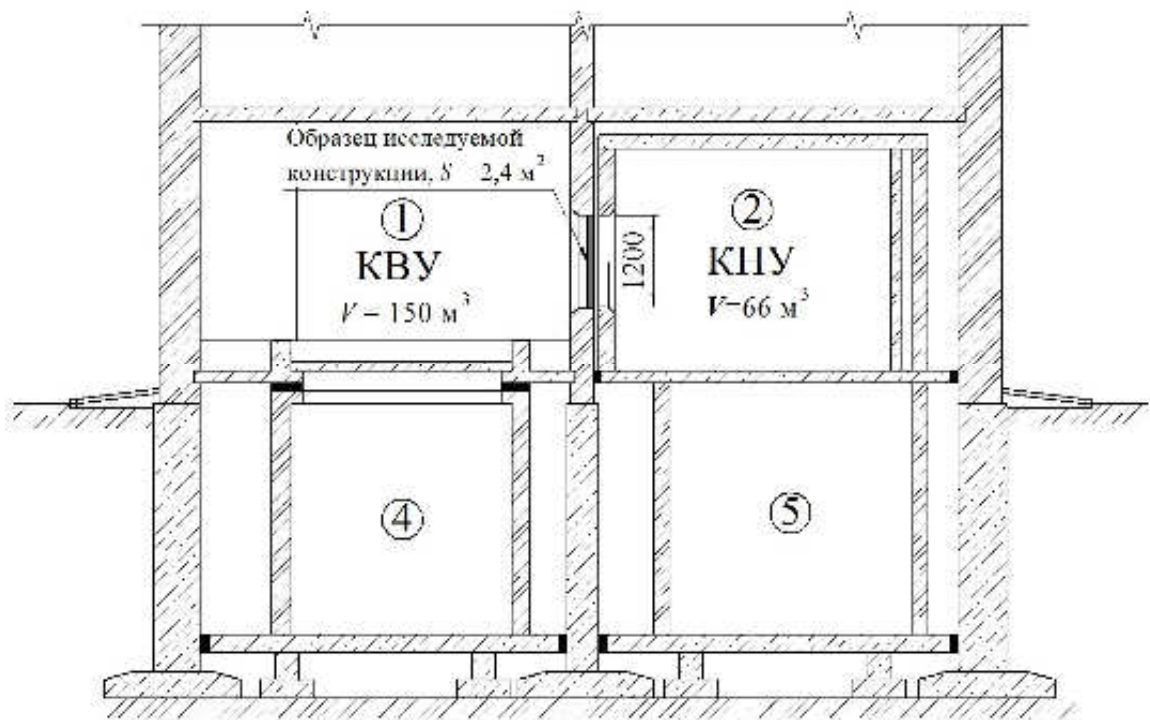
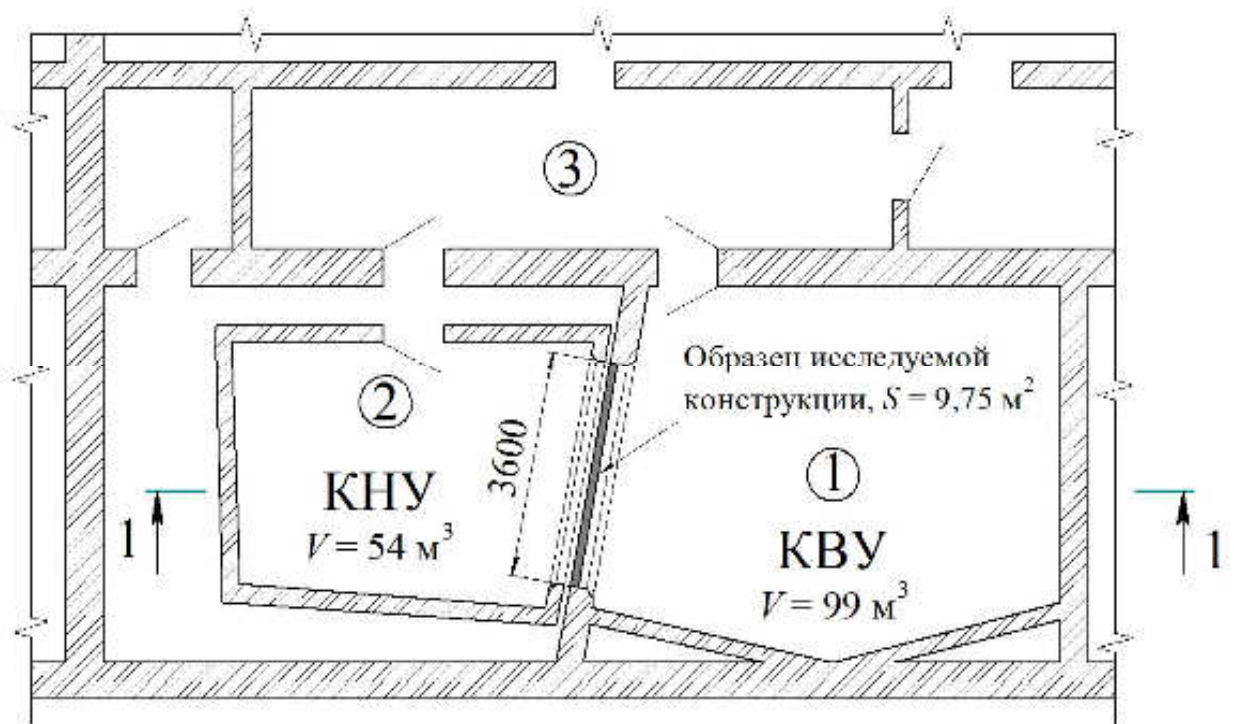


Рисунок 4.1 – Большие реверберационные камеры лаборатории акустики ННГАСУ:  
 1 – камера высокого уровня ( $V = 150 \text{ м}^3$ ); 2 – камера низкого уровня ( $V = 66 \text{ м}^3$ );  
 3 – аппаратная; 4 – камера низкого уровня, ( $V = 81 \text{ м}^3$ ); 5 – заглушенная камера

## План



## Разрез 1 – 1

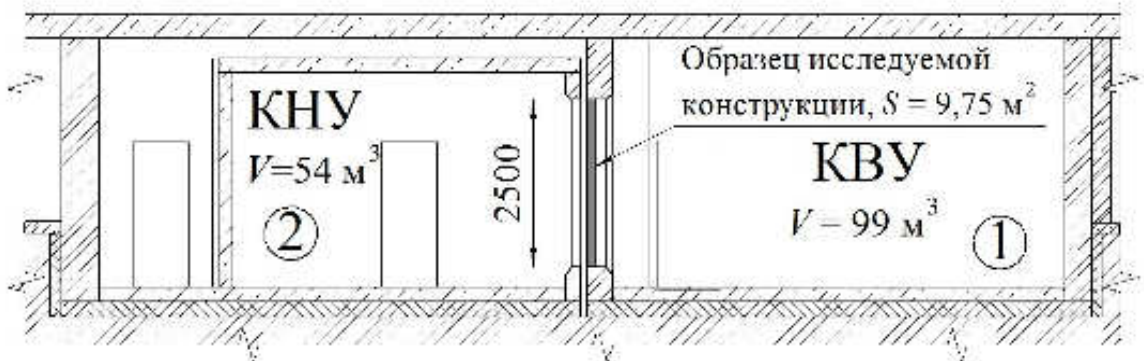


Рисунок 4.2 – Большие реверберационные камеры лаборатории акустики ВоГУ:  
 1 – камера высокого уровня ( $V = 99 \text{ м}^3$ ); 2 – камера низкого уровня ( $V = 54 \text{ м}^3$ );  
 3 – аппаратная

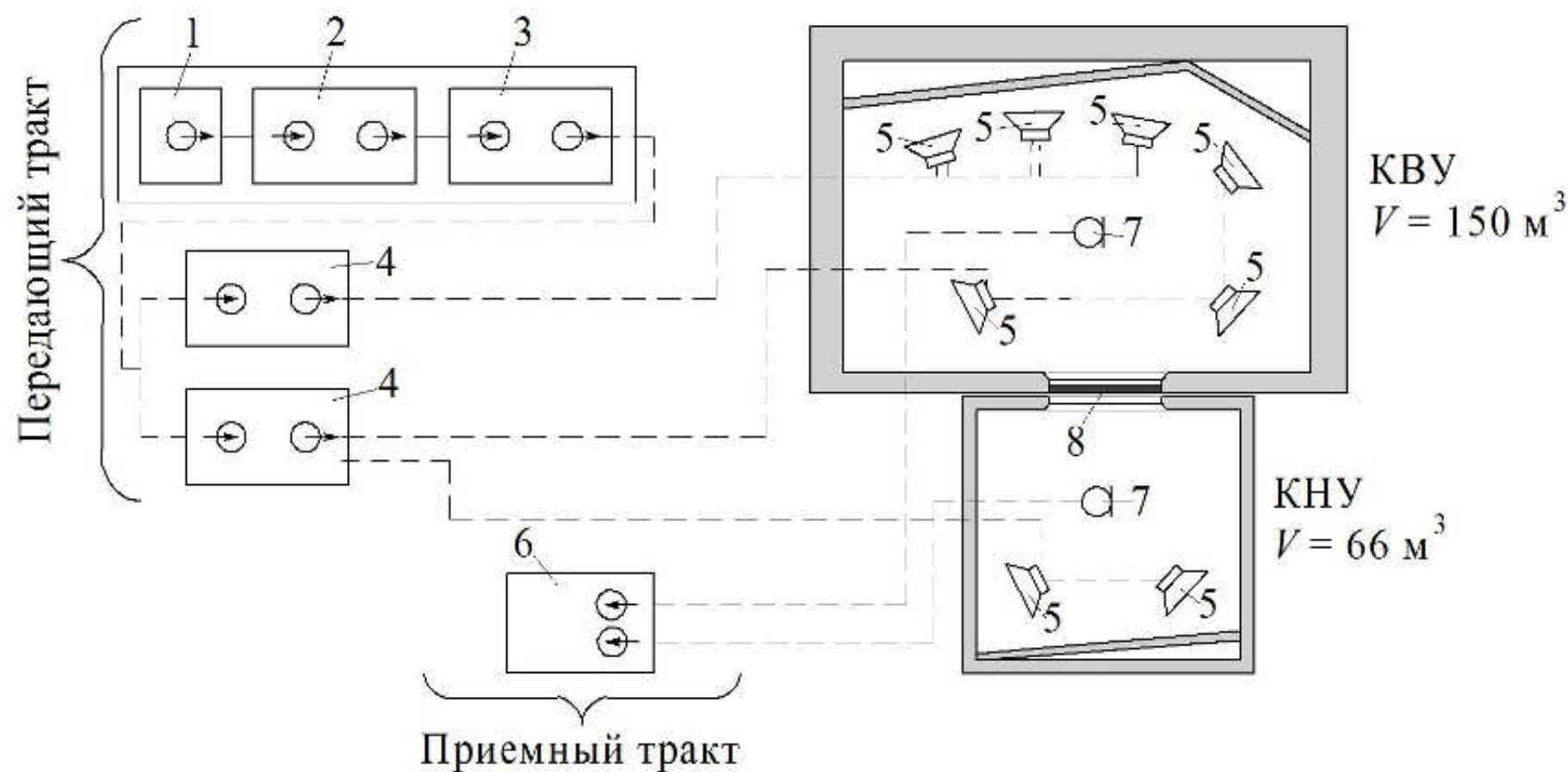


Рисунок 4.3 – Блок-схема электроакустической измерительной установки лаборатории акустики ННГАСУ: 1 – генератор «белого» шума 03004; 2 – третьоктавный фильтр 01018; 3 – предусилитель 00011; 4 – усилители мощности LV 103; 5 – громкоговоритель; 6 – шумомер-анализатор спектра *Larson & Davis 2900B*; 7 – конденсаторный микрофон типа 2559 с предусилителем *KMM 400*; 8 – исследуемое ограждение

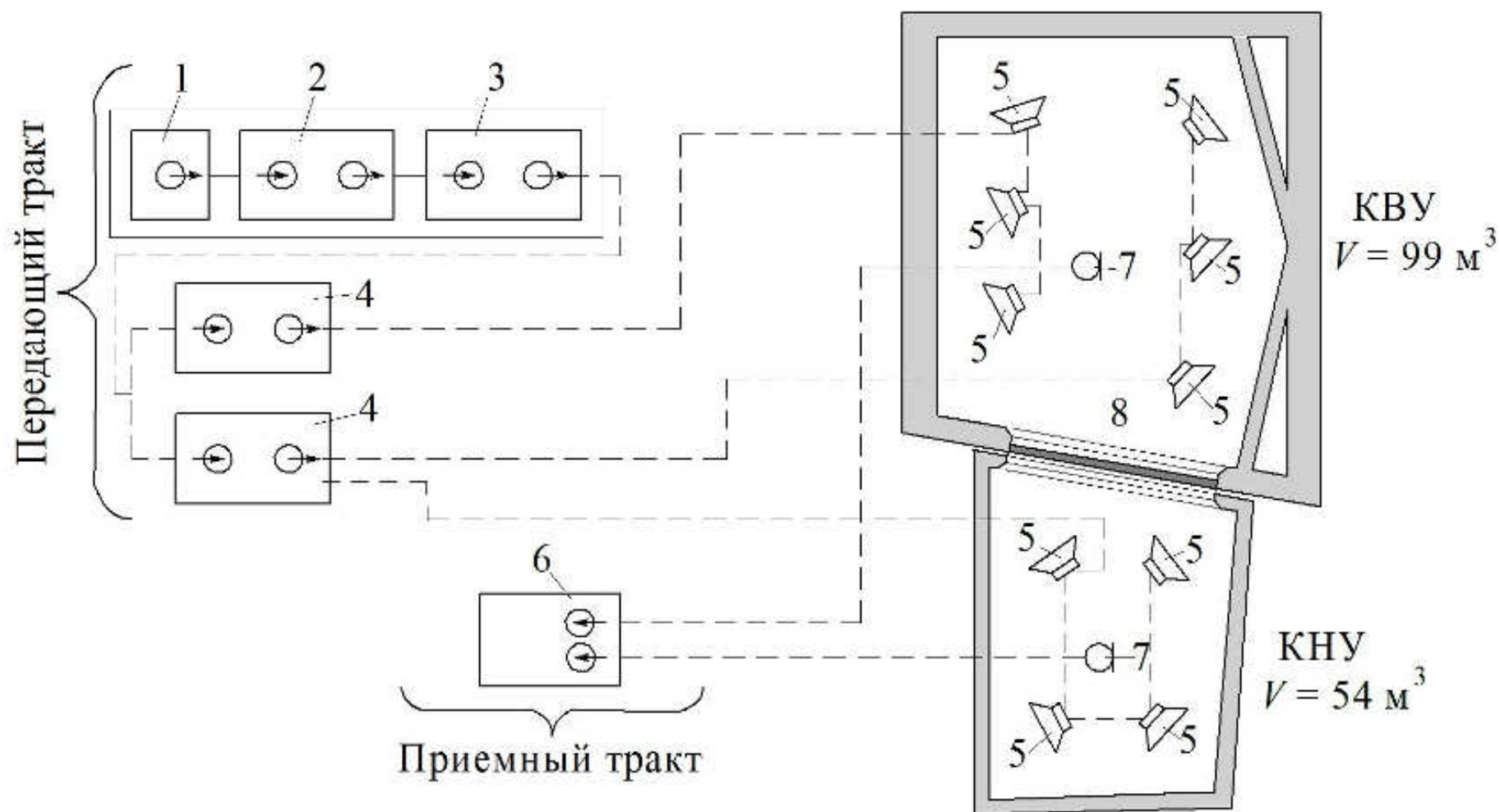


Рисунок 4.4 – Блок-схема электроакустической измерительной установки лаборатории акустики ВоГУ: 1 – генератор «белого» шума 03004; 2 – третьоктавный фильтр 01018; 3 – предусилитель 00011; 4 – усилители мощности LV 103; 5 – громкоговоритель; 6 – шумомер-анализатор спектра *Larson & Davis* 2900B; 7 – конденсаторный микрофон типа 2559 с предусилителем KMM 400; 8 – исследуемое ограждение

Уровни звукового давления  $L_1$  и  $L_2$  вычислялись как среднее значение из измеренных уровней в соответствии с требованиями [16]. Необходимое число измерений в КНУ принималось в соответствии с экспериментальными данными, полученными проф. Бобылевым В.Н. [5].

Проф. Кочкиным А.А, [32], [33] установлено, что измерения значений звукового давления на частотах  $f > f_{\text{гр. дифф.}}$  и  $f < f_{\text{гр. дифф.}}$  нужно проводить в восьми точках КВУ и КНУ.

Граничная частота диффузности звукового поля определялась по формуле [16]:

$$f_{\text{гр.дифф.}} = 125 \sqrt{\frac{180}{V}}, \quad (4.4)$$

Для больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ:

- КВУ –  $f_{\text{гр. дифф.}} = 133$  Гц;
- КНУ –  $f_{\text{гр. дифф.}} = 175$  Гц.

Для больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ:

- КВУ –  $f_{\text{гр. дифф.}} = 152$  Гц;
- КНУ –  $f_{\text{гр. дифф.}} = 187$  Гц.

Стандартное время реверберации в КНУ на каждой частоте исследуемого диапазона определялось как среднеарифметическое по четырем точкам измерений.

#### **4.2. О надежности и точности измерений звукоизоляции сэндвич-панелей**

Для проведения измерений звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах с необходимой надежностью и точностью требуется соблюдение следующих условий: наличие диффузного звукового поля в камерах, отсутствие обходных путей между КВУ и КНУ, уровень звукового давления в КВУ порядка 100 дБ, уровень помех не должен превышать 20 дБ; наличие малого звукопоглощения в КНУ.

Измерительные установки и реверберационные камеры лаборатории акустики ННГАСУ и ВоГУ удовлетворяют требованиям [16] для определения

звукоизоляции ограждающих конструкций в нормируемом диапазоне частот (кроме размера образца и соотношения объемов КВУ и КНУ для измерений, проведенных в лаборатории акустики ННГАСУ). Применяемая акустическая аппаратура обеспечивает создание в камерах уровней звукового давления в пределах  $100 \div 120$  дБ в данном диапазоне. Измерительные приборы обеспечивают стабильный прием звукового сигнала с погрешностью не более  $1,0 \div 1,5$  дБ при уровне помех (собственных шумов) менее 15 дБ. Подробные экспериментальные исследования звукового поля в реверберационных камерах ННГАСУ проведены проф. Бобылевым В. Н. [9]. Для оценки диффузности звукового поля в больших камерах уровни звукового давления измерялись в 220 точках в КНУ и в 260 точках в КВУ. По результатам проведенных измерений была определена величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления. Аналогичные исследования для больших реверберационных камер ВоГУ проведены проф. Кочкиным А. А. [32], [33], [35].

На рисунках 4.5 и 4.6 приведены результаты оценки диффузности поля в использованных для проведения экспериментальных исследований звукомерных камерах [32], [33], [36].

Измерения времени стандартной реверберации в больших реверберационных камерах показали, что оно изменяется в диапазоне  $2 \div 5$  сек. Это свидетельствует о малом звукопоглощении в камерах низкого уровня.

Точность проводимых измерений определяется величиной суммарной погрешности, которая для больших реверберационных камер ННГАСУ и ВоГУ составляет  $1 \div 2$  дБ при доверительной вероятности 0,95.

Проведенное рассмотрение подтверждает наличие необходимых условий, которые обеспечивают точное и надежное измерение звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах лабораторий акустики ННГАСУ и ВоГУ.



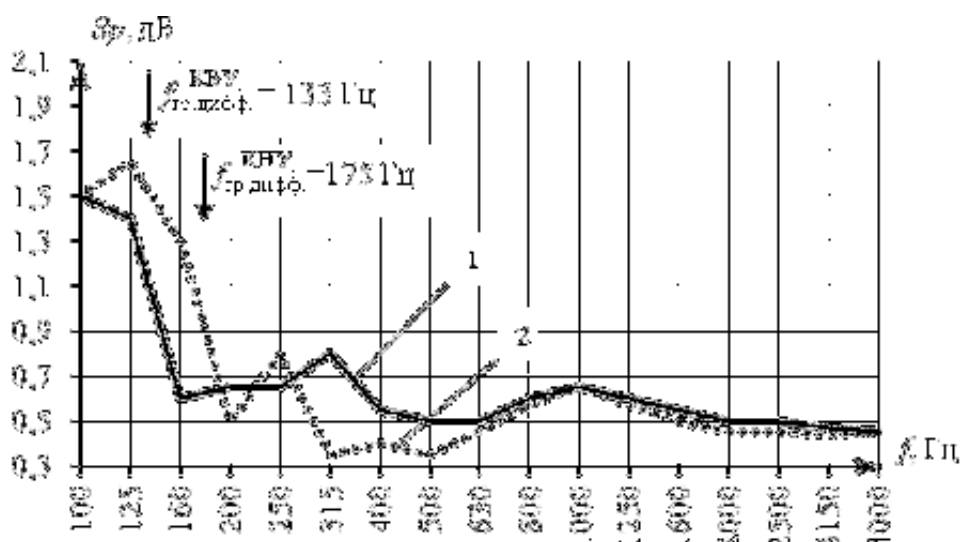


Рисунок 4.5 – Величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ: 1 – для КВУ ( $V = 150 \text{ м}^3$ ); 2 – для КНУ ( $V = 66 \text{ м}^3$ )

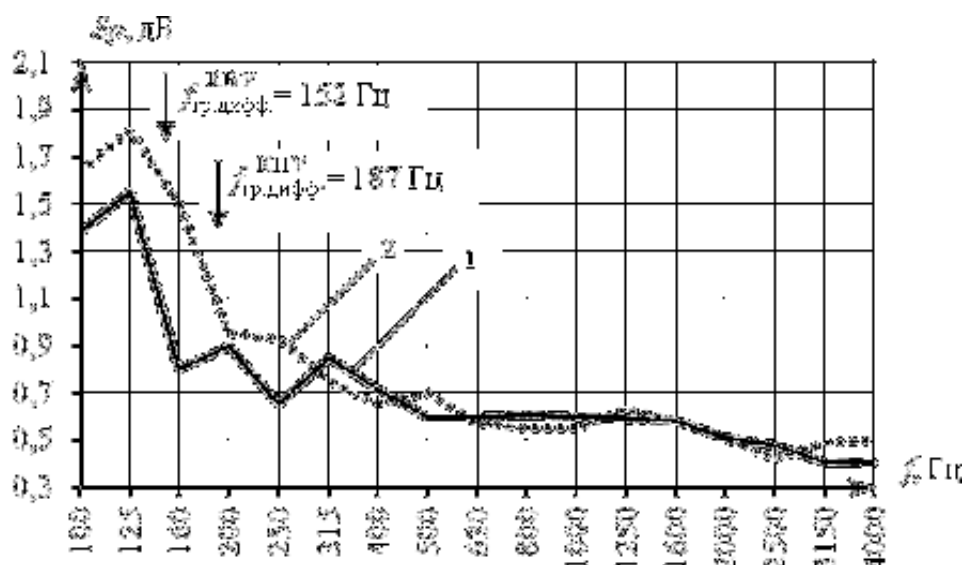


Рисунок 4.6 – Величина среднеквадратического отклонения пространственного распределения звукового давления в больших реверберационных камерах ВоГУ: 1 – для КВУ ( $V = 99 \text{ м}^3$ ); 2 – для КНУ ( $V = 54 \text{ м}^3$ )

### 4.3 Программа экспериментальных исследований факторов, влияющих на звукоизоляцию сэндвич-панелей

С целью получения надежных и достоверных результатов при проектировании сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением следует учитывать большое количество факторов, влияющих на звукоизолирующую способность данных ограждений. В таблице 4.1 представлена программа исследования влияния параметров и физико-механических характеристик сэндвич-панелей на их звукоизолирующую способность.

Таблица 4.1 – Влияние параметров и физико-механических характеристик сэндвич-панелей на их звукоизолирующую способность

Вид образца	Вид исследований параметров и физико-механических характеристик на звукоизоляцию
1	2
1. Однослойные ограждения	1.1 Оценка влияния отношения поверхностной плотности и цилиндрической жесткости облицовок $\mu/D$ на звукоизоляцию сэндвич-панелей
2. Ограждения с воздушным промежутком	2.1 Оценка влияния жесткости связи между облицовками на звукоизоляцию сэндвич-панелей 2.2 Определение предельных значений резонансной частоты системы «масса – упругость – масса»
3. Сэндвич-панели с жесткой склейкой слоев	3.1 Оценка влияния динамического модуля упругости среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей 3.2 Оценка влияния толщины среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей 3.3 Оценка влияния поверхностной плотности облицовок на звукоизоляцию сэндвич-панелей

1	2
4. Сэндвич-панели с акустическим разобщением	<p>4.1 Оценка влияния способа склеивания слоев на звукоизоляцию сэндвич-панелей</p> <p>4.2 Оценка влияния акустического разобщения на звукоизоляцию сэндвич-панелей</p> <p>4.3 Оценка влияния параметров материала разобщающих слоев на звукоизоляцию сэндвич-панелей</p>

#### 4.3.1 Экспериментальные исследования влияния материалов среднего слоя и облицовок на звукоизоляцию сэндвич-панелей

На рисунках 4.7 ÷ 4.9 приведены результаты экспериментальных исследований звукоизоляции сэндвич-панелей в сравнении с однослойными ограждениями и двухслойными ограждениями с воздушным промежутком.

