

На правах рукописи

ШАШКОВА ЛОЛА ЭДУАРДОВНА

**ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ
ВИБРОДЕМПФИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С ИЗМЕНЕННОЙ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Вологда – 2014 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет».

Научный руководитель: **Кочкин Александр Александрович**

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Овсянников Сергей Николаевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий» ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Антонов Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный технологический университет"

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238 г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, светотехнический корпус, к. 205, тел. (495) 482-40-76, факс (495) 482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде и на сайте НИИ строительной физики РААСН www.niisf.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Акустический комфорт в гражданских и промышленных зданиях зависит от величины шума, проникающего через ограждающие конструкции извне. Для защиты от этого шума в настоящее время наиболее эффективным способом является обеспечение необходимой изоляции шума путем устройства соответствующих конструкций. Выполненные в последнее время исследования показывают, что наиболее эффективными для защиты от шума, проникающего из соседних помещений, являются легкие ограждающие конструкции. К таким наиболее перспективным легким ограждающим конструкциям относятся слоистые конструкции с внутренними вибродемпфирующими слоями. Исследование этих конструкций показало, что их звукоизолирующая эффективность зависит от их внутренних потерь и изгибной жесткости. При соответствующем соотношении потерь и жесткости конструкции можно получить достаточно эффективные конструкции, обеспечивающие звукоизоляцию при минимуме увеличения массы и расхода материалов. Поэтому исследование конструкций из вибродемпфированных элементов с учетом изменения их изгибной жесткости в соотношении с демпфирующими свойствами является актуальной научной задачей в области строительной акустики, имеющей важный практический интерес.

В настоящее время такие исследования, связанные с соотношением изгибной жесткости и вибропоглощения конструкций, проведены в недостаточном объеме, и отсутствуют конструкции, учитывающие соотношения этих характеристик.

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета и проектирования вибродемпфированных элементов с повышенными звукоизолирующими свойствами за счет изменения изгибной жесткости и повышения вибродемпфирующих свойств.

Основные задачи работы: разработать новый тип звукоизолирующих вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью; исследовать на основе теории самосогласования звуковых полей помещений и вибрационных полей пластин механизм прохождения и излучения звука в вибродемпфированных элементах конечных размеров с учетом изменения их изгибной жесткости и повышения вибропоглощения; определить жесткостные параметры вибродемпфированных элементов, при которых они обладают предельно возможной звукоизоляцией; разработать практический способ построения частотных характеристик звукоизоляции вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью; исследовать влияние жесткостных и вибропоглощающих характеристик вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью на их звукоизоляцию; разработать практический метод расчета звукоизоляции вибродемпфированных элементов, позволяющий проектировать звукоизолирующие ограждения с учетом заданных жесткостных и вибропоглощающих характеристик слоев вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью; дать рекомендации по проектированию конструктивных решений вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью для применения их в звукоизолирующих конструкциях гражданских зданий.

Научную новизну работы составляют:

- новые вибродемпфированные элементы с измененной изгибной жесткостью, обеспечивающие по сравнению с обычными слоистыми вибродемпфированными элементами более высокую акустическую и технико-экономическую эффективность;

- результаты исследования повышения звукоизоляции на основе теории М.С. Седова, описывающие прохождение и излучение звука в вибродемпфированных элементах с измененной изгибной жесткостью;

- метод расчета звукоизоляции вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью;

- теоретически и экспериментально обоснованные рекомендации по проектированию вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью, обеспечивающие высокую акустическую эффективность элементов и звукоизолирующих конструкций из этих элементов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенная и теоретически обоснованная методика позволяет проектировать новые вибродемпфированные элементы конечных размеров с измененной изгибной жесткостью. Разработанный практический метод расчета звукоизоляции вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью и программа для его реализации на ЭВМ позволяет производить проектирование вибродемпфированных элементов на основе выбора наиболее рационального соотношения параметров элементов, влияющих на их звукоизоляцию.

Научная методология решения задач и методы исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования выполнены на основе теории М.С. Седова о самосогласовании звуковых полей помещения и вибрационного поля пластины применительно к конструкциям с вибродемпфированием. Экспериментальные исследования выполнены по стандартной методике в больших реверберационных камерах Вологодского государственного университета с использованием электроакустической аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер».

Положения, выносимые на защиту: новые вибродемпфированные элементы с измененной изгибной жесткостью, предназначенные для использования в качестве элементов звукоизолирующих конструкций в зданиях; результаты исследования повышения звукоизоляции на основе теории М.С. Седова, описывающие прохождение и излучение звука в вибродемпфированных элементах с измененной изгибной жесткостью; метод расчета звукоизоляции вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью; результаты исследований влияния на звукоизоляцию вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью их конструктивных параметров и вибропоглощающих характеристик; рекомендации по проектированию ограждающих конструкций из вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена на основе сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных, полученных в больших реверберационных камерах для

конструкций с вибродемпфированием при различных жесткостных и вибропоглощающих характеристиках элементов с измененной изгибной жесткостью. Все необходимые расчеты при сравнительном анализе производились на ЭВМ по специально разработанной программе.

Материалы диссертации обсуждались на: всероссийских научно-технических конференциях «Вузовская наука - региону» (Вологда, 2004–2005, 2010, 2014 гг.); IV международной практической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» (Пенза, 2005 г.); международной научно-технической конференции «Гармонизация европейских и российских нормативных документов по защите населения от повышенного шума» (Москва - София - Кавала, НИИСФ РААСН, 2009 г.); девятой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития жилищного хозяйства городов и населенных пунктов» (Москва - София - Кавала, 2010 г.); международной научно-практической конференции «Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология» (Москва - Будва, НИИСФ РААСН, 2010 г.); XV международной научно-практической конференции «Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ» (Москва - Будва, НИИСФ РААСН, 2011 г.); научной конференции – II-V академические чтения, посвященные памяти академика Г.Л. Осипова (Москва, 2010–2013 гг.); международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве» (Москва - Кавала, НИИСФ РААСН, 2013 г.); VII ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых (Вологда, ВоГУ, 2013 г.).

Внедрение результатов работы. Предложенные в патентах вибродемпфированные элементы с измененной изгибной жесткостью использованы при разработке конструкций повышенной звукоизоляции в практике строительства подрядных организаций Вологодской области. На основе предложенных решений разработаны ограждающие конструкции с вибродемпфированием для снижения шума в жилых комнатах, смежных с предприятием обслуживания населения ООО «КомплексПроект», а также при оценке снижения шума на объектах, запроектированных ООО «ВологдаСтройКомп», ООО «ПрофПроект» и ООО «Реконструкция». Полученные результаты работы используются в учебном процессе ВоГУ при подготовке бакалавров по направлению «Строительство», «Реставрация» и «Архитектура». Новизна и полезность результатов работы подтверждена двумя патентами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, в т.ч. 4 из них в изданиях по списку ВАК, получено 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 247 наименований и 8 приложений. Основной материал, включая рисунки и таблицы, изложен на 133 страницах, объем приложений – 18 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, обсуждается новизна и практическая значимость работы, дана общая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ научных теоретических исследований звукоизоляции ограждающих конструкций, как однослойных, так и с вибродемпфированием. В главе рассмотрены ограждающие конструкции из слоистых вибродемпфированных элементов и оценены основные факторы, влияющие на их звукоизоляцию. Рассмотрено состояние современных теоретических и экспериментальных методов исследования звукоизоляции этих конструкций и определены пути повышения звукоизолирующих качеств слоистых вибродемпфированных элементов. В практике строительства известен один из таких способов, применяющийся для однослойных конструкций: изменение их изгибной жесткости, что достигается путем устройства пропилов в конструкции. Данный подход можно использовать более эффективно в слоистых вибродемпфированных элементах и конструкциях из них. Здесь достижение эффекта может быть обеспечено путем использования двух приемов: изменение изгибной жесткости конструкции путем её уменьшения и заполнение образовавшихся пропилов вибропоглощающим материалом. Такой подход дает возможность уменьшить изгибную жесткость и повысить вибропоглощение внутри конструкции. Все это может привести к увеличению звукоизолирующих качеств конструкций из вибродемпфированных элементов, используя оставшиеся резервы повышения звукоизоляции таких элементов.