Анализируя рисунки 4.7 ÷ 4.9, можно заключить, что внесение жесткого, легкого (кривые 2) среднего слоя (пенопласт толщиной 50 мм) в конструкцию ограждения значительно влияет на звукоизоляцию, по сравнению с образцом их двух облицовок с воздушным промежутком той же толщины (кривые 1). Для всех трех образцов сэндвич-панелей с облицовками из ГФЛ, ГВЛ, ЦСП и средним слоем из пенопласта (кривые 2) наблюдается существенное снижение звукоизоляции в области средних частот вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса», ( $f_p^2$ ). Звукоизоляция вблизи данной резонансной частоты при этом опускается до значений ниже звукоизоляции однослойного ограждения, представляющего собой одну облицовку рассматриваемой сэндвич-панели (кривые 3). По сравнению с двойным ограждением с воздушным промежутком в диапазоне частот 200 ÷ 3150 Гц для сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ звукоизоляция уменьшается на 5 ÷ 18 дБ на частотах 630 ÷ 1600 Гц; для сэндвич-панели с

облицовками из ГФЛ звукоизоляция уменьшается на 3 ÷ 13 дБ на частотах 250 ÷ 1600 Гц; для сэндвич-панели с облицовками из ЦСП звукоизоляция уменьшается на величину до 16 дБ на частотах 250 ÷ 1600 Гц.

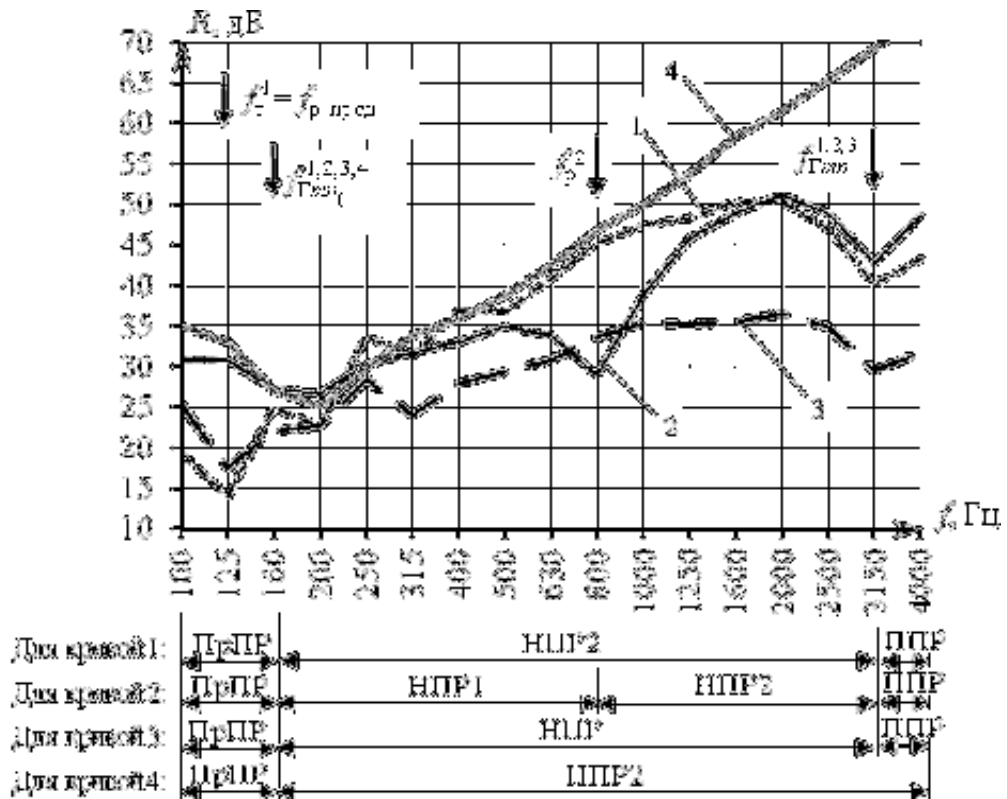


Рисунок 4.7 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений (размер всех образцов 2,0 м × 1,2 м): 1 – двойного ограждения с облицовками из листов ЦСП толщиной по 12,5 мм установленных с воздушным промежутком толщиной 50 мм; 2 – сэндвич-панели с облицовками из ЦСП толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм (слои склеены по всей плоскости); 3 – однослойного ограждения из листа ЦСП толщиной 12,5 мм; 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

На низких частотах, вблизи резонансной частоты  $f_p^1$  двойного ограждения с воздушным промежутком, звукоизоляция сэндвич-панели, напротив – повышается. В диапазоне частот 100 ÷ 160 Гц для сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ звукоизоляция увеличивается на 2 ÷ 5 дБ на частотах 100 ÷ 500 Гц; для сэндвич-панели с облицовками из ГФЛ звукоизоляция увеличивается на величину до 8 дБ на частотах 100 ÷ 200 Гц; для сэндвич-панели с облицовками из ЦСП звукоизоляция увеличивается на 3 ÷ 13 дБ на частотах 100 ÷ 200 Гц.

Для всех исследованных конструкций звукоизоляция образца из двух облицовок с воздушным промежутком превышает звукоизоляцию трехслойной сэндвич-панели и приближается к её предельной звукоизоляции в области средних частот. Данный эффект объясняется отсутствием жесткой связи между двумя слоями листового ограждения.

Для всех серий экспериментов резонансная частота ППР ( $f_{Гmn}$ ) сэндвич-панелей и двойных ограждений с воздушным промежутком совпадает с резонансной частотой однослойного ограждения, представляющего собой облицовку сэндвич-панели.

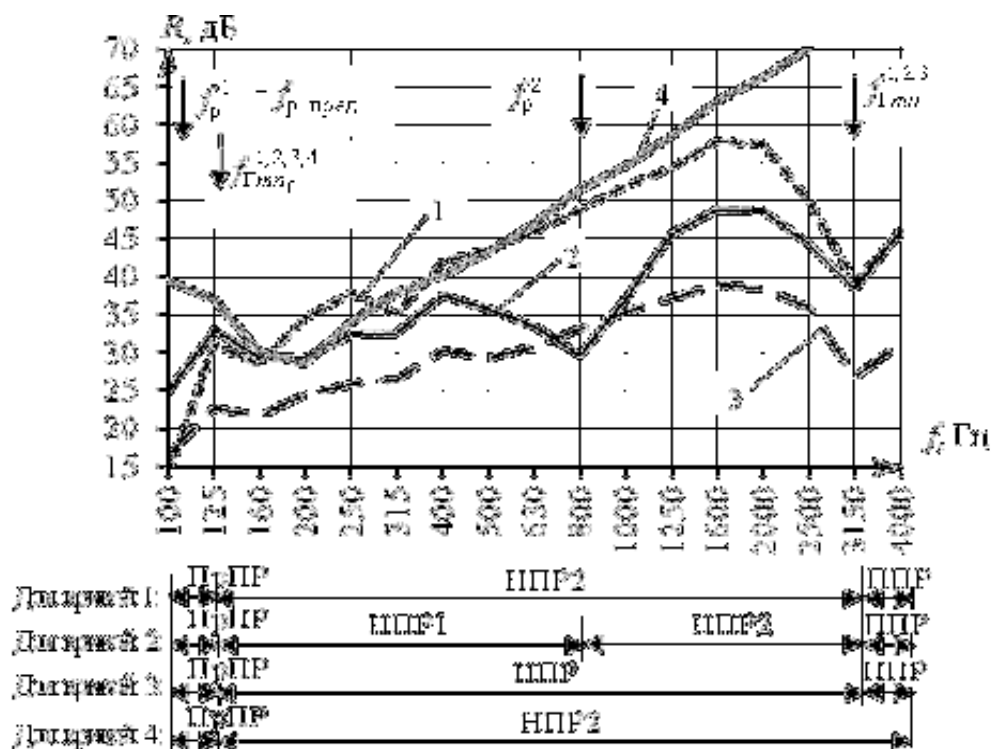


Рисунок 4.8 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений (размер всех образцов 2,0 м × 1,2 м): 1 – двойного ограждения с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм, установленных с воздушным промежутком толщиной 50 мм; 2 – сэндвич-панели с облицовками из ГВЛ толщиной 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм (слои склеены по всей плоскости); 3 – однослойного ограждения из листа ГВЛ толщиной 12,5 мм; 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Анализируя рисунки 4.7 ÷ 4.10 можно подтвердить вывод, сделанный на основании теоретических исследований в пункте 3.2.1, о том, что резкое снижение звукоизоляции в области резонансной частоты системы «масса-упругость-масса»,

находящейся для сэндвич-панелей толщиной  $50 \div 150$  мм в области средних частот, является основным фактором, негативно влияющим на их звукоизоляцию.

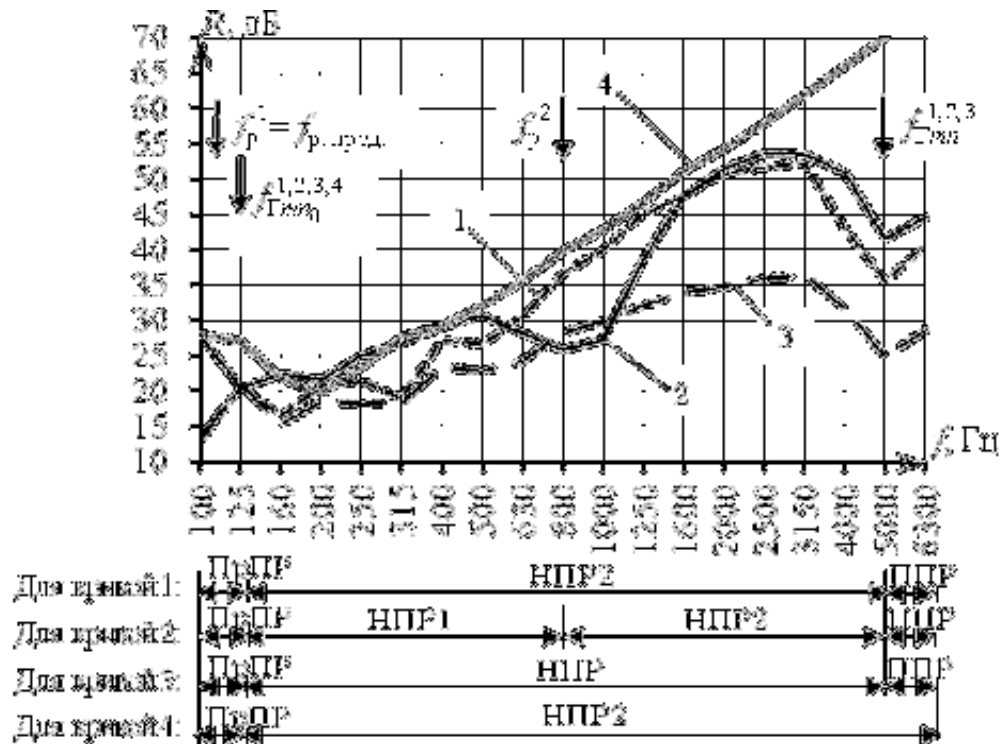


Рисунок 4.9 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений (размер всех образцов  $2,0 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$ ): 1 – двойного ограждения с облицовками из листов ГФЛ толщиной по 6 мм установленных с воздушным промежутком толщиной 50 мм; 2 – сэндвич-панели с облицовками из ГФЛ толщиной по 6 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм (слои склеены по всей плоскости); 3 – однослойного ограждения из листа ГФЛ толщиной 6 мм; 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

#### 4.3.2 Экспериментальные исследования влияния жесткости среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей

В п. 3.2.3 установлено, что для увеличения звукоизоляции трехслойного ограждения необходимо смещать область повышенного прохождения звука, расположенную вблизи резонансной частоты  $f_p$ , в область более низких частот.

Данного результата можно добиться непосредственным изменением жёсткости материала среднего слоя – используя в качестве среднего слоя аналогичный материал с меньшим динамическим модулем упругости ( $E_d$ ).

Эксперименты по исследованию звукоизоляции трёхслойного ограждения проводились совместно с кафедрой высокомолекулярных соединений и коллоидной химии ННГУ им. Лобачевского. Для проведения эксперимента по исследованию влияния жёсткости заполнителя на звукоизоляцию трёхслойной панели были изготовлены образцы сэндвич-панелей с облицовками из ГВЛ и средним слоем из вспененного полиуретана с различным динамическим модулем упругости. Полученные частотные характеристики звукоизоляции приведены на рисунке 4.10.

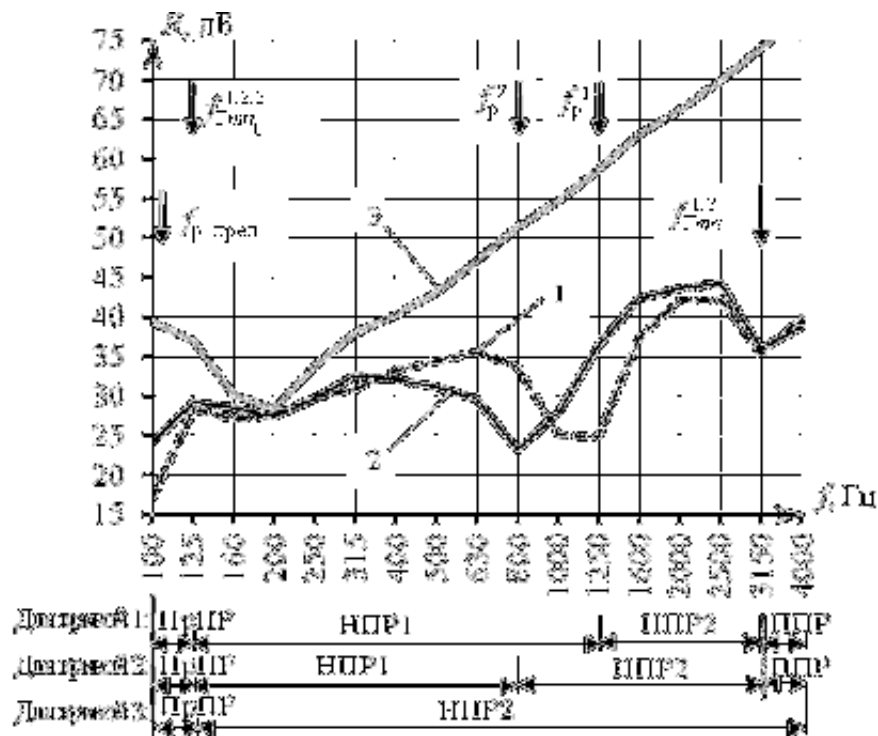


Рисунок 4.10 – Сравнение экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции двух образцов сэндвич-панелей (размер 2,0 м × 1,2 м) с различной жесткостью среднего слоя (облицовки из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм со средним слоем из полиуретана толщиной 60 мм): 1 – средний слой с динамическим модулем упругости  $E_d = 2,5 \cdot 10^6$  Па; 2 – средний слой с динамическим модулем упругости  $E_d = 6,9 \cdot 10^6$  Па; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Возможность рецептурного изменения свойств полиуретана в широком диапазоне делает его наиболее подходящим материалом для цели проводимых исследований. Полиуретан получался по реакции присоединения изоцианата к полиолу с добавками, изменяющими его динамический модуль упругости. Полученные образцы, представляющие собой сэндвич-панели размером  $2,0 \times 1,2$  м, с облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм и среднего слоя (полиуретана толщиной 60 мм), испытывались в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ.

Динамический модуль упругости ( $E_d$ ) полиуретана, полученный экспериментально в ННГУ им. Лобачевского для образца №1 (кривая 1 на рисунке 4.10) составляет  $E_d = 2,5 \cdot 10^6$  Па, для образца №2 (кривая 2 на рисунке 4.10)  $E_d = 6,9 \cdot 10^6$  Па. Протоколы проведённых испытаний по определению динамического модуля упругости заполнителя представлены в приложении 5. Схемы установки образцов в проёме больших камер лаборатории акустики ННГАСУ приведены в приложении 9 (рисунки 1 и 2).

Анализируя рисунок 4.10, можно заключить, что изменение жёсткости среднего слоя из пенополиуретана неоднозначно влияет на звукоизоляцию сэндвич-панели. При уменьшении жёсткости среднего слоя происходит смещение резонансной частоты всей конструкции (системы «масса – упругость – масса») с частоты  $f_p^1 = 1250$  Гц на частоту  $f_p^2 = 800$  Гц. При этом расширяется частотный диапазон НПР2 и сужается диапазон НПР1. В области средних частот, в диапазоне НПР2 от резонансной частоты всей системы  $f_p^1$  до резонансной частоты  $f_{Гmn}$  происходит увеличение звукоизоляции на  $3 \div 10$  дБ. В области НПР1, на частотах ниже резонансной частоты  $f_p^2$  звукоизоляция сэндвич-панели уменьшается на  $5 \div 12$  дБ. В области ППР звукоизоляция не зависит от динамического модуля упругости материала среднего слоя.

Проведенный эксперимент подтверждает выводы п. 3.2.3, сделанные по результатам теоретических исследований. Можно заключить, что уменьшение динамического модуля упругости материала среднего слоя сэндвич-панели позволяет сместить область повышенного прохождения звука расположенную вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ( $f_p$ ) в область



более низких частот. Однако даже значительное уменьшение  $E_d$  (в 2,8 раза), имевшее место в эксперименте, не привело к увеличению индекса изоляции воздушного шума ( $R_w$ ) сэндвич панели:  $R_w^1 = R_w^2 = 34$  дБ.

Снижение модуля упругости материала среднего слоя сэндвич-панели не является достаточным условием для значительного повышения звукоизоляции сэндвич-панели, но может применяться в комплексе мер, направленных на вывод резонансной частоты  $f_p$  за пределы нормируемого диапазона частот.

#### **4.3.3 Экспериментальные исследования влияния акустического разобщения облицовок и среднего слоя на звукоизоляцию сэндвич-панелей**

На основании теоретических исследований, проведенных в п. 3.2.3, было сделано предположение, что для эффективного использования резервов повышения звукоизоляции сэндвич-панелей необходимо использовать акустическое разобщение облицовок и среднего слоя.

Для проверки данного предположения была проведена серия экспериментов. Измерялась звукоизоляция сэндвич-панелей с облицовками из ГВЛ, толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм при различных вариантах соединения слоев между собой. Исследовались следующие образцы: 1) сэндвич-панель в которой облицовки, жестко склеены со средним слоем по всей плоскости эпоксидным клеем; 2) сэндвич-панель в которой одна облицовка склеена со средним слоем по всей плоскости, а вторая облицовка не склеена со средним слоем; 3) сэндвич-панель в которой об облицовки не склеены со средним слоем. Полученные в результате экспериментов частотные характеристики звукоизоляции приведены на рисунке 4.11. Схемы установки образцов в проёме больших камер лаборатории акустики ННГАСУ приведены в приложении 9 (рисунки 3, 4 и 5).

Из рисунка 4.11 видно, что для сэндвич-панели, в которой облицовки жёстко склеены со средним слоем по всей плоскости (кривая 1), резонансная частота системы  $f_p^1 = 800$  Гц. В случае, если одна облицовка сэндвич-панели не склеена со средним слоем (кривая 2), резонансная частота системы смещается на частоту

$f_p^2 = 315$  Гц, расширяя частотный диапазон НПР2 до области  $315 \div 3150$  Гц. При этом в данном диапазоне частот происходит увеличение звукоизоляции ограждения на  $2 \div 15$  дБ.

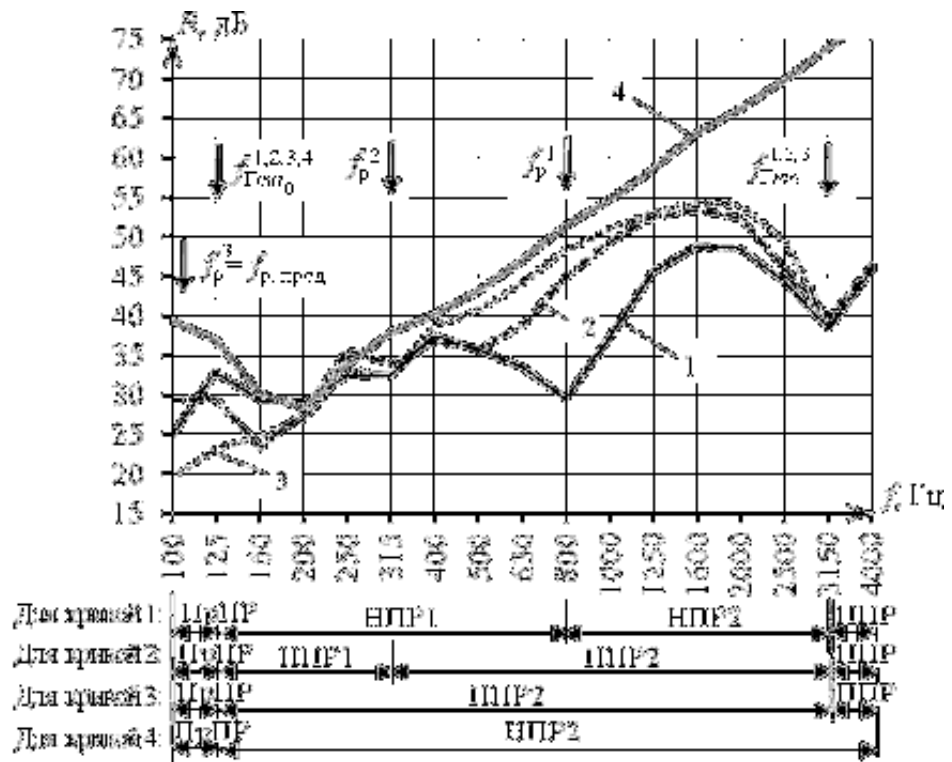


Рисунок 4.11 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панелей (размер  $2,0 \text{ м} \times 1,2 \text{ м}$ ) с различными вариантами соединения слоев между собой (облицовки из листов ГВЛ толщиной по  $12,5 \text{ мм}$ , средний слой из пенопласта толщиной  $50 \text{ мм}$ ): 1 – облицовки, жестко склеены со средним слоем по всей плоскости; 2 – одна облицовка склеена со средним слоем по всей плоскости, а вторая облицовка не склеена со средним слоем; 3 облицовки не склеены со средним слоем; 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

В случае, если обе облицовки сэндвич-панели не склеены со средним слоем (кривая 3), резонансная частота системы вплотную приближается к предельной резонансной частоте для рассматриваемой сэндвич-панели ( $f_{p, \text{пред.}} = 100 \text{ Гц}$ ). Область НПР2 при этом расширяется на весь нормируемый диапазон частот, происходит значительное увеличение звукоизоляции на  $2 \div 19 \text{ дБ}$ . Звукоизоляция приближается к своим предельным значениям (кривая 4 на рисунке 4.11).

В области выше резонансной частоты ППР ( $f_{Гмн} = 3150$  Гц) звукоизоляция не зависит от способа склеивания облицовок и материала среднего слоя.

Можно сделать вывод, что акустическое разобщение слоев сэндвич-панели в значительной степени влияет на звукоизоляцию сэндвич-панелей в широком диапазоне частот. В случае акустического разобщения слоев сэндвич-панели происходит проскальзывание облицовок и среднего слоя между собой, вследствие чего снижается упругость связи между облицовками и звукоизоляция сэндвич-панели увеличивается. Используя акустическое разобщение слоев можно регулировать прохождение звука через сэндвич-панель, с целью эффективного использования резервов повышения ее звукоизоляции.

#### **4.3.4 Экспериментальные исследования влияния акустического разобщения из слоев упругого материала на звукоизоляцию сэндвич-панелей**

Полное акустическое разобщение слоев сэндвич-панели (отсутствие клеевого соединения между облицовками и средним слоем) малоприменимо в строительной практике из условий обеспечения прочности и устойчивости ограждающих конструкций. Для решения данной задачи предложено использование дополнительных слоев упругого материала, вклеиваемых между облицовками и средним слоем. Схема предложенной конструкции сэндвич-панели представлена на рисунке 4.12 б.

В качестве упругих разобщающих слоев предложено использовать различные рулонные прокладочные материалы на основе пенополиэтилена, полиэфирного волокна и т.п. материалов.

На рисунке 4.13 приведены экспериментально полученные в больших реверберационных камерах ННГАСУ частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панелей, в которых облицовки и средний слой соединены через слои различных упругих материалов (пенополиэтилен толщиной 2 мм, полиэфирное волокно толщиной 4 мм). Схемы установки образцов в проёме больших камер лаборатории акустики ННГАСУ приведены в приложении 9 (рисунки 6 и 7).

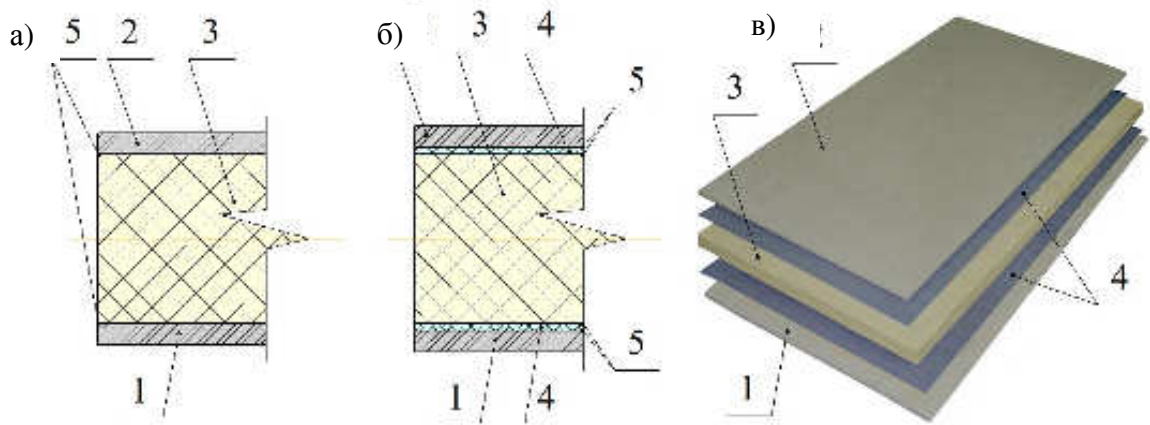


Рисунок 4.12 – Схема и общий вид сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев: а) сэндвич-панель с жесткой склейкой слоев по всей плоскости; б) сэндвич-панель в которой облицовки и средний слой склеены через слои разобщающего упругого материала; в) общий вид сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев: 1 – внешние листовые облицовки; 2 – средний слой; 3 – дополнительные слои упругого материала; 4 – слои акустического разобщения; 5 – клеевые слои

При использовании в качестве упругих разобщающих слоев пенополиэтилена толщиной 2 мм (кривая 2), область повышенного прохождения звука вблизи резонансной частоты  $f_p$  перемещается на одну октаву вниз ( $f_p^2 = 400$  Гц), по сравнению с сэндвич-панелью с жесткой склейкой слоев ( $f_p^1 = 800$  Гц). Частотный диапазон НПР2 при этом расширяется до области  $400 \div 3150$  Гц, в области частот  $630 \div 3150$  Гц происходит увеличение звукоизоляции на  $5 \div 15$  дБ.

При использовании в качестве упругих разобщающих слоев полиэфирного волокна толщиной 4 мм (кривая 3), область повышенного прохождения звука перемещается на две октавы вниз ( $f_p^3 = 200$  Гц), по сравнению с сэндвич-панелью с жесткой склейкой слоев ( $f_p^1 = 800$  Гц). Частотный диапазон НПР2 при этом расширяется до области  $200 \div 3150$  Гц, в области частот  $400 \div 3150$  Гц происходит увеличение звукоизоляции на  $3 \div 18$  дБ. При этом на частотах  $400 \div 2000$  Гц звукоизоляция приближается к предельным значениям звукоизоляции для рассматриваемой сэндвич-панели (кривая 4).

Применение акустического разобщения в виде дополнительных слоёв упругого материала между облицовками и средним слоем позволяет повысить

звукоизоляцию сэндвич-панели в области ППР (выше частоты  $f_{Гmn} = 3150$  Гц), за счет увеличения потерь энергии.

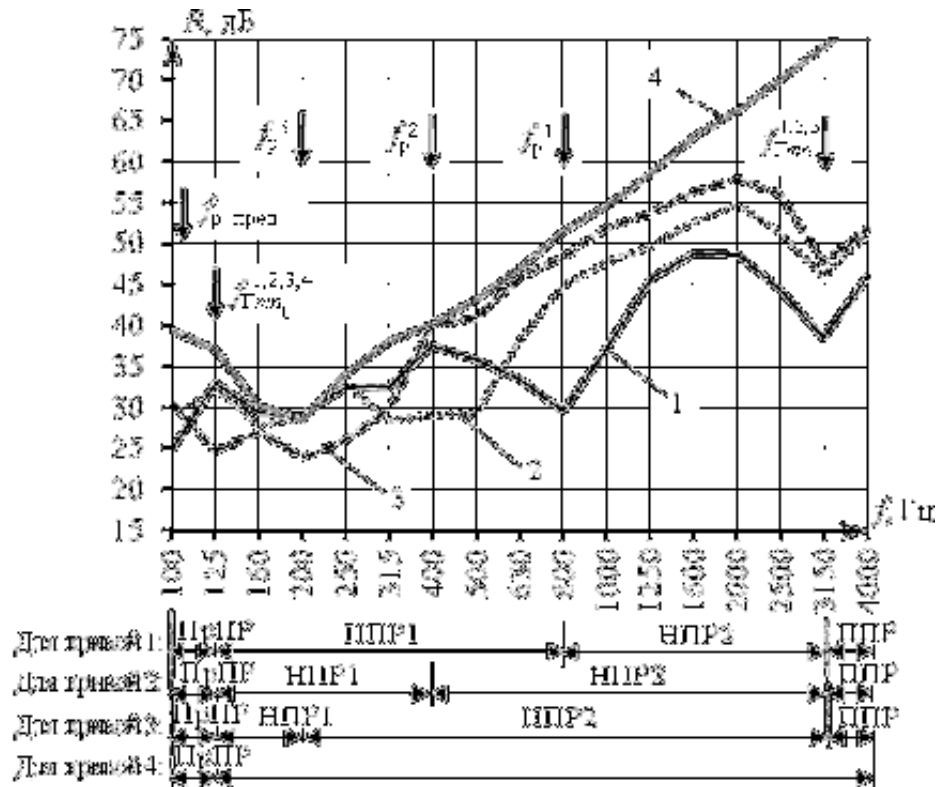


Рисунок 4.13 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панелей (размер 2,0 м × 1,2 м) с акустическим разобщением слоев (облицовки из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм): 1 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости; 2 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости через разобщающий слой из пенополиэтилена ( $\rho = 45 \text{ кг/м}^3$ ,  $E_d = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ) толщиной 2 мм; 3 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости через разобщающий слой из полиэфирного волокна толщиной 4 мм ( $\rho = 75 \text{ кг/м}^3$ ,  $E_d = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ); 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Для объяснения различия в звукоизоляции образцов сэндвич-панелей с разобщающими слоями из пенополиэтилена (толщиной 2 мм) и полиэфирного волокна (толщиной 4 мм), проведена дополнительная серия экспериментов. Исследовались ограждения из сэндвич-панелей разобщающими слоями из тех же материалов, но одинаковой толщины (4 мм). Результаты данных исследований

приведены на рисунке 4.14. Схемы установки образцов в проёме больших камер лаборатории акустики ВоГУ приведены в приложении 9 (рисунки 8 и 9).

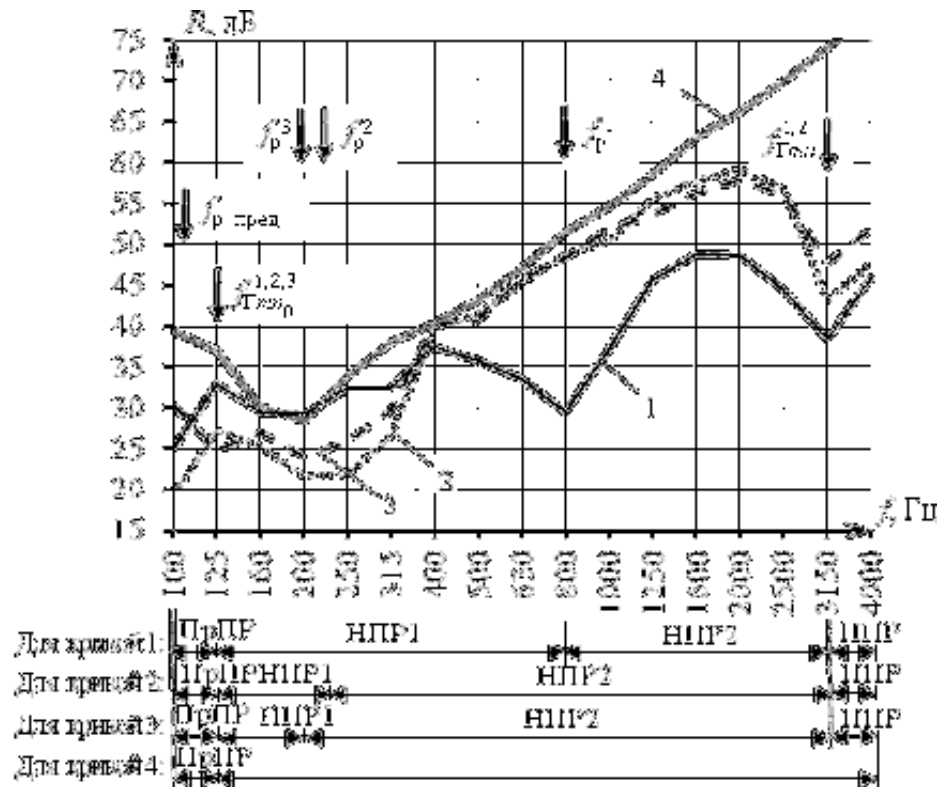


Рисунок 4.14 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений из сэндвич-панелей (размер 2,0 м × 1,2 м) с акустическим разобщением слоев (облицовки из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм): 1 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости; 2 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости через разобщающие слои из полиэфирного волокна толщиной 4 мм ( $\rho = 75 \text{ кг/м}^3$ ,  $E_d = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ); 3 – облицовки и средний слой жестко склеены по всей плоскости через разобщающие слои из пенополиэтилена толщиной 4 мм ( $\rho = 45 \text{ кг/м}^3$ ,  $E_d = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ); 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Анализируя рисунки 4.13 и 4.14, можно заключить, что звукоизоляция сэндвич-панелей с акустическим разобщением зависит от толщины разобщающих слоев упругого материала и в меньшей степени зависит от упругих характеристик самого материала. Для дальнейших исследований выбран упругий материал из полиэфирного волокна толщиной 4 мм, как более удобный в монтаже,

обеспечивающий качественную склейку слоев между собой и большую механическую прочность сэндвич-панели.

#### **4.3.5 Экспериментальные исследования влияния размеров на звукоизоляцию сэндвич-панелей**

В строительстве размеры перегородок находятся в пределах (2,5 м ÷ 6,0 м), поэтому представляет интерес исследовать звукоизоляцию сэндвич-панелей реальных размеров.

На рисунке 4.15 приведены сравнения экспериментально полученных частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели с акустическим разобщением слоев размером 2,0 м × 1,2 м и ограждения из сэндвич-панелей размером 3,6 м × 2,5 м. Схемы установки образцов в проёмах больших камер лабораторий акустики ННГАСУ и ВоГУ приведены в приложении 9 (рисунки 6 и 8).

Можно видеть, что звукоизоляция перегородки размером 3,6 м × 2,5 м превосходит звукоизоляцию сэндвич-панели размером 2,0 м × 1,2 м с аналогичными параметрами на 4 ÷ 8 дБ во всем рассматриваемом диапазоне частот.

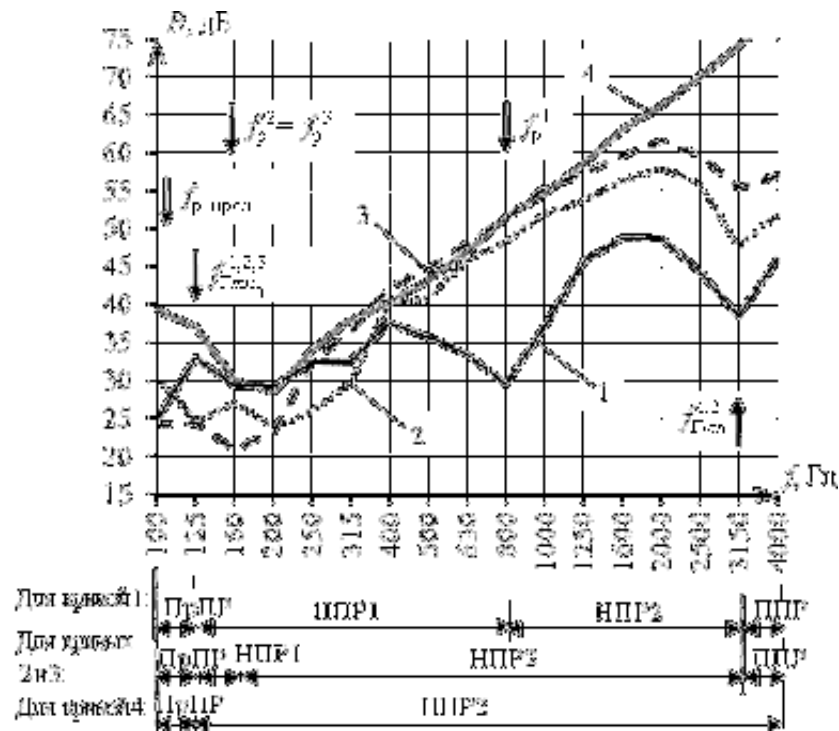


Рисунок 4.15 – Влияние размера на звукоизоляцию сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев: 1– сэндвич-панель с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм в которой слои жестко склеены по всей плоскости; 2 – сэндвич-панель (размер 2,0 м × 1,2 м) с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм с акустическим разобщением в виде слоев полиэфирного волокна толщиной 4 мм; 3 – перегородка (размер 3,6 м × 2,5 м) из сэндвич-панелей с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм с акустическим разобщением в виде слоев полиэфирного волокна толщиной 4 мм; 4 – теоретически определенная предельная звукоизоляция (по формуле (2.74))

#### 4.4 Разработка рационального конструктивного решения сэндвич-панели

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали наличие значительных резервов повышения звукоизоляции для многослойных сэндвич-панелей. В главах 3 и 4 определены эффективные способы использования



данных резервов при проектировании сэндвич-панелей с рациональными конструктивными решениями.

На основании проведенного комплекса теоретических расчетов и экспериментальных исследований разработано рациональное конструктивное решение сэндвич-панели, представленное на рисунке 4.16.

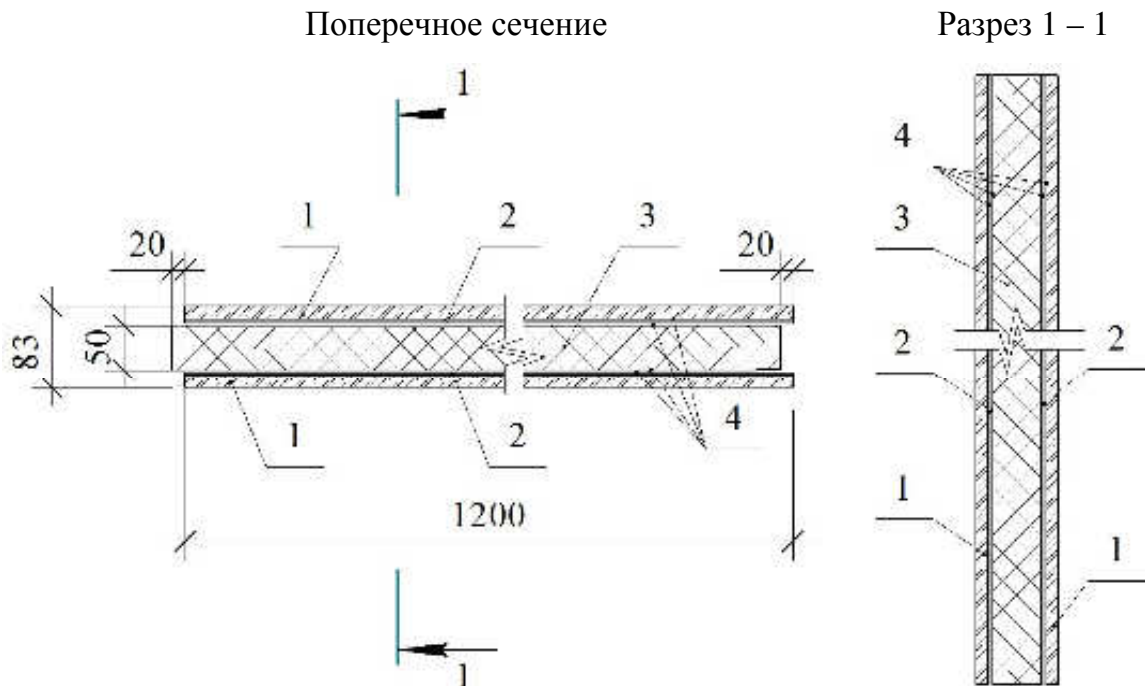


Рисунок 4.16 – Схема сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением: 1 – внешние листовые облицовки; 2 – акустическое разобщение (слои из упругого волокнистого материала); 3 – средний слой из лёгкого, жесткого, пористого материала; 4 – клеевые слои

Облицовки (1) сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением приняты из ГВЛ, толщиной по 12,5 мм ( $\mu/D = 2,8 \times 10^{-2} \text{ с}^2/\text{м}^4 \text{ см. пункт 3.2.2}$ ); средний слой (3) из пенопласта толщиной 50 мм; акустическое разобщение (2) в виде слоев упругого материала (полиэфирное волокно толщиной 4 мм). Для формирования лабиринтного стыка между отдельными панелями внешние облицовки сэндвич-панели с одной стороны образуют паз, средний слой с другой стороны панели образует гребень.

Звукоизоляция сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением была измерена в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Полученная частотная характеристика приведена на рисунке 4.17. Схема установки образца приведена в приложении 9 (рисунок 6).

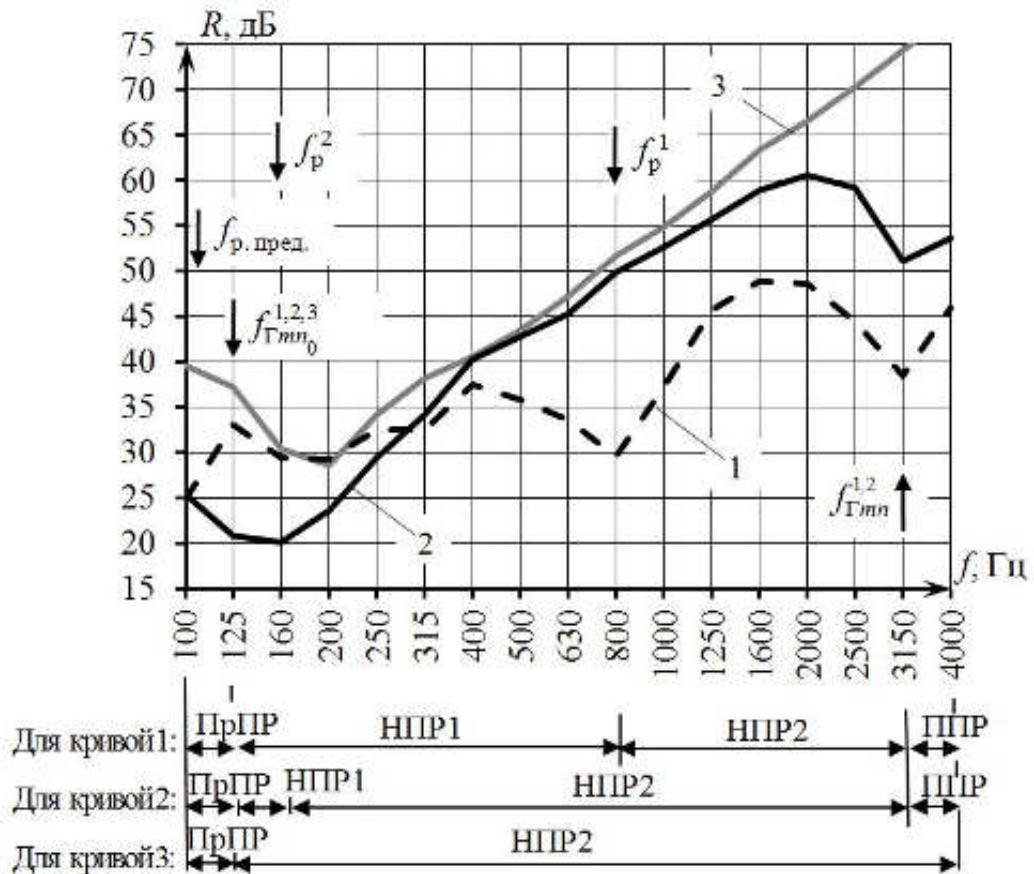


Рисунок 4.17 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений: 1 – сэндвич-панель (2,0 м × 1,2 м) с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм, в которой облицовки и средний слой склеены по плоскости; 2 – сэндвич-панель (2,0 м × 1,2 м) с облицовками из листов ГВЛ толщиной по 12,5 мм и средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм, с акустическим разобщением слоев из полиэфирного волокна толщиной 4 мм; 3 – теоретически определенная предельная звукоизоляция сэндвич-панели (по формуле (2.74))

Анализируя рисунок 4.17, можно заключить, что сэндвич-панель с рациональным конструктивным решением обладает звукоизоляцией, близкой к предельным значениям в широком диапазоне (250 Гц ÷ 4000 Гц). Данный эффект повышения звукоизоляции достигается за счет того, что резонансная частота системы «масса – упругость – масса» панели с рациональным конструктивным решением (кривая 2) смещается на семь третьоктавных полос вниз – с частоты  $f_p^1 = 800$  Гц (для кривой 1) на частоту  $f_p^2 = 160$  Гц. Полученный результат достигнут без значительного увеличения поверхностной плотности ограждения, за

счет эффективного использования внутренних резервов ( $\mu^1 = 33,0 \text{ кг/м}^2$ ,  $\mu^2 = 34,3 \text{ кг/м}^2$ ).

#### **4.5 Разработка бескаркасных ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением**

На базе сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением разработано бескаркасное звукоизолирующее ограждение, которое может применяться при строительстве гражданских и промышленных зданий – при новом строительстве, а также при реконструкции существующих объектов (в качестве перегородок, облицовок существующих стен, экранов и выгородок). Схема разработанного ограждения приведена на рисунке 4.18.

Разработанное ограждение отличается удобным и быстрым монтажом по принципу «пол – потолок» (см. рисунок 2.19), отсутствие внутреннего металлического каркаса, выполнение требований по пожарной безопасности за счет применения огнезащитной шпатлевки для заделки стыков (по результатам пожарно-технических испытаний, проведенных по ГОСТ [17] ограждение соответствует классу пожарной опасности К0 (30)). Протокол и отчет по испытаниям приведены в приложении 4, фотография образца сэндвич-панели при испытаниях приведена в приложении 8 (рисунок 4).

Звукоизоляция разработанных ограждений размером 3,6 м × 2,5 м из сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением и дополнительными внешними листовыми облицовками была измерена в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ВоГУ. Полученные частотные характеристики приведены на рисунке 4.19. Схемы установки образцов в проёме больших камер лаборатории акустики ВоГУ приведены в приложении 9 (рисунки 8, 10 и 11).