В работе предлагаются ограждающие конструкции из вибродемпфированных элементов, состоящие, как правило, из двух наружных слоев, с расположенными в них наружными или внутренними пропилами в двух взаимно перпендикулярных направлениях, с размещением между листами и возможно в пропилах вибродемпфирующего материала. Данные конструкции можно использовать и как составные элементы в двойных ограждениях. Эти конструкции по сравнению с однослойными, равными по поверхностной плотности, имеют более высокую звукоизоляцию за счет параметров, исследуемых в данной работе. В главе произведен анализ теоретических и экспериментальных исследований звукоизоляции таких элементов, позволяющий использовать эти подходы для исследования предложенных конструктивных элементов.

Исследованием прохождения звука через слоистые ограждения занимались Л. Беранек, В. Томсон, И. Кервин, Д. Росс, Е. Унгар, Г. Куртце, Л.М. Бреховских, Л.М. Лямшев, М.С. Седов, В.И. Юлин, А.А. Кочкин. Изучению вибродемпфирующих свойств ограждений посвящены работы Г.М. Авиловой, Б.Д. Тартаковского, А. Коста.

Впервые эффект изменения звукоизоляции при условии изменения изгибной жесткости без увеличения поверхностной плотности был отмечен Л. Кремером и А. Айзенбергом и после исследован Ю.М. Ильяшук и другими учеными. В.И. Заборов указал, что причиной повышения звукоизоляции является смещение граничной частоты волнового совпадения в область более высоких частот. В своих работах И.И. Боголепов делает вывод, что звукоизоляция однослойных пластин определяется соотношением ее толщины, поверхностной массы, изгибной жесткости и коэффициента потерь.

В работах В.Н. Бобылева установлено, что повышение звукоизоляции ог-

раждений с уменьшенной жесткостью происходит за счет уплотнения спектра частот собственных колебаний и снижения при этом коэффициента звукоизлучения. Полученные экспериментальные и теоретические значения звукоизоляции имеют хорошую сходимость, что подтверждается в работе Д.В. Монича.

На основе выполненного анализа установлено следующее.

Повышение звукоизоляции вибродемпфированных элементов возможно путем изменения изгибной жесткости и повышения вибропоглощения этих конструкций. Это можно обеспечить с помощью предложенных нами вибродемпфированных элементов (ВДЭ) с измененной изгибной жесткостью (ИИЖ). Путем регулирования изгибной жесткости можно достигнуть различных значений звукоизоляции в пределах конструктивных возможностей за счет деления части элементов на отдельные участки пропиливанием и заполнением их вибродемпфирующим материалом. Теоретические исследования изменения звукоизоляции таких элементов возможны на основе теории М.С. Седова о самосогласовании воздушных звуковых полей и вибрационного поля собственных колебаний ограждения. Для подтверждения достоверности теоретической модели М.С. Седова, использованной к данным конструкциям, а также для исследования границ влияния различных параметров элементов с измененной изгибной жесткостью необходимо проведение экспериментальных исследований на образцах, по своим параметрам соответствующим реальным конструкциям.

Во второй главе на основе теории М.С. Седова о самосогласовании воздушных звуковых полей и вибрационного поля собственных колебаний элемента рассмотрены процессы прохождения и излучения звука в ВДЭ с ИИЖ.