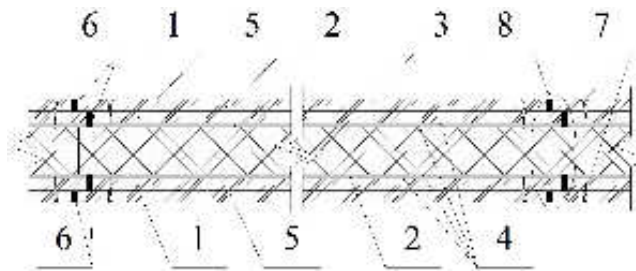


Рисунок 4.18 – Схема звукоизолирующей перегородки из сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением (поперечное сечение): 1 – внешние листовые облицовки; 2 – акустическое разобщение в виде слоев упругого материала; 3 – средний слой; 4 – клеевые слои. Данное ограждение может содержать одну или две дополнительные внешние листовые облицовки 5; 6 – огнезащитная шпатлевка; 7 – саморезы; 8 – вертикальный лабиринтный стык «паз – гребень»

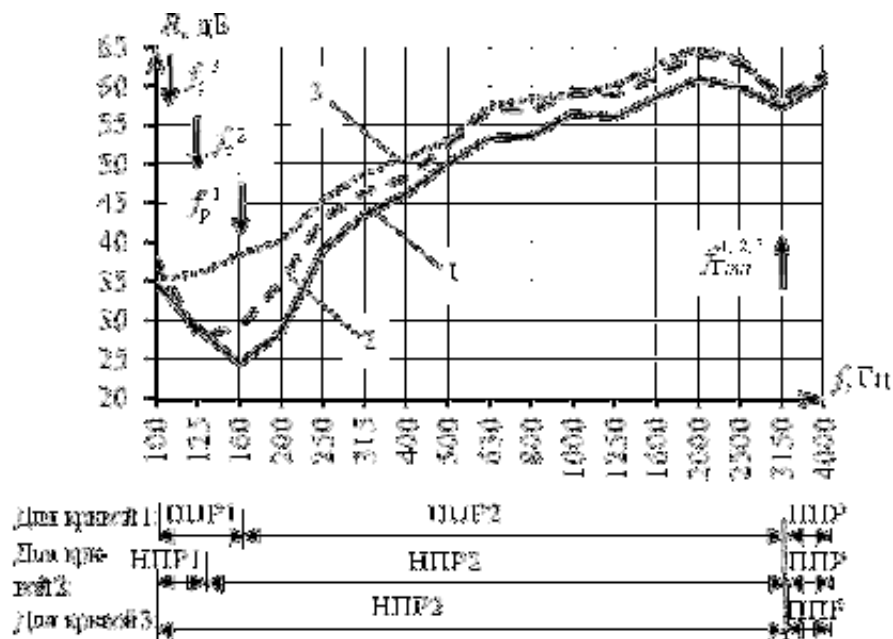


Рисунок 4.19 – Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной перегородки из сэндвич-панелей (размер 3,6 × 2,5 м) с дополнительными внешними листовыми облицовками (облицовки из ГВЛ толщиной по 12,5 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм; разобщающие слои из полиэфирного волокна толщиной по 4 мм): 1 – ограждение без дополнительных облицовок; 2 – ограждение с одной дополнительной облицовкой из ГВЛ толщиной 12,5 мм; 3 – ограждение с двумя дополнительными облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм

Из рисунка 4.19 видно, что при обшивке звукоизолирующего ограждения дополнительной листовой облицовкой с одной стороны (кривая 2) резонансная частота системы дополнительно смещается на третьоктаву в область низких частот за счет увеличения поверхностной плотности одной из облицовок. При этом происходит увеличение звукоизоляции на 3 дБ на частоте 100 Гц, в области 160 ÷ 4000 Гц на 2 ÷ 6 дБ, а индекс изоляции воздушного шума возрастает на 3 дБ до величины  $R_w = 52$  дБ. В случае обшивки звукоизолирующего ограждения дополнительными листовыми облицовками с двух сторон (кривая 3) резонансная частота системы дополнительно смещается на две третьоктавы в область низких частот за счет увеличения поверхностной массы обеих облицовок. При этом звукоизоляция ограждения увеличивается во всем нормируемом диапазоне частот на величину до 14 дБ, а индекс изоляции воздушного шума возрастает на 5 дБ до величины  $R_w = 54$  дБ.

На основании проведенных исследований разработаны рациональные конструктивные решения бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей, оформлен патент [42] и подана заявка на получение патента [24] (см. приложения 6 и 7).

Для апробации разработанного бескаркасного ограждения на основе сэндвич-панелей были проведены натурные исследования его звукоизоляции в строящемся жилом доме с монолитным железобетонным каркасом в микрорайоне «Цветы» в г. Нижний Новгород. Результаты натурных исследований представлены на рисунке 4.20.

Фотографии перегородок из сэндвич-панелей смонтированных в строящемся жилом доме, приведены в приложении 8 (рисунки 7 и 8). По результатам исследований доказана высокая эффективность разработанных звукоизолирующих ограждений и перспективность их внедрения на объектах гражданского и промышленного строительства. Данный вывод подтвержден актами внедрения результатов диссертационной работы (см. приложение 1, 2 и 3).

Для звукоизолирующего ограждения из сэндвич-панелей (с облицовками из ГВЛ толщиной по 12,5 мм, средним слоем из пенопласта толщиной 50 мм, разобщающими слоями из полиэфирного волокна толщиной по 4 мм) размером 3,9 м × 2,5 м в натурных условиях получен индекс изоляции воздушного шума

$R'_w = 43$  дБ, поэтому оно может быть использовано в качестве перегородок без дверей между комнатами в жилых зданиях [51]. Для ограждения с одной дополнительной облицовкой  $R'_w = 47$  дБ, оно может быть использовано в качестве перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры [51]. Для ограждения с двумя дополнительными облицовками  $R'_w = 50$  дБ, что позволяет его использовать также в качестве перегородки между комнатами общежитий [51].

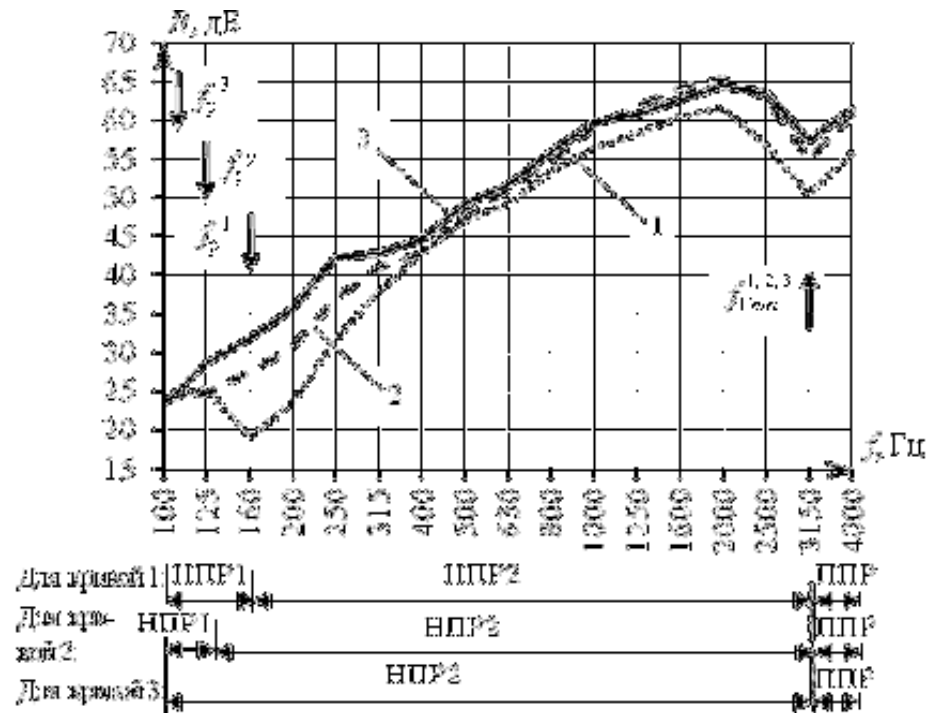


Рисунок 4.20 – Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной перегородки из сэндвич-панелей с дополнительными внешними листовыми облицовками полученные в натурных условиях: 1 – звукоизолирующее ограждение без дополнительных облицовок; 2 – звукоизолирующее ограждение с одной дополнительной внешней облицовкой; 3 – звукоизолирующее ограждение с двумя дополнительными облицовками.

#### Выводы по главе 4

1. На базе комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработано рациональное конструктивное решение сэндвич-панели, позволяющее

эффективно использовать резервы повышения звукоизоляции, определяемые как разница между собственной и предельной звукоизоляцией ограждения.

2. Разработаны рациональные по звукоизоляции конструктивные решения ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей, предназначенные для гражданских и промышленных зданий (при новом строительстве, а также при реконструкции существующих объектов). Ограждения могут использоваться в качестве перегородок между помещениями, экранов, выгородок, стенок звукоизолирующих кожухов и кабин наблюдения.

3. Проведен комплекс лабораторных и натурных экспериментальных исследований собственной и фактической звукоизоляции бескаркасных ограждающих конструкций с рациональными по звукоизоляции конструктивными решениями. Подтверждена их высокая эффективность и возможность применения в гражданском и промышленном строительстве.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты работы позволяют представить ее следующие итоги:

1) Впервые получены аналитические зависимости для расчета предельной звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров, определяемой инерционным прохождением звука, с учетом геометрических и физико-механических параметров. Выполнен анализ резервов повышения звукоизоляции сэндвич-панелей в различных частотных диапазонах. Это дает возможность проектировать звукоизолирующие ограждения зданий, путем эффективного использования резервов повышения звукоизоляции, без значительного увеличения их массы и толщины.

2) Разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров в нормируемом диапазоне частот с учетом акустического разобщения облицовок и среднего слоя.

3) На базе комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработаны рациональные по звукоизоляции конструктивные решения

ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев. Разработанные новые, рациональные по звукоизоляции конструктивные решения ограждающих конструкций из сэндвич-панелей позволяют расширить возможность применения сэндвич-панелей в гражданском и промышленном строительстве за счет повышения их звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот

4) Проведен комплекс экспериментальных исследований звукоизоляции разработанных ограждающих конструкций в лабораторных и в натурных условиях. Подтверждена высокая эффективность разработанных ограждений и возможность их применения в гражданском (в т. ч. в малоэтажном) и промышленном строительстве.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Балишанская, Л. Г. Техническая акустика транспортных машин: Справочник / Л.Г. Балишанская, Л. Ф. Дроздова, Н. И. Иванов, М. С. Седов. – СПб: Политехника, 1992. – 365 с.
2. 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.
3. Бобылев, В. Н. Звукоизоляция однослойных ограждающих конструкций на частотах, ниже граничной: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Горький, 1974. – 25 с.
4. Бобылев, В. Н. О звукоизоляции однослойных ограждений в области частот ниже граничной частоты диффузности звукового поля // Звукоизоляция конструкций зданий. Труды ГИСИ, вып. 71. – Горький: ГИСИ, 1974. – С. 44–50.
5. Бобылев, В. Н., О надежности и точности измерений звукоизоляции однослойных ограждений / В. Н. Бобылев; С. Г. Данилин // Звукоизоляция конструкций зданий. Труды ГИСИ, вып. 71. – Горький: ГИСИ, 1974. – С. 66–74.
6. 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.
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. Инженерный метод расчёта звукоизоляции сэндвич-панелей с учётом двойственной природы прохождения звука / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Монич // Academia – 2016. – №1. – С. 134-138.

9. Бобылев, В. Н. О надежности и точности измерений звукоизоляции однослойных ограждений / В. Н. Бобылев, С. Г. Данилин // Звукоизоляция конструкций зданий: труды ГИСИ. – Горький, 1974. – Вып. 71. – С. 66-74.
10. Боголепов, И. И. Теоретические исследования звукоизолирующей способности судовых двустенных конструкций / И. И. Боголепов // Труды ЦНИИ технологии судостроения. – Л., 1963. – Вып. 45. – С. 16-35.
11. Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Д. Н. Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
12. Бреховских, Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
13. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 357 с.
14. Голоскоков, Е. Г. Определение зон пониженной звукоизоляции трехслойных ограждений // Влияние вибраций различных спектров на организм человека и проблемы виброзащиты / Е. Г. Голоскоков, В. П. Ольшанский, С. Н. Бешенков. – М., 1972. – С. 314-317.
15. Голоскоков, Е. Г. Упругоакустические задачи динамики трехслойных конструкций / Е. Г. Голоскоков, С. Н. Бешенков. – Харьков: Вища школа, 1980. – 118 с.
16. ГОСТ 27296–2012. Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014.
17. ГОСТ 30403-96 «Конструкции строительные. Метод определения пожарной опасности». – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014.
18. Гребнев, П. А. Исследования звукоизолирующих свойств многослойных ограждений с жестким заполнителем / П. А. Гребнев, Д. В. Монич // Жилищное строительство. – 2012. – №6 – С. 50-51.
19. Гребнев, П. А. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / П. А. Гребнев // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 2 (49). – С. 109-118.
20. Григолюк, Э. И. К расчету трехслойных пластин с жестким заполнителем / Э. И. Григолюк // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – №1. – С. 67-74.

21. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В. И. Заборов. – М.: Стройиздат, 1969. – 185 с.
22. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции слоистых ограждений от воздушного шума / В. И. Заборов // Известия Академии строительства и архитектуры СССР. – 1961. – Вып.2. – С. 94-104.
23. Заявка на получение патента №2016122737 Российская Федерация. Звукоизолирующее ограждение пониженной пожарной опасности / В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев, Д. В. Мониц, В. А. Тишков, А. В. Печников, М. А. Печников; заявители: Нижегородский гос. арх.-строит. ун-т; ООО Научно-производственная фирма «Лаборатория огнезащиты»; заявл. 08.06.2016. – 2016. – 1с.
24. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 418 с.
25. Кочкин, А. А. Звукоизоляция слоистых пластин ограниченных размеров с промежуточным вибродемпфирующим слоем: автореф. дис... канд. техн. наук / А. А. Кочкин; Московский институт инженеров ж/д транспорта. – М., 1984. – 24 с.
26. 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.
27. Кочкин, А. А. О звукоизоляции легких ограждающих конструкций с вибродемпфирующими слоями / А. А. Кочкин // Строительная физика в XXI веке: материалы науч.-техн конф. / НИИСФ РААСН – М., 2006. – С. 267-269.
28. Кочкин, А. А. Влияние технологии вклеивания вибропоглощающей прослойки на звукоизоляцию слоистой панели / А. А. Кочкин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 11. – С. 12-13.
29. Кочкин, А. А. О проектировании звукоизоляции легких ограждений с промежуточным вибродемпфирующим слоем / А. А. Кочкин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 191-193.

30. Кочкин, А. А. О повышении звукоизоляции ограждающих конструкций / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – №3 – С. 198-199.
31. Кочкин, А. А. Повышение звукоизоляции слоистых вибродемпфированных ограждений путем уменьшения их изгибной жесткости / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова // Известия Юго-Западного государственного университета. – Курск, 2011. – № 5(38). – Ч.2. – С. 159-162.
32. Кочкин, А. А. Исследование звуковых полей в реверберационных камерах ВоГТУ / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конференции. – Пенза, 2005. – С. 215-218.
33. Кочкин, А. А. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах ВоГТУ / А. А. Кочкин // Вузovская наука - региону: вторая всерос. науч. – техн. конф., 27 февраля 2004 г. / ВоГТУ. – Вологда, 2004. – С. 432-435.
34. Кочкин, А. А. К оценке погрешности измерений звукоизоляции ограждений / А. А. Кочкин, Н. М. Дементьев, Л. Э. Быкова // Вузovская наука – региону: вторая Всероссийская науч.-практ. конф. / ВоГТУ. – Вологда, 2004. – С. 435-436.
35. Кочкин, А. А. О точности и достоверности измерения звукоизоляции в реверберационных камерах ВоГТУ / А. А. Кочкин, Л. Э. Шашкова // Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология: материалы междунар. науч.-практ. конф. / НИИСФ РААСН. – Москва - Будва, 2010. – С. 181-183.
36. Кочкин, А. А. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций в реверберационных камерах ВоГТУ / А. А. Кочкин // Вузovская наука - региону: вторая всерос. науч. – техн. конф., 27 февраля 2004 г. / ВоГТУ. – Вологда, 2004. – С. 432-435.
37. Крокер, М. Дж. Расчет прохождения звука и вибрации через перегородки и соединительные стержни при помощи статического энергетического метода / М. Дж. Крокер, М. К. Баттачария, А. Дж. Прайс // Конструирование и технология машин: Пер. с англ. – 1971. – 93 В.3. – С. 11-18.

38. Овсянников, С. Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях / С. Н. Овсянников. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – 378 с.
39. Осипов, Г. Л. Шумы и звукоизоляция / Г. Л. Осипов М. – Госстройиздат, 1967.
40. 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.
41. Релей (Дж. В. Стретт). Теория звука: В 2 т. / Пер. с англ. под ред. С. М. Рытова. – М.: Гостехиздат, 1955. – Т.1: 504 с. – Т.2: 427 с.
42. Пат. 153758 Российская Федерация, МПК E04B 1/04 (2006.01), МПК E04B 2/00 (2006.01), МПК E04B 1/84 (2006.01), МПК E04B 2/92 (2006.01). Звукоизолирующее ограждение / В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев, Д. В. Монич, В. А. Тишков; патентообладатель Нижегородский гос. арх.-строит. ун-т. – № 20141223097; заявл. 05.03.2014; опубл. 06.06.2011. – 2014. – С. 2.
43. Седов, М. С. Прогнозирование и измерения звуковой среды / М. С. Седов, В. Н. Бобылев, В. А. Тишков: Учебное пособие. – Нижний Новгород: ННГУ, 1991. – 67 с.
44. Седов, М. С. Расчет звукоизоляции однослойных конструкций при направленном падении звука / М. С. Седов, В. А. Тишков: Курс лекций. – Горький: ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1978. – 45 с.
45. Седов, М. С. О звукоизоляции слоистых вибродемпфированных панелей ограниченных размеров / М. С. Седов, А. А. Кочкин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1987. – №8. – С. 55-58.
46. Седов М. С. Теория инерционного прохождения звука через ограждающие конструкции / М. С. Седов // Изв. вузов. – Сер.: Строительство и архитектура. – 1990. – № 2. – С. 37-42.
47. Седов, М. С. Проектирование звукоизоляции / М. С. Седов. – Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1980. – 54 с.
48. Седов, М. С. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций в больших и малых реверберационных камерах ГИСИ / М. С. Седов, В. Н. Бобылев // Звукоизоляция конструкций зданий: Тр. ГИСИ им. В. П. Чкалова. – 1974. – Вып. 71. – С.58-66.

49. 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.
50. СП 23-103-2003 Защита от шума: Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004
51. СП 51.13330.2011 Защита от шума, актуализированная версия СНиП 23-03-2003: Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2011
52. Филиппов, С. И. К вопросу о колебании трехслойной пластинки / С. И. Филиппов // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 3. – С. 30.
53. Фурдуев, В. В. Электроакустика / В. В. Фурдуев. – М.: Гостехтеориздат, 1948. – 515 с.
54. Юферев, А. П. Повышение звукоизоляции двустенных конструкций в зданиях: автореф. дис... канд. техн. наук / А. П. Юферев. – Нижний Новгород, 1997. – 21 с.
55. Юлин, В. И. Звукоизоляция трехслойных ограждающих конструкций с жестким наполнителем: автореф. дис... канд. техн. наук / В. И. Юлин – Горький, 1975. – 23 с.
56. Юлин, В. И. О звукоизоляции трехслойной пластины с жестким наполнителем / В. И. Юлин // Исследования в области строительства: труды / ГИСИ. – Горький, 1973. – Вып.64, ч.2. – С. 39-43.
57. Юлин, В. И. Исследование колебаний трехслойных пластин с жестким наполнителем / В. И. Юлин // Исследования в области строительства: труды / ГИСИ. – Горький, 1973. – Вып.64, ч.2. – С. 43-47.
58. Юлин, В. И. О возможности управления граничной частотой трехслойной пластины / В. И. Юлин // Звукоизоляция конструкций зданий: труды / ГИСИ. – Горький, 1974. – Вып. 71. – С. 13-16.
59. Beranek, L. L. Noise Reduction / L. L. Beranek // Mc.GrawHill Book Company. – 1960. – 752 p.
60. Beranek, L. L. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets / L. L. Beranek, G. Work // Journal of the Acoustical Society of America. – 1949. – Vol 21. – P. 419-428.

61. Beranek, L. L. Acoustical properties of homogeneous isotropic rigid tiles and flexible Blankets / L. L. Beranek // IASA. – 1947. – Vol. 19, №. 4. – P. 558-568.
62. Beranek, L. L. Sound control in airplanes / L. L. Beranek // IASA. – 1947. – Vol. 19, № 2. – P. 357-364.
63. Beranek, L. L. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets / L. L. Beranek, G. Work // IASA. – 1949. – Vol.21, №.4. – P. 419-428.
64. Berger, R. Die luftschalldämpfung von wänden. Forschung aus dem gebiete des ingenieurwesens / R. Berger. – 1932. – B.3. – S. 193-202.
65. Bobran, H.W. Die kritischen frequenzen schalldämmen der bauteile / H. W. Borban // Band und Decke. – 1957. – № 11. – S. 331-335.
66. Bobylyov, V. N. Experimental study of sound insulation in multilayer enclosing structures / V. N. Bobylyov, V. A. Tishkov, D. V. Monich, V. V. Dymchenko, P. A. Grebnev // Noise Control Engineering Journal. – 2014. – 62 (5). – P. 354-355.
67. Bolton, J. S. Normal incidence sound transmission through double-panel systems lined with relatively stiff, partially reticulated polyurethane foam / J. S. Bolton, E. R. Green // Applied Acoustics. – 1993. – № 39. – P. 23-51.
68. Bolton, J. S. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials / J. S. Bolton, N. M. Shiau, Y. J. Kang // Journal of Sound and Vibration. – 1996. – Vol. 191 № 3. – P. 317-347.
69. Clive, L. Dym Transmission of sound through sandwich panels / L. Dym Clive, Mark A. Lang // IASA. – 1974. – Vol.56, №. 5. – P. 1525-1532.
70. Cobble, M. H. Dynamic vibrations and stresses in composite elastic plates / M.H. Cobble // IASA. – 1969. – Vol.46, №. 5. – P. 2. – P. 1175-1179.
71. Cremer, L. Theorie der schalldämmung dünner wände bei schrägem einfall / L. Cremer // Akustische Zeitschrift. – 1942. – B.7 №3. – S. 81-104.
72. 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 Vibration. – 1968. – Vol 8. – P. 126-133.
73. Dijckmans, A. Optimization of the acoustic performances of lightweight sandwich roof elements / A. Dijckmans, G. Vermeir, J. W. Niggebrugge // Measurements, Proceedings of INTER-NOISE 2009. – Ottawa, Canada. – 2009 August 23-26. – Ottawa

74. Durocher, L. L. Harmonic vibrations of isotropic, elastic, and elastic / viscoelastic three-layered plates / L. L. Durocher, R. Solecki // IASA. – 1976. – Vol.60, №. 1. – P. 105-112.
75. Feng, S. On application of radiation loss factor in the prediction of sound transmission loss of a honeycomb panel / S. Feng, V. Kumar // International Journal of Acoustics and Vibration. – 2009. – P. 47-51.
76. Fleming, F. The national physical laboratory teddington / F. Fleming // private communication. – 1950. – 27 p.
77. Ford, R. D. Sound transmission through sandwich constructions / R.D. Ford, P. Lord, A.W. Walker // Sound and Vibration. – 1967. – Vol.5, № 1. – P. 9-21.
78. Ford, R. D. Practical problems of partition design / R. D. Ford, P. Lord //, Journal of the Acoustical Society of America. – 1968. – 43 (5). – P. 1062-1068.
79. Gotz, I // Akustische Zeitschrift. – 1943. – № 11. – S. 75-87.
80. 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.
81. Heckl, M. Die schalldämmung von homogenen einfachwänden endlicher fläche / M. Heckl // Acustica. – 1960. – Bd.10, № 2. – S. 98–108.
82. Heckl, M. Untersuchung an orthotropic platten / M. Heckl // Acustica. – 1960. – Vol.10, №2. – S. 109–115.
83. Josse, R. Transmission du son par une paroi simple / R. Josse, C. Lamure // Acustica. – 1964. – № 14. – s. 266.
84. Kihlman, T. K. Sound radiation into a rectangular room applicative to airborne sound transmission in buildings / T. K. Kihlman // Acustica. – 1967. – Vol.18, № 1. – S. 11-20.
85. Kihlman, T. K. The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction index measurements / T. K. Kihlman, A. C. Nilsson // The journal of sound and vibration. – 1972. – Vol. 24, № 3. – S. 349–364.
86. Kurtze, G. New wall dosing for high transmission loss or high damping / G. Kurtze, B. W. Watters // IASA. – 1959. – Vol. 31, № 6. – P. 739-748.
87. Kurtze, G. Physik und technik der larmbekämpfung / G. Kurtze // Karlsruhe: Braun, 1975. – s. 576.