Давление падающих на трехслойный элемент плоских волн диффузного звукового поля может быть представлено в виде бесконечного двойного ряда

$$p = \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{n'=0}^{\infty} p_{0m'n'} \sin \frac{m'\pi x}{a} \sin \frac{n'\pi y}{b}. \quad (1)$$

Под действием звуковых волн, падающих на поверхность элемента, в нем возбуждается свободная изгибная волна ξ_{01} , падающая на границу « $y=0$ » под некоторым углом α

$$\xi_{01} = I_1 e^{i(\omega t + kx \sin \alpha + ky \cos \alpha)}, \quad (2)$$

где $I_1 = Ie^{i\varphi}$ - амплитуда волны; φ - начальный фазовый угол.

Учитывая что, падающая волна ξ_{01} имеет начальную фазу $-\pi$, итоговое смещение пластины запишется как

$$\xi = \xi_0 \sin \frac{m_1\pi x}{a} \sin \frac{n_1\pi y}{b} \cos \omega t, \quad (3)$$

где $\xi_0 = 4I_0$.

При исследовании условий прохождения звука через элемент с учетом его конечных размеров установлено, что степень прохождения звука наибольшая при полных пространственных резонансах (ППР), меньшая при неполных пространственных резонансах (НПР) и еще более низкая в области простых пространственных резонансах (ПрПР).

Полученные в работе значения колебательной скорости и звукового давле-

ния прошедших звуковых волн позволяют определить излучаемую акустическую мощность для различных частотных областей.

$$\text{Так для области ППР} \quad W_2 = \frac{\rho_0 c_0}{2} a \cdot b \bar{V}^2 \bar{S}, \quad (4)$$

где \bar{V}^2 - усредненный квадрат колебательной скорости;

$$\bar{S} = \frac{1}{\Delta f} (f_2 \cos \theta_{2B_2C_2} - f_1 \cos \theta_{1B_1C_1}). \quad (5)$$

Излучаемая мощность для области средних частот НПП, определяется выражением

$$\bar{W}_2^H = \frac{\rho_0 c_0}{2} ab \frac{4}{\pi^2} \frac{f_\varepsilon \cos \theta_\varepsilon}{\Delta f} [\bar{V}_{mn_0}^2 m_\varepsilon \cdot \frac{n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} + \bar{V}_{m_0 n}^2 \cdot n_\varepsilon \frac{m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2}]. \quad (6)$$

Для области низких частот с преимущественным вкладом простых пространственных резонансов излучаемая мощность определяется зависимостью

$$W_2^P = \frac{\rho_0 c_0}{2} \bar{V}_{m_0 n_0} ab \frac{16}{\pi^4} \Delta N \frac{n_{cp}^2}{(n_{cp}^2 - n_{cp}'^2)^2} \frac{m_{cp}^2}{(m_{cp}^2 - m_{cp}'^2)^2} \times \times \frac{1}{\Delta f_{m_0 n_0}} (f_{m_0 n_0 2} \cos \theta_{m_0 n_0 2} - f_{m_0 n_0 1} \cos \theta_{m_0 n_0 1}), \quad (7)$$

$$\text{где } \Delta N = \frac{ab}{4\pi} (K_{n_\varepsilon}^2 - K_{n_n}^2). \quad (8)$$

Полученные выражения колебательной скорости и излучаемой акустической мощности позволяют определить звукоизоляцию вибродемпфированных элементов для различных частотных областей.

Так для области ППР звукоизоляция запишется

$$R = 10 \lg \frac{1,41}{10^4} \frac{\mu^2 f_{nm} \cdot \Delta f \cdot \eta}{\bar{S} (\cos 2\theta_\varepsilon - \cos 2\theta_n)}. \quad (9)$$

$$\text{В области НПП получаем выражение } R = 10 \lg \frac{2,8}{10^4} \frac{\mu^2 f_{mn_0 cp} \Delta f \eta}{N(\Delta f, \theta) \bar{S}}. \quad (10)$$

$$\text{Для области ПрПП} \quad R = 10 \lg \frac{1,14}{10^3} \frac{\mu^2 f \Delta f \eta}{[1 - (f_{cp}/f)^2] \bar{S}}. \quad (11)$$