88. Land Mark, A. Optimal acoustic design of sandwich panels. Part 2. / A. Land Mark, L. Dym Clive // IASA. – 1975. – Vol. 57, № 6. – P. 1481-1487.
89. London A. Transmission of reverberant sound through single walls / A. London // Journal of research of the national bureau of standarts. – 1949. – Vol. 42 № 6. – P. 605-615.
90. London, A. Transmission of reverberant sound through double walls / A. London // IASA. – 1950. – Vol. 22, № 2. – P. 270-279.
91. Lyon, R., Maidanik, G. Power flow between lineary coupled oscillators / R. Lyon, G. Maidanik // Journal of the Acoustical Society of America. – 1962. – Vol. 34.– p. 623.
92. Moore, J. A. Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions / J. A. Moore, R. H. Lyon // Journal of Acoustical Society of America. – 1991. – № 89. – P. 777-791.
93. Mulholland, K. A. Sound insulation at low frequencies / K. A. Mulholland, R. H. Lyon // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1973. – Vol. 54, № 4. – P.867–878.
94. Nilsson, A. C. Reduction index and boundary conditions for a wall between two rectangular rooms. Part I, Theoretical results // Acustica. – 1972. – Vol.26, № 1. – S. 1-18.
95. Nilsson, A. C. Reduction index and boundary conditions for a wall between two rectangular rooms. Part II, Experimental results // Acustica. – 1972. – Vol.26, № 1. – S. 19-23.
96. Nilsson, A. C. Influence of boundary conditions upon the reduction index of a wall between two rectangular rooms / A. C. Nilsson, T. K. Kihlman // Proc. 7-th Int. Congr. Acoust., Budapest. – 1971. – P. 33-36
97. Nilsson, A. C. Wave propagation and sound transmission through sandwich plates / A. C. Nilsson // Journal of Sound and Vibration. – 1990. – Vol. 138. – P. 73-94.
98. Nilsson, E. Prediction and measurement of some dynamic properties of sandwich structures with honeycomb and foam cores / E. Nilsson, A. C. Nilsson // Journal of Sound and Vibration. – 2002. – № 251. – P. 409-430.
99. Ovsyannikov, S. N. The prediction of sound and vibration in a building using the method of statical energy analysis / S. N. Ovsyannikov // 8<sup>th</sup> Korea-Russia

- International Symposium on Science and Technology, KORUS 2004.Tomsk. – 2004. – P. 331-335.
100. Peutz, V. M. Some fundamental measurements on single and double plate structures / V. M. Peutz // *Acustica*. – 1954. – vol.4, № 1. – S. 281-292.
  101. Peutz, V. M. Letter to the editor concerning the article by W. Kuhl “fehlermöglichkeiten bei schalldämmungsmessungen bei tiefen frequenzen” / V. M. Peutz // *Acustica*. – 1955. – Vol.5, № 1. – S.46-55.
  102. Reissner, H. Der senkrechte und schräge durchtritt einer in einem flüssiger medium ersugten ebenen dilatations (longitudinal) wellen durch eine in diesem medium befindliche planparallele feste platte / H. Reissner // *Helv. Phys. ASTA*. – 1938. – B. 11. – s. 140.
  103. Sanders, F. H. Intensity measurements in the diffraction of light by ultrasonic waves / F. H. Sanders // *Canadian Journal of Research*. – 1939. – Vol.1. – P. 158-171.
  104. Schoch, A. Die physicalischen und technischen grundlagen der schalldämmung im bauwesen / A. Schoch // Leipzig. – 1937.
  105. Schoch, A. Der schalldurchgang durch platten / A. Schoch // *Acustica*. – 1952. – B.2.
  106. Schoch, A., The mechanism of sound transmission through single leaf partitions investigated using small scale models / A. Schoch, K. Feher // *Acustica*. – 1952 – Vol.2, № 5. – S.189–195.
  107. 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.
  108. Sharp, B. H. Prediction methods for the sound transmission of building elements / B. H. Sharp // *Noise Control Engineering*. – 1978. – Vol 11. – P. 53-63.
  109. Sharp, B. H. The transmission loss of multilayer structures / B. H. Sharp, J. W. Beauhamp // *Sound and Vibration*. – 1969. – Vol. 9, № 3. – P. 383-392.
  110. Smoleski, C. P. Dilational-mode sound transmission in sandwich panels / C. P. Smoleski, E. M. Krokosky // *IASA*. – 1973. – Vol. 54, № 6. – P. 1449-1457.
  111. Spronk, F. Indice d'affaiblissement acoustique en champ diffus de parois multiples / F. Spronk // *Rev. acoust.* – 1971. – Vol.4, № 17. – P. 361-366.

112. Tadeu, A. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multiplayer systems using analytical expressions / A. Tadeu, A. Pereira, L. Godinho, J. Antonio // *Appl. Acoust.* – 2007. – Vol. 68, № 1. – P. 17 - 42.
113. Taylor Damping characteristics of thick rectangular laminates / W. Timothy, Taylor, Adnan H. Nayfeh // *Acoust. Soc. Amer.* – 1996. – Vol. 100, № 3. – P. 1561-1570.
114. Thomson, W. T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium / W. T. Thomson // *Journal of Applied Physics.* – 1950. – Vol. 21, № 2. – P. 89-93.
115. Viscardi, M. Numerical prediction and experimental validation of sound transmission loss for sandwich panels / M. Viscardi, P. Napolitano // *Computers and mathematics in automation and materials science* – P. 118-122.
116. Wintergerst, E. Theorie der schalldurchlässigkeit von einfachen und zusammengesetzten wanden // *Schalltechnik.* – 1931 – 4. – s. 85.
117. Zhou, J. Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow / J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang // *Journal of Sound and Vibration.* – 2013. – 332 (16) . – P. 3724-3734.

ДАТА: 16.11.2015

ИСХ. № 18

**АКТ**  
**внедрения научных результатов,**  
**полученных в рамках выполнения**  
**диссертационных исследований**

Настоящим подтверждается, что при выполнении работы «Измерение фактических уровней шума и разработка акустических рекомендаций по снижению шума промышленного оборудования в помещении цеха «Триплекс» ОАО «Эй Джи Си БСЗ» в рамках договора № 2014/187 от 27.10.2014 г., заключенного между ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (Подрядчик) и ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» (Заказчик), были использованы научные результаты, полученные заведующим лабораторией акустики ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Гребневым Павлом Алексеевичем в рамках выполнения им диссертационной работы на тему «Звукоизоляция бескаркасных ограждающих конструкций зданий на основе сэндвич-панелей».

Применение вышеуказанных научных результатов позволило обеспечить снижение ожидаемых уровней шума в помещении цеха «Триплекс» до нормативных значений.

Руководитель департамента  
инжиниринга и технического  
обслуживания ПО «Автостекло»

Е.И. Кудряшов



**Общество с ограниченной ответственностью  
«Корпорация «Апекс»**

Юридический адрес: 603157, г. Нижний Новгород, ул. Коминтерна, д. 45А  
ИНН 5263060954 КПП 526301001 Р.сч. 407028105421000244474 ОАО АКБ «АВАНГАРД» г.Москва  
Кор.счет 3010180000000000201 БИК 044525201 ОГРН 1075263005003

Исх. № 153/15 от 15.09.2015 г.

**АКТ  
внедрения научных результатов,  
полученных в рамках выполнения  
диссертационных исследований**

Настоящим подтверждается, что при выполнении строительно-монтажных работ во вновь возводимом жилом доме в микрорайоне «Цветы» (г. Нижний Новгород), в рамках реализуемого научно-технического сотрудничества между ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ) и ООО «Корпорация «Апекс», была внедрена экспериментальная конструкция межкомнатных и межквартирных бескаркасных перегородок на основе сэндвич-панелей.

Новые конструкции перегородок разработаны заведующим лабораторией акустики ННГАСУ Гребневым Павлом Алексеевичем в рамках выполнения им диссертационной работы на тему «Звукоизоляция бескаркасных ограждающих конструкций зданий на основе сэндвич-панелей».

Применение вышеуказанных научных результатов позволило обеспечить выполнение нормативных требований по звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций жилого дома с учетом требований снижения материалоёмкости строительства.

Директор  
ООО «Корпорация «Апекс»



24.02.2015 г.

А.Е. Яблоков



УТВЕРЖДАЮ

Ректор


 С.А. Лапшин  
 «25» мая 2016 г.

## АКТ

 о внедрении результатов диссертационной работы  
 Гребнева Павла Алексеевича

Комиссия в составе: председатель комиссии – проректор по учебной работе Д.Л. Щеголев; члены комиссии – начальник учебно-методического управления А.А. Гордин, декан инженерно-строительного факультета Б.Б. Лампси, заведующий кафедрой архитектуры, чл.-корр. РААСН, профессор В.Н. Бобылев составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы П.А. Гребнева «Звукоизоляция ограждающих конструкций зданий из сэндвич-панелей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения», используется в учебном процессе кафедры архитектуры ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Инженерный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей, разработанный П.А. Гребневым, используется при проведении практических занятий и лабораторных работ в рамках учебных дисциплин «Архитектура гражданских и промышленных зданий», «Строительная физика» по направлению подготовки «Строительство».

Использование указанного инженерного метода позволяет студентам повышать уровень знаний по строительной акустике в соответствии с современным уровнем развития науки.

Председатель комиссии:  
проректор по учебной работе



Д.Л. Щеголев

члены комиссии:

- начальник учебно-методического управления

А.А. Гордин

- декан инженерно-строительного факультета

Б.Б. Лампси

- заведующий кафедрой архитектуры,  
чл.-корр. РААСН, профессор



В.Н. Бобылев

Аттестат аккредитации № 1Р/16-РД-ИИ/24 от 25.08.2010 г.

тел. +7 (495) 740-43-61  
e-mail: info@pozhaudit.ru

Методитаты распространяются только на стандартный образец. Частичное распространение и одностороннее применение допускается только с письменного разрешения ИЦ ОСО и ЦП «ЮЖ-АУДИТ».



<b>НАИМЕНОВАНИЕ ПРОДУКЦИИ:</b>	Бескаркасная звукоизолирующая перегородка на основе сэндвич-панелей, толщиной 108 мм, изготовленная в соответствии с конструкторской документацией заказчика
<b>ИЗГОТОВИТЕЛЬ ПРОДУКЦИИ:</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», 603109, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65 Тел.: (831) 430-19-36 E-mail: <a href="mailto:nin@nngasu.ru">nin@nngasu.ru</a>
<b>МЕТОД ИСПЫТАНИЯ:</b>	ГОСТ 30403-96 «Конструкции строительные. Метод определения пожарной опасности».
<b>ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ:</b>	Договор с ННГАСУ № 003/И-15 от 20.01.2015 г.
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ:</b>	Образец бескаркасной звукоизолирующей перегородки на основе сэндвич-панелей, толщиной 108 мм, изготовленный в соответствии с конструкторской документацией заказчика по результатам испытания по ГОСТ 30403-96, соответствует классу пожарной опасности К0 (30).



## СОДЕРЖАНИЕ

1. Наименование и адрес заказчика, изготовителя .....	3
2. Характеристика заказываемой услуги .....	3
3. Основание для выполнения работ .....	3
4. Отбор образца .....	3
5. Характеристика объектов испытаний .....	3
6. Метод испытания.....	3
7. Процедура испытания .....	4
7.1. Условия проведения испытания .....	4
7.2. Порядок подготовки и проведения испытания .....	4
8. Испытательное оборудование .....	5
9. Средства измерения .....	5
10. Результаты испытаний .....	6
11. Заключение.....	9
12. Исполнитель.....	9
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	10
Приложение А.....	11
Приложение Б .....	12
Приложение В.....	13
Приложение Г .....	14



### 1. Наименование и адрес заказчика, изготовителя

Заявитель/ Изготовитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
603109, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65  
тел.: (831) 430-19-36

### 2. Характеристика заказываемой услуги

Испытание на пожарную опасность по ГОСТ 30403-96 образца бескаркасной звукоизолирующей перегородки на основе сэндвич-панелей, толщиной 108 мм, изготовленного в соответствии конструкторской документацией заказчика (далее – образец перегородки).

Конструкторская документация заказчика: Заявка на изобретение № 2014123097, приоритет 05.06.2014 г. «Звукоизолирующее ограждение». Авторы: В.Н. Бобылев, П.А. Гребнев, Д.В. Монич, В.А. Тишков.

### 3. Основание для выполнения работ

Испытания проводились на основании договора с ННГАСУ № 003/И-15 от 20.01.2015г.

### 4. Отбор образца

Образец перегородки на испытания был поставлен заявителем в соответствии с договором с ННГАСУ № 003/И-15 от 20.01.2015г.

### 5. Характеристика объектов испытаний

Образец бескаркасной звукоизолирующей перегородки на основе сэндвич-панелей, толщиной 108 мм, изготовленный в соответствии конструкторской документацией заказчика состоит из среднего слоя (внутреннее заполнение), разделительных слоев (акустическое разобщение из упругого материала) и облицовок из гипсоволокнистых листов.

Средний слой (внутреннее заполнение) толщиной 50 мм, выполнен из листов пенопласта ПСБС-25 (ТУ 2244-004-72988081-05), плотность 15 - 25 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие при 10% деформации не менее 0,10 МПа, предел прочности при изгибе не менее 0,18 МПа, теплопроводность не более 0,04 Вт/м<sup>2</sup>, водопоглощение за 24 часа не более 2% от объема.

Облицовки выполнены из гипсоволокнистых листов (ГВЛ), толщиной 12,5 мм (ГОСТ Р 51829-2001, «Лист ГВЛ. ТУ»). С каждой стороны образца было смонтировано по два листа ГВЛ с разбежкой швов не менее 100 мм.

Разделительные слои (акустическое разобщение) между средним слоем и облицовками (с обеих сторон перегородки) выполнены из нетканого упругого виброзвукоизоляционного полотна «ВиброИзоТекс» (маты из полиэфирного волокна), толщиной 4 мм, обработанного по технологии "VIPret" (ТУ 8397-001-99461752-2008). Поверхностная плотность: 300 г/м<sup>2</sup>, разрывная нагрузка по длине 450 Н, коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ): 0,036 Вт/м °С.

### 6. Метод испытания

ГОСТ 30403-96 «Конструкции строительные. Метод определения пожарной опасности».

ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

ТЕЛ. 495 7404381

109456 Г. МОСКВА А/Я 4

ИЦ ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2015 от 25.03.2015 г.

Всего 14

Лист 3



## 7. Процедура испытания

### 7.1. Условия проведения испытания

Наименование условий испытания	Значения показателей
Дата проведения испытаний	19.03.2015 г.
Температура окружающей среды, °C	20
Атмосферное давление, кПа	102,0
Относительная влажность воздуха, %	51
Скорость движения воздуха, м/сек	< 0,5

В процессе испытания в камерах испытательной печи поддерживались режимы, характеризуемые следующими зависимостями:

в огневой камере печи:  $T - T_0 = 345 \lg(8t + 1)$ , C° (ГОСТ 30247.0-94, п.6.1).

в тепловой камере печи:  $T - T_0 = 200 \lg(8t + 1)$ , C° (ГОСТ 30403.0-96, п.6.1).

### 7.2. Порядок подготовки и проведения испытания

Образец перегородки для испытания симметричной конструкции выполнен по технической документации заказчика и был поставлен в соответствии с договором.

#### Последовательность монтажа образца перегородки:

1) К среднему слою из пенопласта с обеих сторон перегородки были приклеены (точно, с шагом 200 – 300 мм) разделительные слои (акустическое разобщение) из нетканого упругого виброзвукоизоляционного полотна «ВиброИзоТекс». Для приклеивания использовался клей «TITAN WILD» (раствор поливинилацетата в органических растворителях).

2) К упругим слоям полотна «ВиброИзоТекс» с обеих сторон перегородки был приклеен (точно, с шагом 200 – 300 мм) первый слой облицовок из ГВЛ. Для приклеивания использовался клей «TITAN WILD».

3) К первому слою облицовок из ГВЛ (с обеих сторон перегородки) на стальных саморезающих шурупах (с шагом 200 мм) был закреплен второй слой облицовок из ГВЛ.

4) Все стыки первого и второго слоев ГВЛ, составляющих облицовки перегородки, были обработаны на всю толщину стыков вспучивающимся огнезащитным составом «СТАБИТЕРМ-217» (Сертификат соответствия № С-RU.ПБ34.В.01165).

Монтаж собранного заказчиком образца перегородки на установку осуществляли сотрудники испытательной лаборатории.

Образец перегородки фиксировался на установке и уплотнялся в зазорах по периметру минераловатной плитой.

Сотрудниками лаборатории устанавливались приборы измерения контролируемых параметров. Схема установки термопар приведена в Приложении 1.

#### Параметры, измеряемые и регистрируемые при испытании:

- температура в огневой и тепловой камерах печи;
- температура образца;
- температура газов «на выходе» из печи;
- способность к воспламенению газов, выделяющихся при термическом разложении материалов образца;
- образование горячего расплава.

Внешний вид образцов до, в процессе и после испытаний.

В процессе проведения испытаний фиксировалось изменение состояния образцов.

#### Продолжительность испытаний:

Продолжительность теплового воздействия должна соответствовать минимальному требуемому пределу огнестойкости испытываемой конструкции, но не должна превышать 45 мин.

**ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»**

ТЕЛ. 495 7404861

**109456 Г. МОСКВА А/Я 4**

ИЦ ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2015 от 23.03.2015 г.

Всего 14

Лист 4



## 8. Испытательное оборудование

Наименование испытательного оборудования	Заводской номер	Наименование документа до ввода в эксплуатацию
Установка (печь) для испытаний вертикальных строительных конструкций на пожарную опасность «КО-Вертикаль»	04	Аттестат № 004.03.14 сроком действия до 30.03.2015 г.

## 9. Средства измерения

№ п/п	Наименование определяемых (измеряемых) характеристик (параметров) продукции	Наименование СИ, тип (марка), заводской номер, год выпуска	Метрологические характеристики СИ		Свидетельство о поверке СИ, номер, срок действия
			Диапазон измерений	Класс точности, погрешность измерений	
1	Преобразование физических параметров объекта (температуры) в электрические сигналы	Преобразователь термоэлектрический ТПКС 125-0314.1600, № 424-428, 2014г.	0 ... +1200 °C	2	В паспорте НАВИГАТОР от 08.2014г. №424-428. до 09.2015г.
		Преобразователь термоэлектрический КТХА 02.01. № 4131/1/2-4131/1/8, 2014г.	0 ... +800 °C	2	№ СПТ 4131-1-2 до 21.11.2015
2	Измерение скорости движения воздуха	Анемометр электронный ЭА-70 модели ЭА-70(1) Зав. № 20 2010	0,2-30 м/с	+0,1 м/с (0,2 – 5 м/с)	№ 207/14-5079п, до 01.07.2015
3	Измерение интервалов времени испытаний	Секундомер механический СОСпр-2а-3-000 Зав. №4272, 2011	0...60 с 0...30 мин.	ц.д. 0,2 с ц.д. 1 мин	№ 1905-14 до 23.12.2015
4	Наружные и внутренние измерения	Штангенциркуль ШЦ-120 № 70625978, 2010, 2011	0...110 мм	Цена деления 0,1 мм,	№АА2175048 до 02.09.2015г.
5	Измерение линейных размеров	Линейка измерительная металлическая 0-500 мм Зав. №30101, 2010	0 ... 500 мм	ц.д. 1 мм	№ АА2187060 до 30.10.2015г.
6	Измерение линейных размеров	Рулетка, РТТ-17423, № 6/н, 2013	0...3000 мм	ц.д. 1 мм	№ 1901-14 до 21.12.2015 г
7	Измерение относительной влажности в помещении	Измеритель влажности Testo 606-1 № 206 2013г.	Диапазон измерений (0-50)%, Разрешение 0,1	Погрешность ±1%	№АА 2176223 до 09.09.2015г.
8	Измерение температуры	Измеритель-регулятор универсальный восьмиканальный ТРМ138В. Зав.№ 10522130102004227 Б13-000273. 2013г.	Диапазон с термопреобразователем ТХА(К), (-50 ... +1300) °C	Основная приведенная погрешность не более ±0,5%	15.01.2016г.
9	Измерение атмосферного давления	Барометр-анероид БАММ-1. Зав.№195, 2010г.	(80 – 106) кПа; (600 – 800) мм рт. ст.	Цена деления 0,1 кПа; 1,0 мм рт. ст.	№25/37/2/166-2015 до 03.02.2016г.
10	Регистрация физических параметров	«МИКРОЛАБ» Зав. № 03821, 2004	-270 ... +1300 °C	0,5	№ 1891-14 до 19.12.2015 г.

ООО «НПЦ «ПОЖ-АУДИТ»

ТЕЛ. 495 7404361

109456 Г. МОСКВА А/Я 4

ИЦ ООО «НПЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2015 от 25.03.2015 г.

Всего 14

Лист 5

### 10. Результаты испытаний

Результаты калибровки печи, результаты испытаний образца перегородки, приведены на рисунках 1-6.

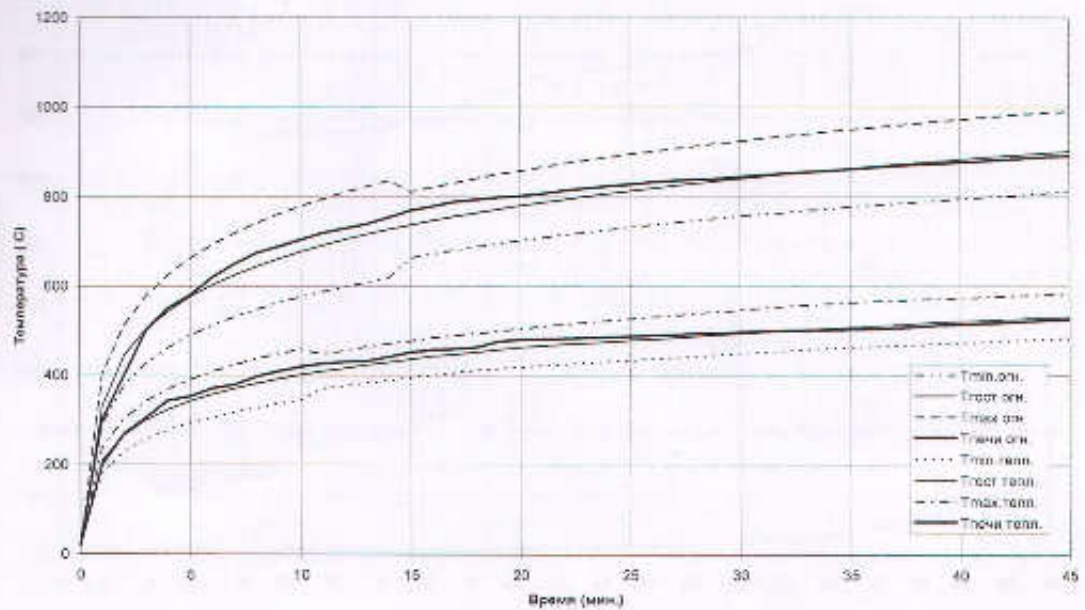


Рис. 1. Изменение температуры в огневой и тепловой камере печи при калибровке печи «КО-Вертикаль».

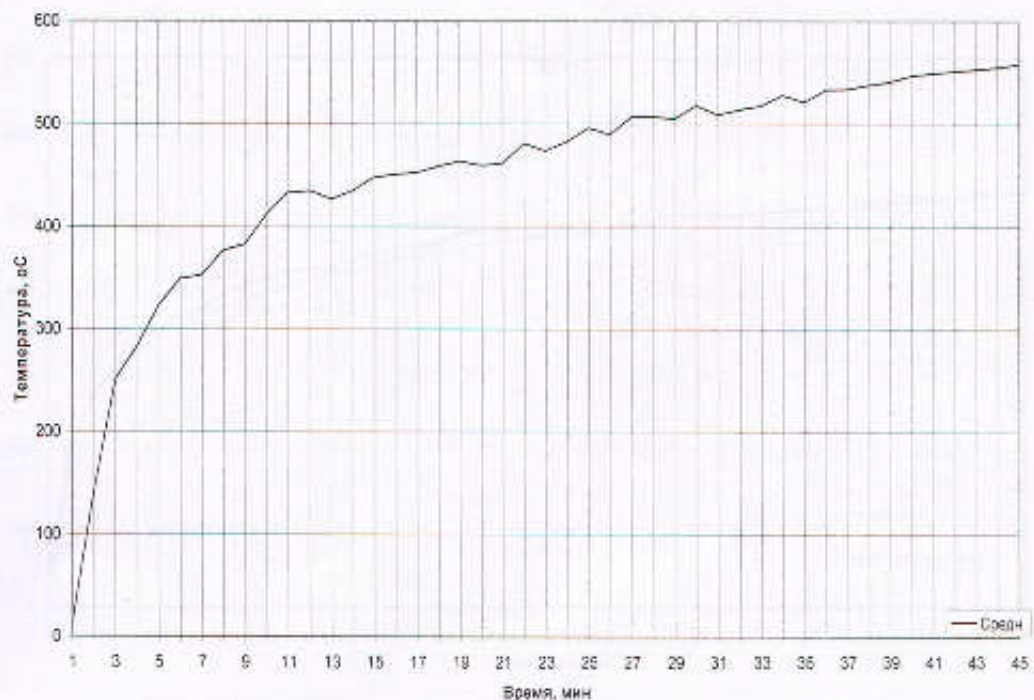


Рис. 2. Изменение температуры дымовых газов при испытании образца.

**ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»**

ТЕЛ. 495 7404361

**109456 Г. МОСКВА А/Я 4**

ИД ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2013 от 25.03.2015 г.

Всего 14

Лист 6



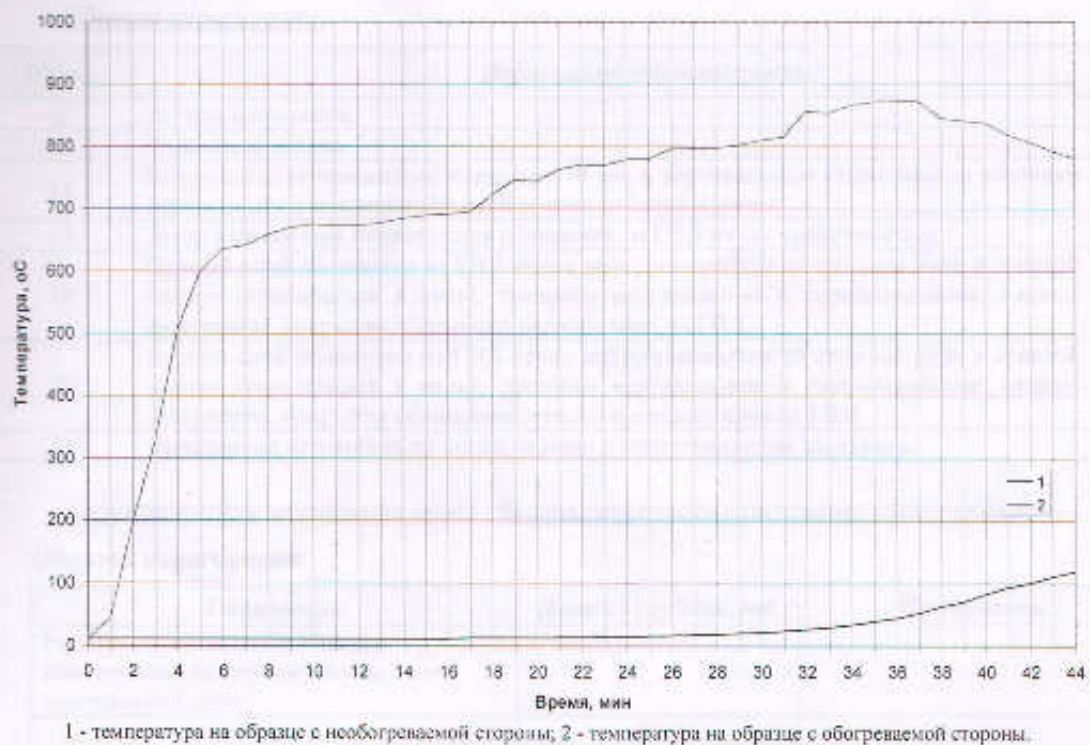


Рис. 3. Изменение температуры образца в зоне огневой камеры.

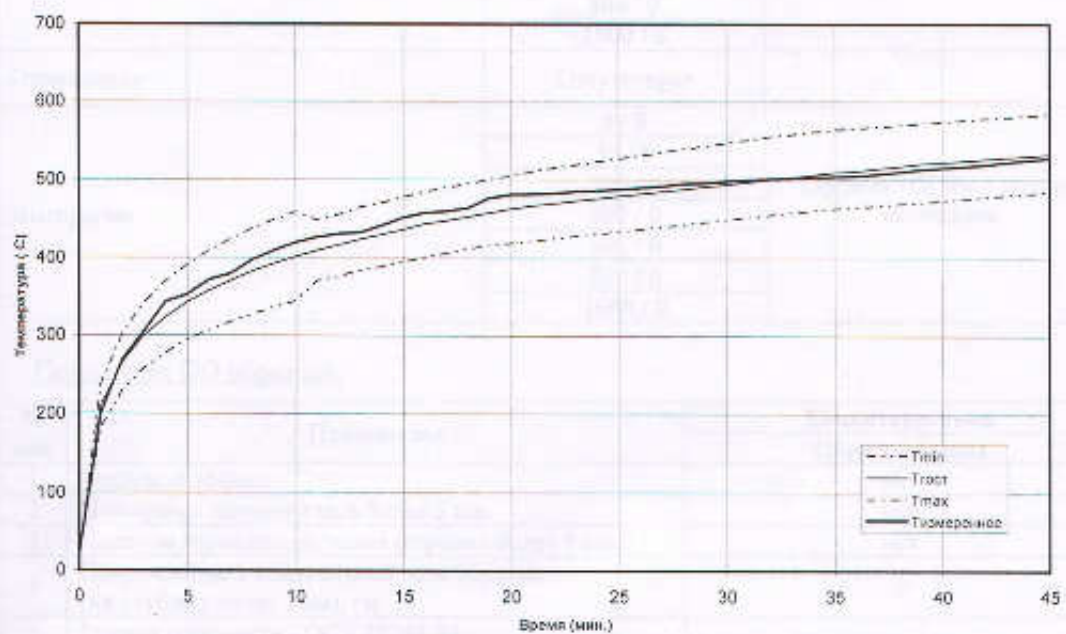


Рис. 4. Изменение температуры образца в зоне тепловой камеры.

**Наблюдения при испытаниях  
Образец перегородки.**

Время	Наблюдения при испытаниях
0	Начало испытания.
8	Появление запаха.
14	Вспучилось огнезащитное покрытие 10 мм в вертикальном стыке панели обшивки первого слоя равномерно по всей высоте огневой камеры.
15	Зазор в стыке шва первого слоя облицовки из ГВЛ начал увеличиваться.
19	Первый слой облицовки из ГВЛ начал деформироваться со стороны печи в огневой камере (прогибаться в печь), трещины вертикальные и горизонтальные, падают фрагменты покрытия облицовки первого слоя из ГВЛ.
29	Второй слой облицовки из ГВЛ начал деформироваться со стороны печи в огневой камере (прогибаться в печь), трещины вертикальные и горизонтальные, падают фрагменты покрытия облицовки первого и второго слоя из ГВЛ.
31	Завершение испытания по согласованию с представителем заказчика.

**Характеристика внутренних слоев образца перегородки (вскрытие конструкции)**

**Образец перегородки**

Параметры	Длина / глубина, мм	Примечания
Размеры повреждения образца конструкции на глубину более 2 мм в контрольной зоне:		
Обугливание	0 / 0	«0» - нижняя точка контрольной зоны
	50 / 0	
	200 / 0	
	400 / 0	
	600 / 0	
	800 / 0	
	1000 / 0	
Оплавление	Отсутствует	
Выгорание	0 / 0	глубина 108 мм – полное выгорание
	50 / 0	
	200 / 0	
	400 / 0	
	600 / 0	
	800 / 0	
	1000 / 0	

**Показатели ПО образцов:**

№ п/п	Параметры	Характеристика Образец стены
1	Тепловой эффект	нет
2	Пламенное горение газов более 5 сек.	нет
3	Наличие горящего расплава (горение более 5 сек.)	нет
4	Повреждение в контрольной зоне образца (на глубину более 2мм), см	0
5	Группа горючести ГОСТ 30244-94	-
6	Группа воспламеняемости ГОСТ 30402-96	-
7	Группа дымообразующей способности ГОСТ 12.1.044-96	-

**ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»**

ТЕЛ. 495 7404301

**109456 Г. МОСКВА А/Я 4**

ИЦ ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2015 от 25.03.2015 г.

Верно 14

Лист 8

## 11. Заключение


Класс пожарной опасности образца бескаркасной звукоизолирующей перегородки на основе сэндвич-панелей, толщиной 108 мм, изготовленный в соответствии конструкторской документацией заказчика по результатам испытания по ГОСТ 30403-96, соответствует классу пожарной опасности K0 (30).

## 12. Исполнитель

Испытатель

 М.О. Алексеев

Испытатель

 Ю.В. Алексеев



### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1. Настоящий протокол не является сертификатом пожарной безопасности, сертификатом соответствия.
2. Протокол действует период времени, в течение которого не были произведены изменения (но не более 3-х лет):
  - нормативных документов на продукцию и (или) метод испытания;
  - организации и (или) технологии производства.
3. В случае если вышеуказанное имело место, то сообщение об этом должно быть направлено заказчиком в лабораторию, проводившую испытания. На основании анализа влияния этих изменений испытательная лаборатория принимает решение о продолжении действия протокола об испытаниях.
4. Информация, содержащаяся в протоколе об испытаниях, а также наименование органа по сертификации и его эмблема, не могут быть использованы в целях рекламы среди общественности или каким-либо другим путем без письменного разрешения.
5. Страницы с изложением результатов испытаний не могут быть использованы отдельно без полного протокола об испытаниях.
6. Полученные результаты и выводы, содержащиеся в протоколе, относятся только к конкретно испытанному(ым) образцу(ам) и не отражают качество партии продукции, из которой взят(ы) данный(ые) образец(цы), а также качество всей выпускаемой продукции этого вида.
7. Если специально не оговорено, настоящий протокол предназначен только для использования Заказчиком.
8. Испытанные образцы, не разрушенные в процессе испытаний и неиспользованные остатки проб, могут быть забраны заявителем в течение 30 дней с момента выдачи протокола, после чего испытательный центр не несет ответственности за их сохранность.
9. Испытания проводились без привлечения субподрядчиков.



## Приложение А

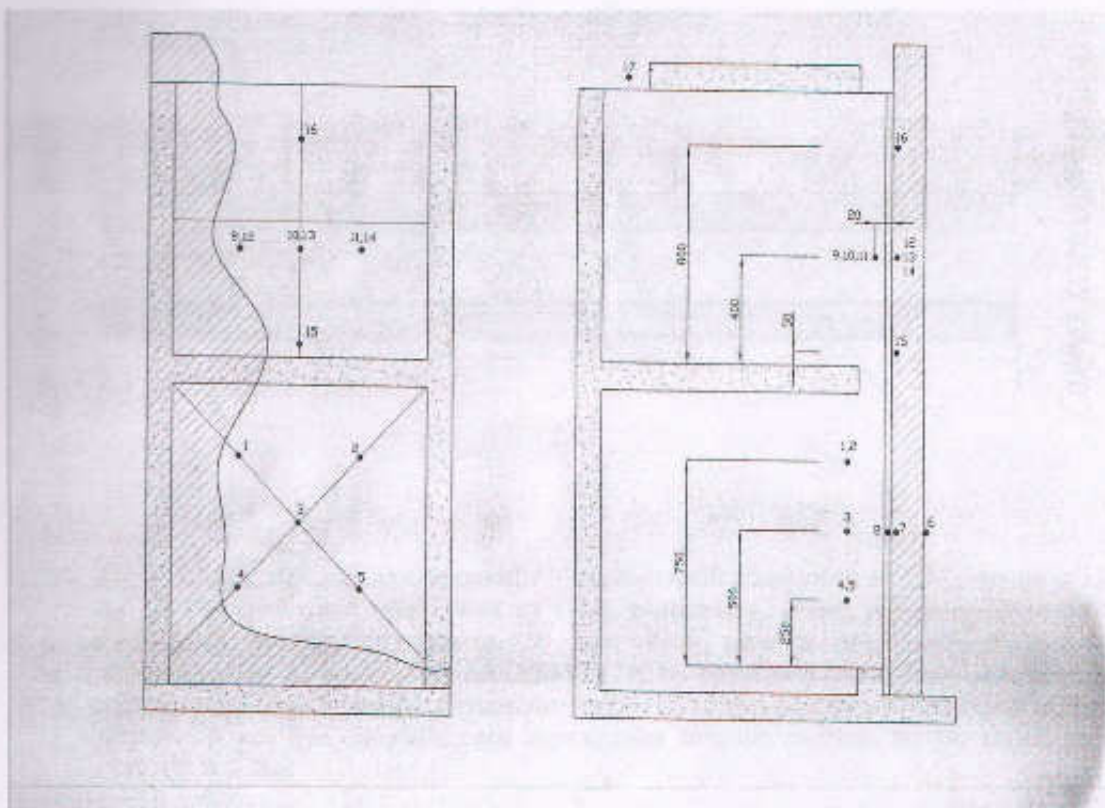


Рис. 5. Схема печи для испытания вертикальных конструкций.

## Приложение Б

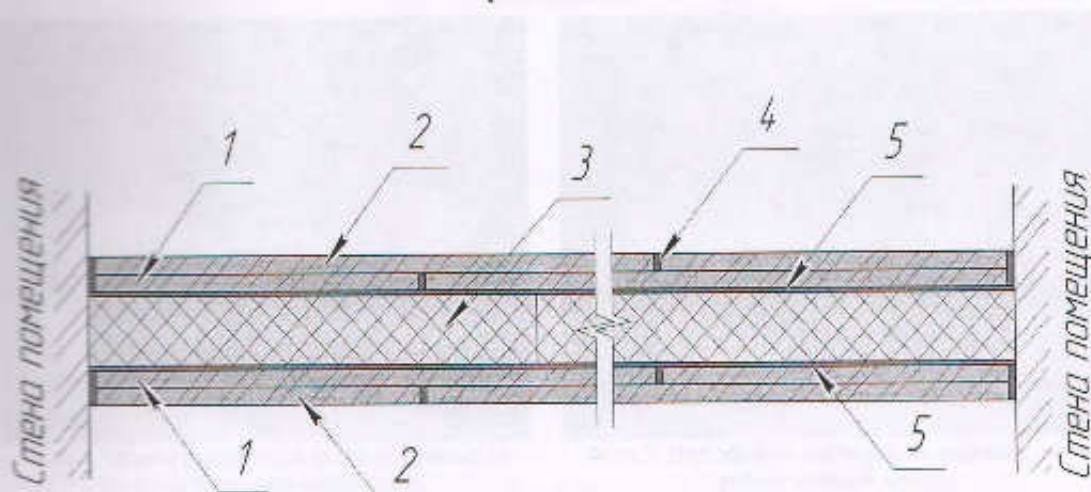


Рис. 6. Схема образца перегородки: 1 – первый слой облицовки из ГВЛ, толщина 12,5 мм; 2 – второй слой облицовки из ГВЛ, толщина 12,5 мм; 3 – средний слой из пенопласта ПСБС-25, толщина 50 мм; 4 – заделка швов вспучивающимся огнезащитным составом «СТАБИТЕРМ-217»; 5 – разделительный слой (акустическое разобщение) из полотна петляного виброзвукоизоляционного «ВиброИзоТекс», толщина 4 мм. Все смежные слои ограждения точно склеены между собой клеем «TITAN WILD».

## Приложение В



Фото 1. Общий вид образца после испытания со стороны теплового воздействия.

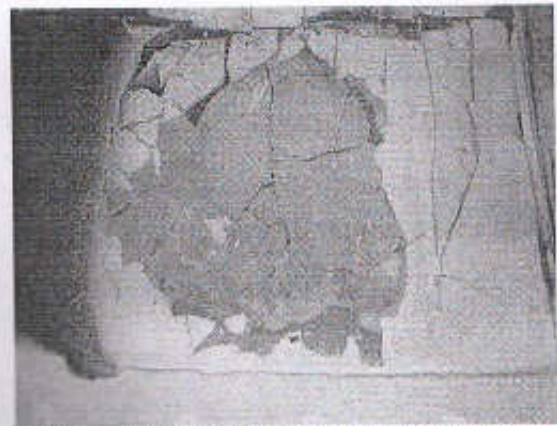


Фото 2. Вид образца после снятия верхнего слоя в районе огневой камеры.



Фото 3. Фрагмент образца после испытания, расположенный в районе огневой и тепловой камеры.



Фото 4. Фрагмент образца после испытания, расширенный в районе стыка на границе огневой и тепловой камеры.



Фото 5-7. Последынее изменение конструкции образца при тепловом воздействии в районе огневой камеры установки.



ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

ТЕЛ. 495 7404361

109456 Г. МОСКВА А/Я 4



ИД 000-ИТЦ-0000-0000

№ 000-000-000-0000

Дата 00.00.00



## Приложение Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ (обязательная сертификация)	
№	C-RU.ПБ34.В.01165 (номер сертификата соответствия)
ТР	1376004 (технический регламент)
ЗАЯВИТЕЛЬ	ООО НПФ «Лаборатория огнезащиты». Адрес: 606016, Россия, Нижегородская область, г. Дзержинск, ш. Автозаводское, д.51. ОГРН 1135249001800. Телефон/факс: +7 (8313) 23-00-11
ИЗГОТОВИТЕЛЬ	ООО НПФ «Лаборатория огнезащиты». Адрес: 606016, Россия, Нижегородская область, г. Дзержинск, ш. Автозаводское, д.51. ОГРН 1135249001800. Телефон/факс: +7 (8313) 23-00-11
ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ	ОС ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ» 109428, г. Москва, 1-й Вязовский проезд, д.5, стр.1, т./факс: (495) 740-43-62 (61). Почтовый адрес: 109456, а/я 4. ОГРН: 508774000489. Аттестат рег. № ТРПБ.RU.ПБ34 выдан 25.08.2010 г. МЧС России
ПОДТВЕРЖДАЕТ, ЧТО ПРОДУКЦИЯ	Краска огнезащитная водо-дисперсионная «СТАБИТЕРМ-217», выпускаемая по ТУ 2316-001-25572341-2013, при нанесении на грунтотку ГФ-021 (ГОСТ-25129-82), обеспечивает огнезащитную эффективность и соответствует с Приложением № 0439402, № 0439403, № 0439404. Серийный выпуск.
СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА (ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ)	Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ с изм. от 10.07.2012 г. в ред. ФЗ № 117), статья 136, статья 150. Метод испытаний по ГОСТ Р 32295-2009 «Методы огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности»
ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (ИСПЫТАНИЯ) И ИЗМЕРЕНИЯ	Протоколы испытаний № С-11/05-2013, № С-12/05-2013, № С-13/05-2013, № С-14/05-2013, № С-15/05-2013, № С-16/05-2013, № С-17/05-2013 от 17.05.2013 г., ИЦ ООО «ЦИС НИИЖБ-ПОЛИГОН», аттестат аккредитации № ТРПБ.RU.ИИ125 от 25.08.2010 г. Акт о результатах анализа состояния производства № 089/ОС-13 от 24.04.2013 г. ОС «ПОЖ-АУДИТ» ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ» № ТРПБ.RU.ПБ34 от 25.08.2010 г.
ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ДОКУМЕНТЫ	
СРОК ДЕЙСТВИЯ СЕРТИФИКАТА СООТВЕТСТВИЯ с	17.05.2013 по 17.05.2018
Руководитель (заместитель руководителя) органа по сертификации	 В.М. Губин
Эксперт (эксперты)	 И.А. Понедельняк

ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

ТЕЛ. 495 740 4361

109456 Г. МОСКВА А/Я 4

ИЦ ООО «НТЦ «ПОЖ-АУДИТ»

№ К-2/03-2015 от 25.03.2015 г.

Всего 14

Лист 14

**Протоколы испытаний образцов пенополиуретана по  
определению динамического модуля упругости**  
(Данные предоставлены каф. ВМСиКХ ННГУ им. Лобачевского Студент Захарычев Е.В.,  
Руководитель Рябов С.А.)

### Протокол

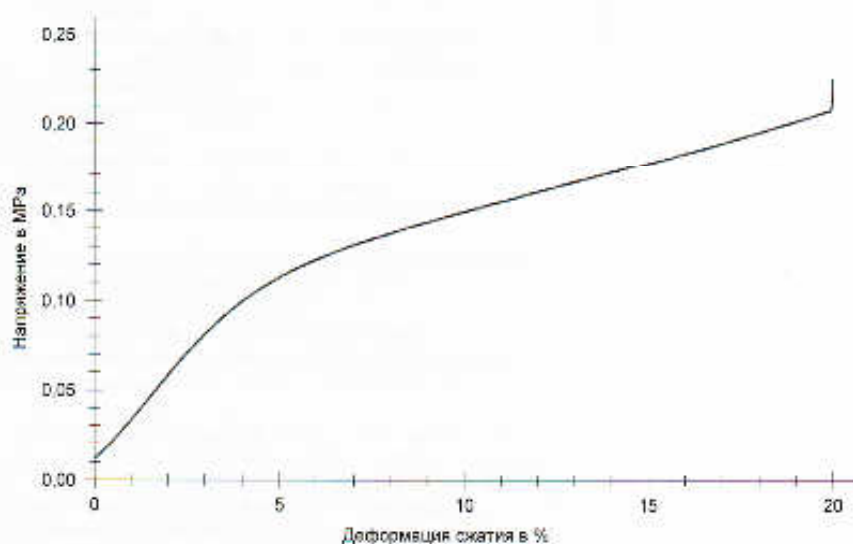
#### Параметр:

Номер заказа	Заказчик
Партия	Материал
Стандарт испытания	Датчик деформации
Лаборант	Датчик силы
Преднагрузка	0,01 МПа
Скорость преднагрузки	50 mm/min
Скорость испытания	50 mm/min

#### Результаты:

№	a0 mm	b0 mm	Высота mm	Fmax МПа	F разрушения МПа	s-разрушения mm	s-F макс mm
1	50	50	48,21	0,19	-	-	9,61
2	50	50	48,67	0,20	-	-	9,75
3	50	50	48,75	0,22	-	-	9,72
4	50	50	49,36	0,22	-	-	9,85
5	50	50	48,89	0,19	-	-	9,75
6	50	50	49,13	0,23	-	-	9,80
7	50	50	48,75	0,20	-	-	9,72
8	50	50	49,09	0,20	-	-	9,79

#### График серии:



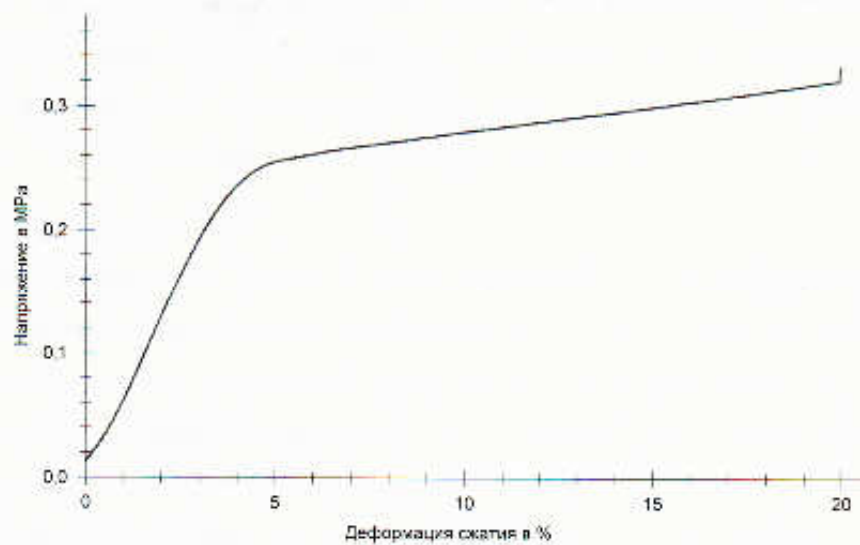
## Протокол

Преднагрузка : 0,01 МПа  
 Скорость преднагрузки : 50 mm/min  
 Скорость испытания : 50 mm/min

### Результаты:

Nr	a0 mm	b0 mm	Высота mm	Fmax МПа	F <sub>разрушения</sub> МПа	s-разрушения mm	s-F макс mm
1	50	50	48,50	0,29	-	-	9,66
2	50	50	48,88	0,35	-	-	9,74
3	50	50	48,80	0,34	-	-	9,72
4	50	50	48,43	0,29	-	-	9,65
5	50	50	48,88	0,31	-	-	9,74
6	50	50	48,49	0,35	-	-	9,66
7	50	50	48,60	0,30	-	-	9,69
8	50	50	50,00	0,35	-	-	9,95
9	50	50	48,91	0,31	-	-	9,75
10	50	50	48,67	0,31	-	-	9,69

### График серии:





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 153758

## ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩЕЕ ОГРАЖДЕНИЕ

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет" (ННГАСУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014123097

Приоритет полезной модели 05 июня 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 06 июля 2015 г.

Срок действия патента истекает 05 июня 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

А.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **153 758** (13) **U1**

(51) МПК

E04B 1/04 (2006.01)

E04B 2/00 (2006.01)

E04B 1/84 (2006.01)

E04B 2/92 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) (22) Заявка: 2014123097/03, 05.06.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.06.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.06.2014

(45) Опубликовано: 27.07.2015 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65,  
ННГАСУ, Отдел интеллектуальной  
собственности и трансфера технологий,  
Красавиной И.К.

(72) Автор(ы):

Бобылёв Владимир Николаевич (RU),  
Гребнев Павел Алексеевич (RU),  
Монич Дмитрий Викторович (RU),  
Тишков Владимир Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет"  
(ННГАСУ) (RU)

## (54) ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩЕЕ ОГРАЖДЕНИЕ

## (57) Формула полезной модели

1. Звукоизолирующее ограждение, состоящее из двух внешних листовых облицовок, среднего слоя из жесткого, легкого, пористого материала и двух разделительных слоев из упругого материала, отличающееся тем, что ограждение состоит, по меньшей мере, из двух отдельных панелей, соединенных между собой, в которых внешние листовые облицовки прикреплены к металлическим профилям, а два разделительных слоя выполнены из волокнистого упругого материала.

2. Звукоизолирующее ограждение по п. 1, отличающееся тем, что поверх одной из внешних листовых облицовок установлена дополнительная внешняя листовая облицовка.

3. Звукоизолирующее ограждение по п. 1, отличающееся тем, что поверх обеих внешних листовых облицовок установлены дополнительные внешние листовые облицовки.

RU 153 758 U1



Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение



Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

## УВЕДОМЛЕНИЕ О ПОСТУПЛЕНИИ ЗАЯВКИ

<b>08.06.2016</b>	<b>035636</b>	<b>2016122737</b>
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<b>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ</b> 08 ИЮН 2016	<b>(31) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</b> 035636	<b>ВХОДЯЩИЙ №</b> 2016122737
<b>(32) ДАТА ПЕРИОДА</b> международный заказ на интеллектуальную собственность		
<input type="checkbox"/> (86) международный заказ на интеллектуальную собственность <input type="checkbox"/> (87) (заказ в форме международной публикации международной заявки)	<b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> (полное имя, фамилия и отчество или наименование организации) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (НИГАСУ) 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильяминская, д. 65 Отдел интеллектуальной собственности и трансфера технологий, Красавиной Н.Н. Телефон: 8 (831) 4301936 Факс: 8 (831) 4301936 E-mail: onk@nigasu.ru	
<b>ЗАЯВЛЕНИЕ</b> о выдаче патента Российской Федерации на изобретение модели		
<b>(34) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ</b> «ИНЖЕНЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ОТСРАЖДЕНИЕ ПОНИЖЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ»		
<b>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица, место нахождения или фактический адрес, наименование юридического лица и юридический адрес)) 1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (НИГАСУ) 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильяминская, д. 65 2. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-Производственная фирма «Лаборатория безопасности» (ООО НПФ «Лаборатория безопасности») 606018, Россия, Нижегородская область, г. Дзержинск, ш. А.А.Ильинского, д.51 <input type="checkbox"/> патентная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнителем работ _____ (наименование заказчика) <input type="checkbox"/> исполнителем работает <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заключен работ _____ (наименование заказчика) Контакт: <b>И</b> _____ <b>М</b> _____ <b>(72) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (И) ЗАЯВИТЕЛЯ</b> (полное наименование физического или юридического лица, при наличии) лица, наделенного полномочиями от имени заявителя для подачи заявления на патентование изобретения, модели или полезной модели за его имя и фамилию, а также для осуществления иных действий, связанных с интеллектуальной собственностью или интеллектуальными правами в суде и/или в административном порядке) Ошанин, Николай Олегович (последнее – при наличии) Красавица Ирина Константиновна, ведущий инженер Отдела интеллектуальной собственности и трансфера технологий НИГАСУ Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильяминская, д. 65, комн. 233 в Сфера представительства (отдел и наименование организации, наименование организации, при наличии ее регистрации) Отдел интеллектуальной собственности и трансфера технологий НИГАСУ		
<b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ № 1:</b> ОГРН 1025000000000 ИНН 5206001001 ИНН 52060002707 <b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ № 2:</b> ОГРН 1135248001000 ИНН 524901001 ИНН 5249126180 <b>КОД страны по координату</b> BOWC ST. 3 RU		
<input type="checkbox"/> патентован изобретением <input type="checkbox"/> патентован моделью <input type="checkbox"/> патентован полезным знаком <input type="checkbox"/> патентован изобретением и моделью Телефон: 8 (831) 4301936 Факс: 8 (831) 4301946 E-mail: onk@nigasu.ru		
Регистрационный номер патентного документа _____		

Количество листов	20	Фамилия лица, принявшего документы
Количество документов, подтверждающих уплату пошлины	1	Сергеева Н.Н.
Количество изображений	0	



Рисунок 1 – Общий вид больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ (КВУ)

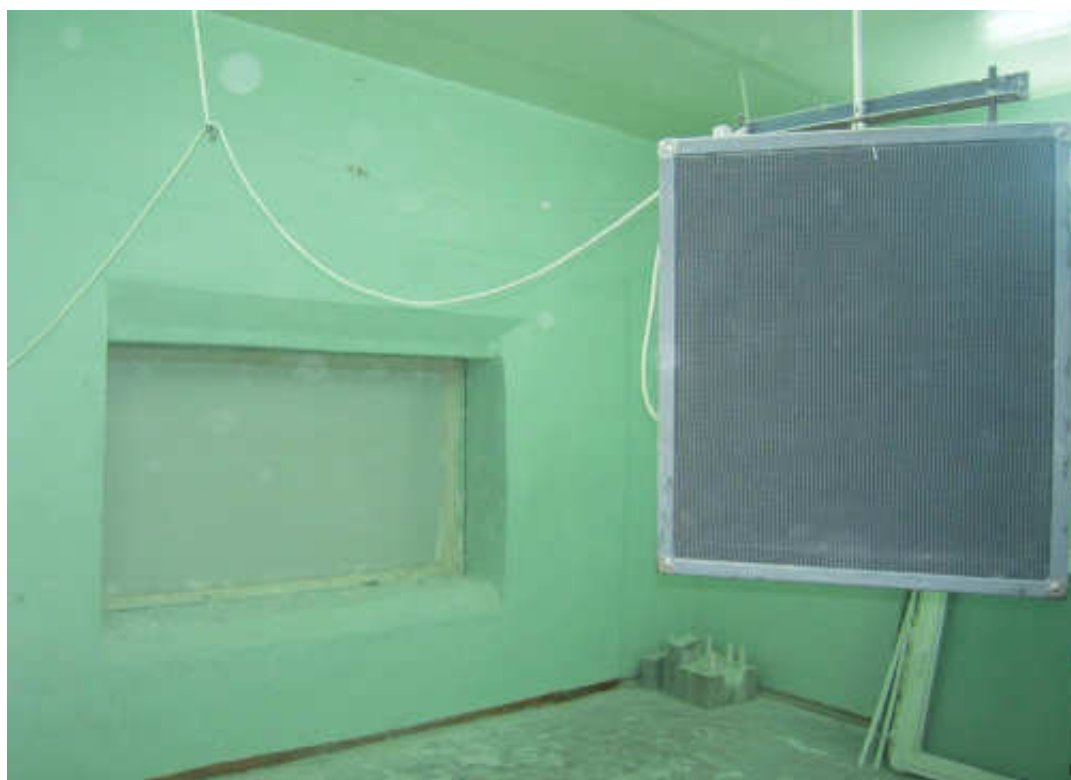


Рисунок 2 – Общий вид больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ (КНУ)

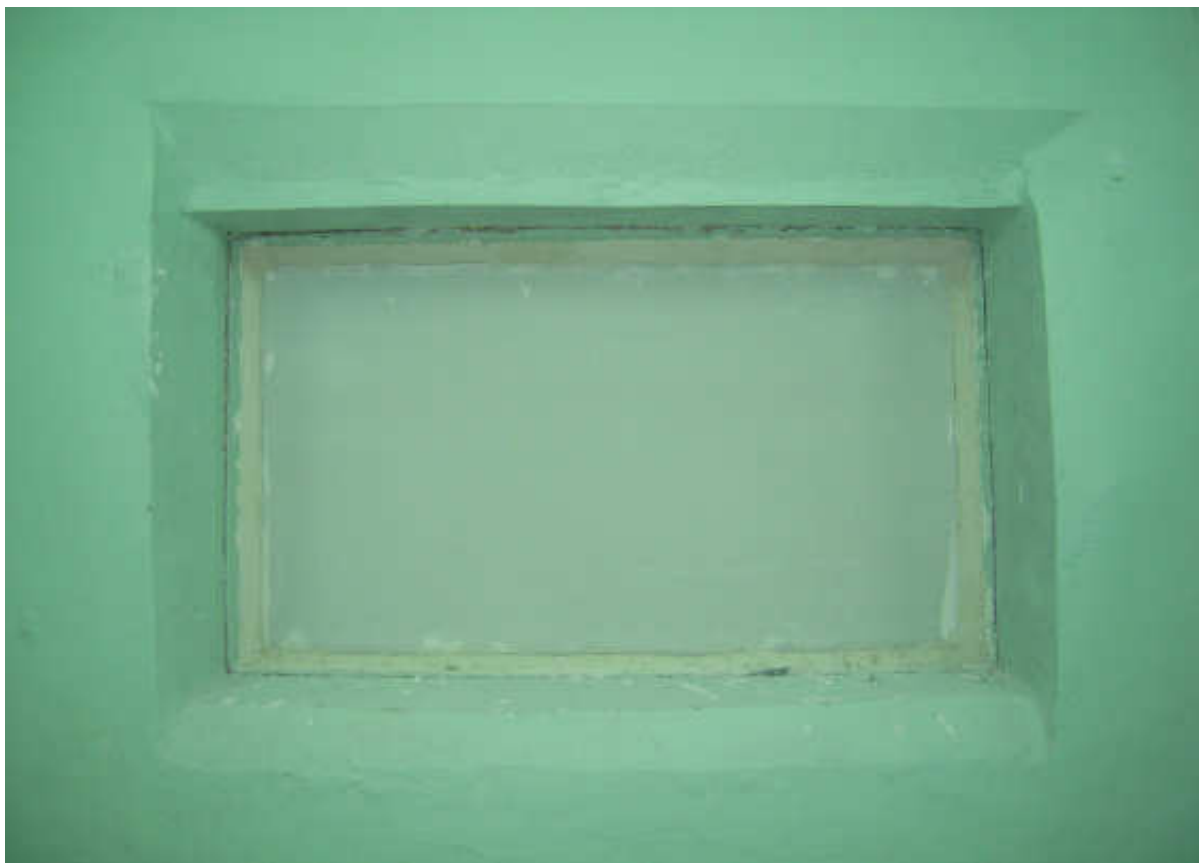


Рисунок 3 – Образец сэндвич-панели размером 2,0 м × 1,2 м установленный в проеме реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ



Рисунок 4 – Общий вид больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ



Рисунок 5 – Образец сэндвич-панели размером 3,6 м × 2,5 м установленный в проеме реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ



Рисунок 4 – Образец сэндвич-панели установленной в печи для испытания вертикальных конструкций на пожарную опасность





Рисунок 7 – Перегородка (размер 3,9 м × 2,5 м) из сэндвич-панелей при испытаниях ее звукоизоляции в натуральных условиях.



Рисунок 8 – Монтаж дополнительных внешних листовых облицовок на перегородку (размер 3,9 м × 2,5 м) из сэндвич-панелей при испытаниях звукоизоляции в натуральных условиях

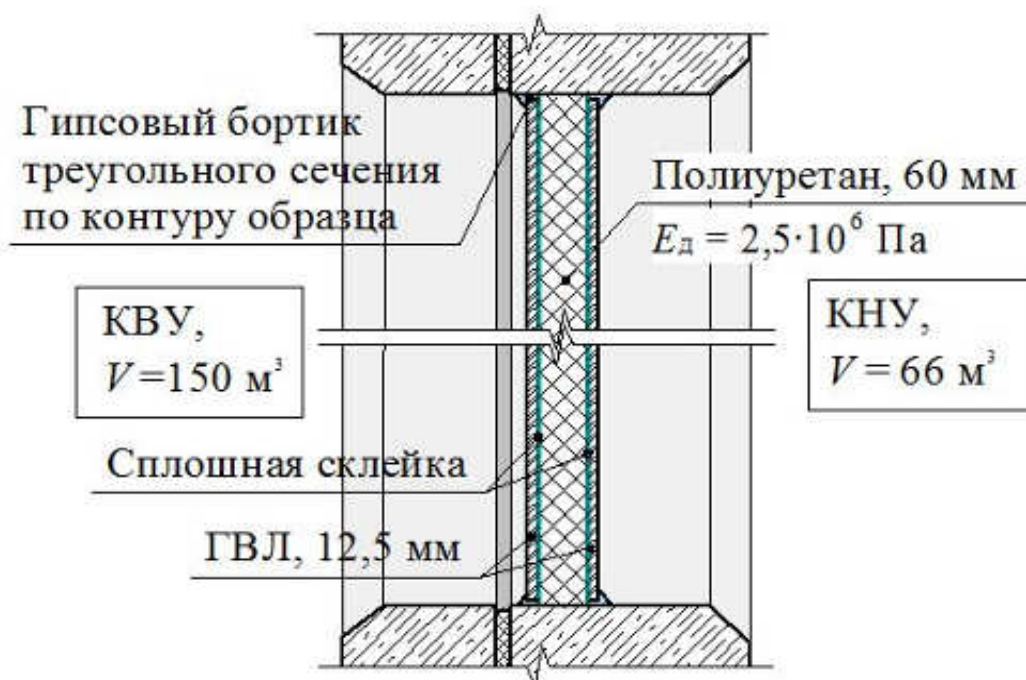


Рисунок 1 – Схема установки образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ

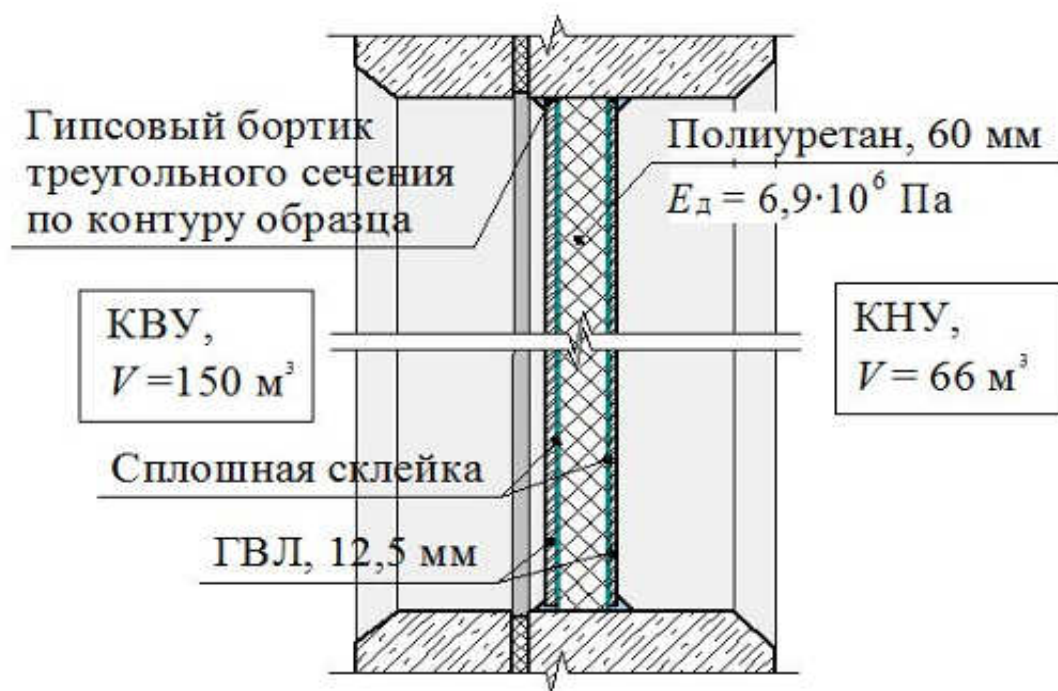


Рисунок 2 – Схема установки образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ

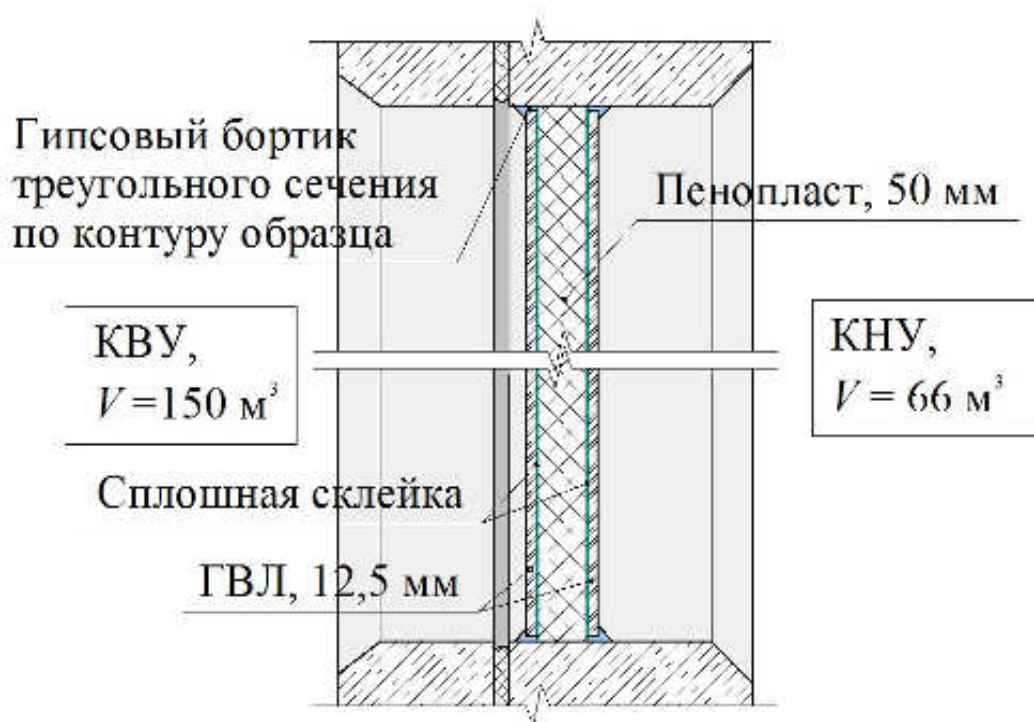


Рисунок 3 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) в которой, обе облицовки жестко склеены со средним слоем

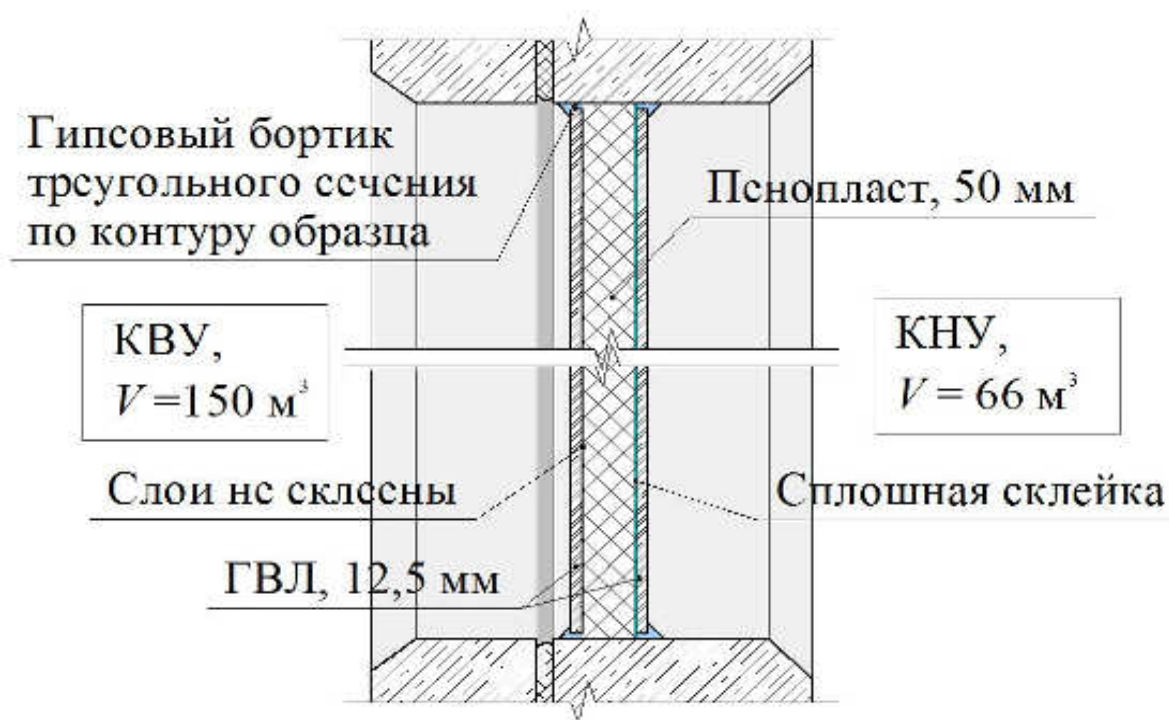


Рисунок 4 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) в которой, одна облицовка склеена со средним слоем, а вторая не склеена

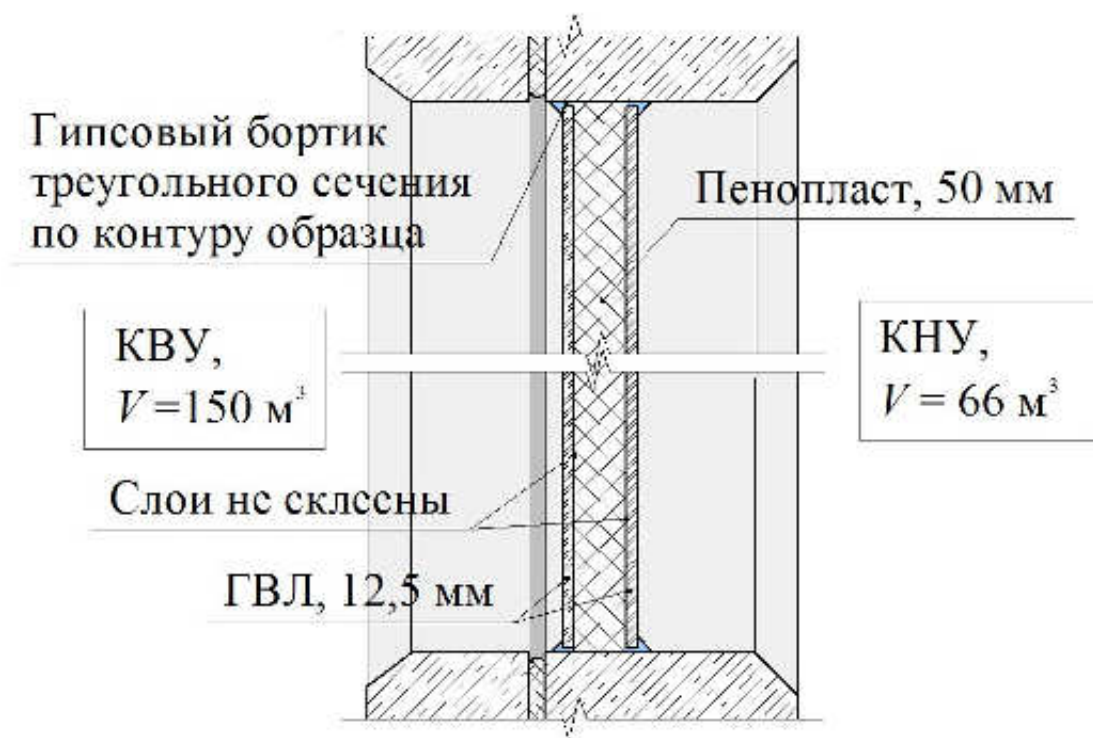


Рисунок 5 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) в которой, обе облицовки не склеены со средним слоем

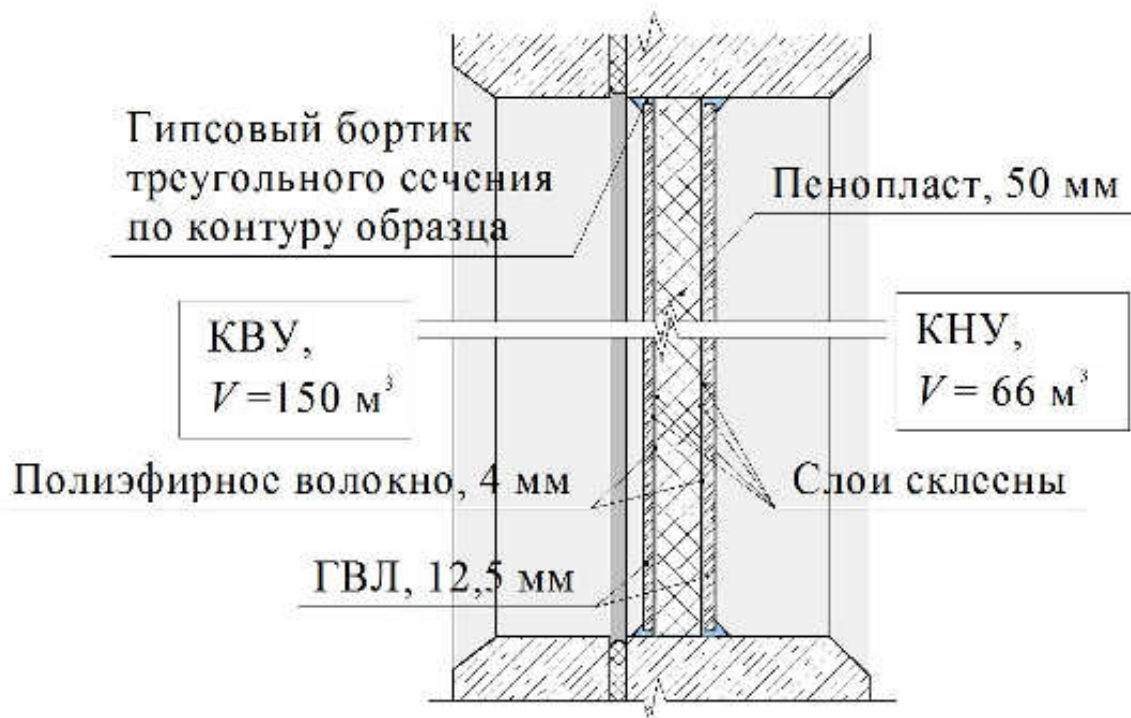


Рисунок 6 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) с акустическим разобщением в виде слоев полиэфирного волокна толщиной 4 мм



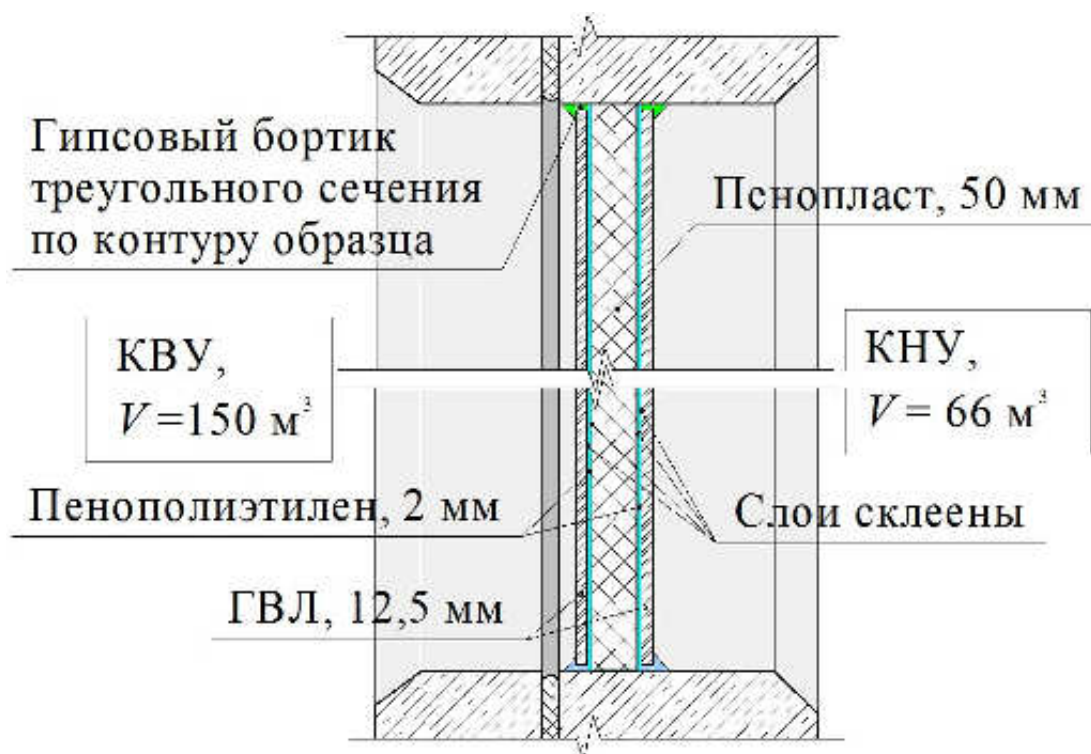


Рисунок 7 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ННГАСУ образца сэндвич-панели (размер 2,0 м × 1,2 м) с акустическим разобщением в виде слоев пенополиэтилена толщиной 2 мм

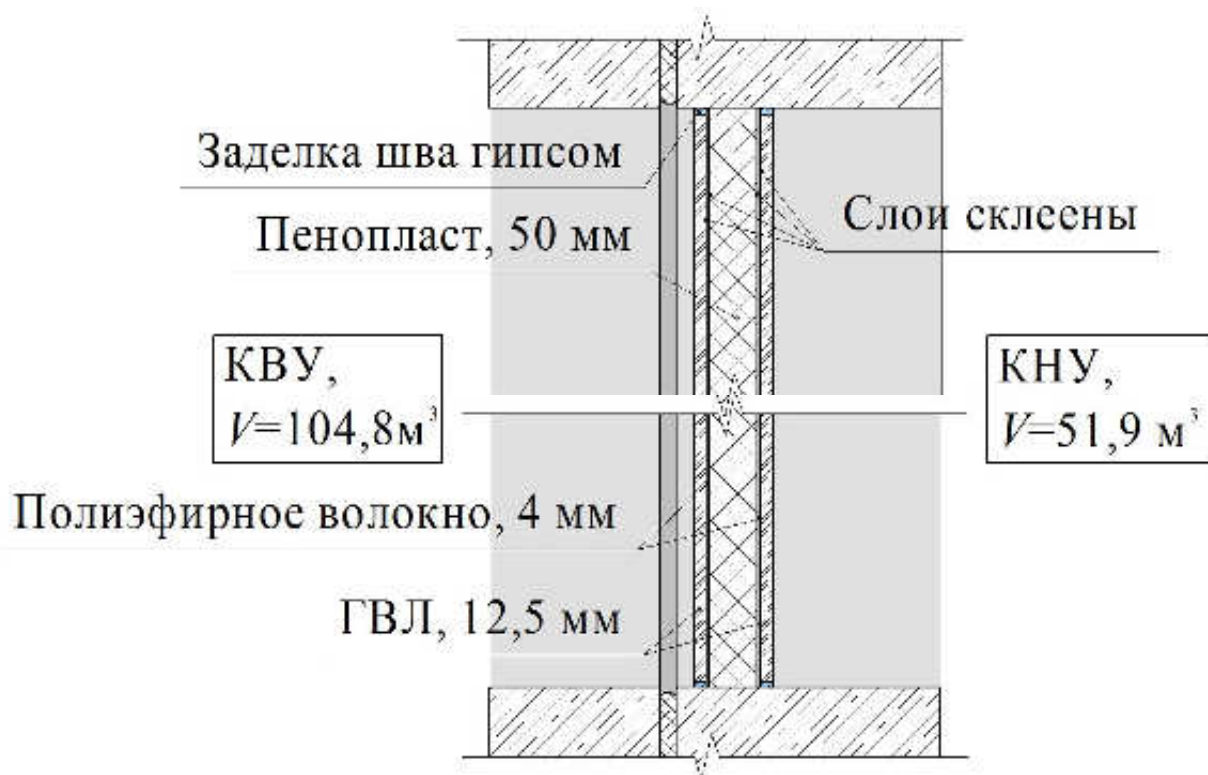


Рисунок 8 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ образца сэндвич-панели (размер 3,6 м × 2,5 м) с акустическим разобщением в виде слоев полиэфирного волокна толщиной 4 мм

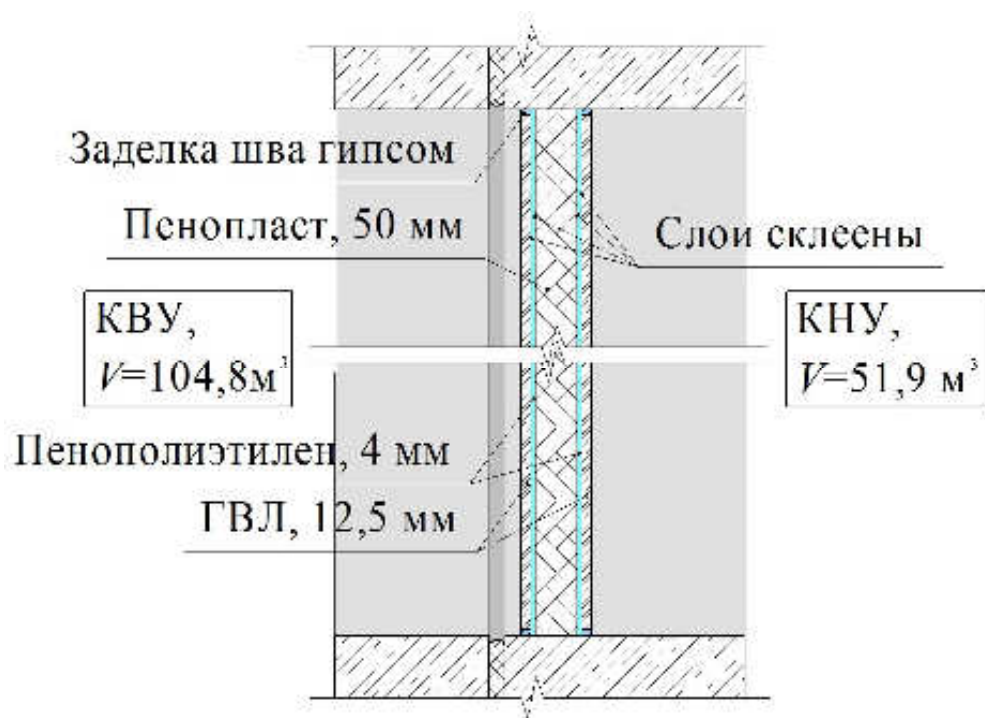


Рисунок 9 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ образца сэндвич-панели (размер 3,6 м × 2,5 м) с акустическим разобщением в виде слоев пенополиэтилена толщиной 4 мм

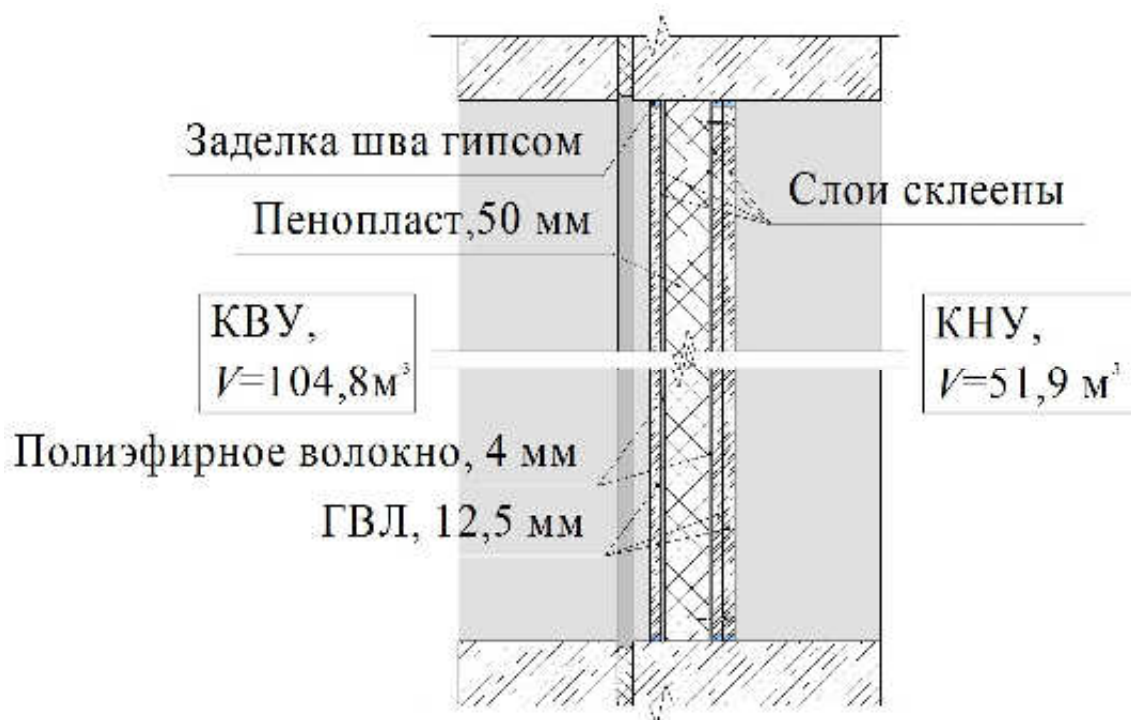


Рисунок 10 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ образца сэндвич-панели (размер 3,6 м × 2,5 м) с акустическим разобщением в виде слоев пенополиэтилена толщиной 4 мм с одной дополнительной внешней листовой облицовкой

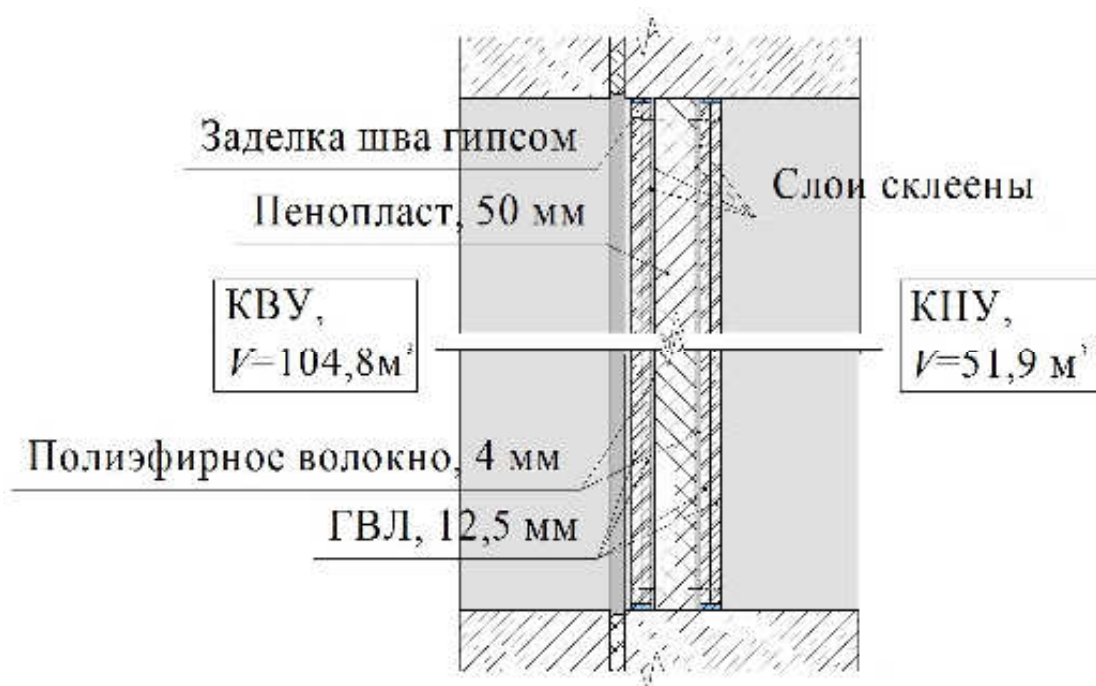


Рисунок 11 – Схема установки в проеме больших реверберационных камер лаборатории акустики ВоГУ образца сэндвич-панели (размер 3,6 м × 2,5 м) с акустическим разобщением в виде слоев пенополиэтилена толщиной 4 мм и двумя дополнительными внешними листовыми облицовками



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе



И.С. Соболев

«03» июня 2016 г.

## СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ

### стоимости возведения внутренних перегородок в зданиях

Определение сметной стоимости возведения внутренних перегородок, выполненных из различных строительных материалов, изделий и конструкций, осуществлено базисно-индексным методом с использованием лицензированного программного комплекса «Гранд-Смета», согласно следующих нормативных баз (2001 г.): ТЕР-2001, ТЕРр-2001, ТЕРм-2001, ТЕРп-2001, ТСЦ-2001, ФССЦ-2001, ТССЦпг-2001.

Пересчет локальных смет на текущую дату произведен с помощью индексов пересчета сметной стоимости от цен 2001 г. к ценам 2-го квартала 2016 г. – в соответствии с письмом Минстроя России № 17269-ХМ/09 от 03.05.2016 г.

Стоимость прямых затрат в позициях локальных смет соответствует актуальной нормативной базе ТЕР Нижегородской области (с изменениями И1-И6, постановление Правительства Нижегородской области № 247 от 15.04.2014 г.).

Для удобства применения сметно-нормативных баз была использована размерность в 100 м<sup>2</sup>.

Стоимость материальных ресурсов в сметах в соответствии с пунктами 4.24, 4.25 МДС 81-35.2004 определена:

- в базисном уровне цен – по нормативным сборникам ТСЦ-2001;
- в текущем уровне цен – по фактической стоимости материалов, изделий и конструкций по прайс-листам поставщиков, с учетом транспортных расходов (п. 4.60 МДС 81-35.2004), при этом как в уровне цен 4-го квартала 2015 г., так и с приведением стоимости к базе 2001 г.:

Сметная цена в базовом уровне =

$$= \frac{\text{цена по прайс-листу}}{1,18 \times \text{индекс пересчета в текущие цены, принятый по смете (разделу)}}$$

где 1,18 - коэффициент, учитывающий начисление НДС в конце сметы.

Величины накладных расходов приняты по видам строительно-монтажных, ремонтных, электромонтажных и пусконаладочных работ и не противоречат МДС 81-33.2004. Согласно МДС 81-33.2004, нормативы накладных расходов по видам строительных и монтажных работ следует применять на стадии разработки рабочей проектно-сметной документации, а также при расчетах за выполненные работы.

Величины сметной прибыли приняты по видам строительно-монтажных, ремонтных и электромонтажных работ и не противоречат МДС 81-25. 2001 (с учетом письма от 18.11.2004 г. № АП-5536/06 «О порядке применения нормативов сметной прибыли в строительстве»).

Согласно МДС 81-25.2001 при определении сметной стоимости строительно-монтажных работ на стадии разработки рабочей документации и расчетах за выполненные работы применяются нормативы сметной прибыли по видам строительных и монтажных работ.

Результаты сметного расчета:

1) стоимость возведения  $100 \text{ м}^2$  перегородки из кирпичной кладки толщиной 120 мм (с чистовой отделкой, оштукатуривание с обеих сторон) составит 148 624,00 руб. (см. табл. 1);

2) стоимость возведения  $100 \text{ м}^2$  перегородки из газосиликатных блоков толщиной 100 мм (с чистовой отделкой, шпаклевкой и затиркой швов) составит 97 213,00 руб. (см. табл. 2);

3) стоимость возведения  $100 \text{ м}^2$  каркасно-обшивной перегородки по системе «Кнауф» толщиной 100 мм (каркас 50 мм + 2 слоя листов ГВЛ по 12,5 мм (с каждой стороны); заполнение матами из минеральной ваты толщиной 50 мм) составит 124 014,00 руб. (см. табл. 3);

4) стоимость возведения  $100 \text{ м}^2$  бескаркасной перегородки из сэндвич-панелей (средний слой из пенопласта толщиной 50 мм, облицовки из 2-х слоев ГВЛ по 12,5 мм (с каждой стороны), акустическое разобщение из матов полиэфирного волокна «ВиброИзоТекс» толщиной по 4 мм, огнезащитная шпаклевка стыков), разработанной в рамках диссертационной работы П.А. Гребнева, составит 86 947,00 руб. (см. табл. 4).



Таблица 1

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.				Общая стоимость, руб.				Затраты труда рабочих, чел.-ч, не занятых обслуживанием		
				всего	эксплуатационный	в т.ч. оплаты труда	материалы	Всего	оплаты труда	эксплуатационный	в т.ч. оплаты труда	материалы	на единицу	всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Раздел 1. Перегородка из кирпичной кладки														
1	ТЕР08-02-001-05	Кладка перегородок из кирпича неармированных толщиной в 1/2 кирпича при высоте этажа до 4 м (100 м2 перегородок (за вычетом проемов))	1	10766,61 1285,83	361,72 55,59	9119,08	10767	1286	362 56	9119	143,90	143,90		
2	ТЕР15-02-016-05	Шпаклевка поверхностей внутри здания цементно-известковым или цементным раствором по камню и бетону высококачественная стен (100 м2 оштукатуриваемой поверхности)	2	2814,16 1408,77	114,57 63,56	1290,82	5629	2818	229 127	2581	135,72	271,44		
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.				16395				4104	591 183	11700		415,43		
Накладные расходы								4729						
Сметная прибыль								2894						
Итого по разделу 1 Перегородка из кирпичной кладки				148624								415,43		
ИТОГИ ПО СМЕТЕ:														
Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г.				16395				4104	591 183	11700		415,43		
Накладные расходы								4729						
Сметная прибыль								2894						
ВСЕГО по смете				148624								415,43		

Таблица 2

№ п/п	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.				Общая стоимость, руб.				Затраты труда рабочих, чел.-ч, не занятых обслуживанием	
				всего	эксплуатации		материалы	Всего	оплаты труда	эксплуатации		материалы	на единицу
					оплаты труда	в т.ч. оплаты труда				в т.ч. оплаты труда	в т.ч. оплаты труда		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<b>Раздел 1. перегородка из газосиликатных блоков</b>													
1	ТЕР08-04-003-01	Кладка перегородок из газобетонных блоков на клею толщиной 100 мм при высоте атака до 4 м (100 м2 перегородок)	1	6831,27 542,88	122,18 10,57	6206,21	8931	543	122 11	6266	62,4	62,4	
2	ТЕР15-02-019-03	Сплошное выравнивание внутренних поверхностей (однослойное оштукатуривание) из сухих растворных смесей толщиной до 10 мм стен (100 м2 оштукатуриваемой поверхности)	2	2935,08 499,18	29,36 19,11	2407,14	5971	898	59 38	4814	57,89	103,76	
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.				12802			12802	1541	181 49	11080		166,18	
Накладные расходы													
Сметная прибыль							1784						
<b>Итого по разделу 1 перегородка из газосиликатных блоков</b>							1013						
<b>ИТОГИ ПО СМЕТЕ:</b>							97213					166,18	
Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г.				12802			12802	1541	181 49	11080		166,18	
Накладные расходы							1784						
Сметная прибыль							1013						
<b>ВСЕГО по смете</b>							97213					166,18	

Таблица 3

№ пп	Шифр и номер позиции норматива	Наименование работ и затрат, единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.				Общая стоимость, руб.				Затраты труда рабочих чел.-ч, не занятых обслуживанием	
				всего	эксплуатации	материалы	Всего	оплаты труда	эксплуатации	материалы	на единицу		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<b>Раздел 1. Перегородка "Кнауф"</b>													
1	ТЕР10-06-032-01	устройство перегородок из гипсоволокнистых листов (ГВЛ) по системе «Кнауф» с односторонним металлическим каркасом и двухсторонней обшивкой с обеих сторон (С 382) тухах (100 м2 перегородок (за вычетом проемов))	1	15533,29 1368	17,4	14147,89	15533	1368	17	14148	144	144	
2	ТСЦ-104-0099	Гипсы минераловатные «Лайт-Бетс» ROSKWOOL, толщина 50 мм (№2)	103	16,11		16,11	1665			1665			
Итого прямые затраты по разделу в ценах 2001г.													
Накладные расходы							17398	1368	17	18013			144
Сметная прибыль							1614						
Итого по разделу 1 Перегородка "Кнауф"							952						
							124014						144
<b>ИТОГИ ГО СМЕТЕ:</b>													
Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г.							17398	1368	17	18013			144
Накладные расходы							1614						
Сметная прибыль							952						
ВСЕГО по смете							124014						144





*Список использованных источников*

1. Письмо Минстроя России от 03.06.2016 г. № 17269-ХМ/05 «О рекомендуемых к применению в II квартале 2016 года индексах изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексах изменения сметной стоимости пусконаладочных работ, индексах изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ, индексах изменения сметной стоимости прочих работ и затрат, а также индексах изменения сметной стоимости оборудования».
2. Межрегиональный сборник коэффициентов пересчета сметной стоимости строительно-монтажных работ по субъектам РФ от ФЕР-2001 к ТЕР-2001. Выпуск 3.
3. МДС 81-35.2004. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации. Актуализированная редакция.
4. МДС 81-25.2001. Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве. Актуализированная редакция.
5. МДС 81-33.2004. Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве. Актуализированная редакция.
6. ТЕР-2001 (2009). Территориальные единичные расценки по Нижегородской области.

Смету разработал:

Начальник  
управления экспертных работ



А.А. Шапошников