Установлено, что граничная частота полного пространственного резонанса расположена в высокой области частот, где спектр частот собственных колебаний элемента достаточно плотный. Поэтому частоту, соответствующую граничному ППР, можно считать с достаточной точностью равной граничной частоте волнового совпадения

$$f_{cp} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{Nm'c_0^2 - (F+T)S + \sqrt{[Nm'c_0^2 - (F+T)S]^2 + 4m'c_0^2 S(FN - TLh_3)}}{2(FN - TLh_3)}}. \quad (12)$$

Граничная частота НПП определяется как

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{k_{\Gamma mn_0}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{(FN - TLh_3)k_{\Gamma mn_0}^2 + (F+T)S}{m'(Nk_{\Gamma mn_0}^2 + S)}}, \quad (13)$$

$$f_{\Gamma mn_0} = \frac{k_{\Gamma mn_0}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{(FN - TLh_3)k_{\Gamma mn_0}^2 + (F + T)S}{m'(Nk_{\Gamma mn_0}^2 + S)}}. \quad (14)$$

За величину частоты неполного пространственного резонанса следует принимать наименьшее значение частоты, вычисленное по формулам (13), (14).

Резонансные частоты, на которых выполняются условия максимального прохождения звука, определяются при рассмотрении картины согласования звуковых и вибрационных полей $f'_{m_0n_0} = \frac{c_0}{4a}$.

Следовательно, оценку звукоизолирующей способности ВДЭ с ИИЖ можно выполнять на основе теории М.С. Седова. В существующих формулах для определения звукоизоляции в определенных частотных диапазонах и граничных частот входят различные характеристики, которые показывают, что при изменении характеристик элементов можно получить изменение изгибной жесткости, повышение коэффициента потерь. Перемещение частотного диапазона можно достигнуть путем нанесения пропилов, при этом положение пропилов необходимо исследовать. Для повышения звукоизоляции пропилы необходимо заполнять вибродемпфирующим материалом. Повышение звукоизоляции можно проанализировать, исходя из изменения изгибной жесткости и коэффициента потерь, и это необходимо подтвердить экспериментально.

В третьей главе рассмотрены методика проведения эксперимента и результаты экспериментальных исследований звукоизоляции конструкций из ВДЭ с ИИЖ. Экспериментальные исследования звукоизоляции ВДЭ с ИИЖ проводились в больших реверберационных камерах Вологодского государственного университета (ВоГУ) по стандартной методике. Граничная частота диффузности звукового поля для КВУ $f_{гр.диф.} = 152$ Гц, КНУ $f_{гр.диф.} = 187$ Гц. Камеры обеспечены необходимой для измерения и анализа акустической аппаратурой. В измерительный комплект входят три усилителя МАКРО 1400 и двухканальный модульный прецизионный анализатор 2260 фирмы «Брюль и Кьер» со встроенным генератором шума.

На основании анализа и с учетом экспериментальных данных при исследованиях ВДЭ до и после изменения изгибной жесткости, а также сравниваемых с ними однослойных элементов использовалась заделка гипсовым раствором или монтажный клей для блоков, как в большем приближении моделирующая шарнирное опирание и не вносящая демпфирование по краям.

С целью получения надежных и достоверных результатов при проектировании конструкций из ВДЭ с ИИЖ в работе исследовалось большое количество факторов, влияющих на звукоизолирующую способность данных элементов: шаг и глубина пропилов в наружных слоях элемента; расположение пропилов в одном или обоих наружных слоях при их одинаковой суммарной глубине; месторасположение пропилов: снаружи или со стороны внутреннего вибродемпфирующего слоя; заполнение пропилов вибродемпфирующим материалом.

Исследования звукоизоляции ВДЭ с ИИЖ производились на отдельных элементах, представляющих собой наружные слои из блоков силикатных газобетонных, пенобетонных и бетонных с поверхностной плотностью 75-203 кг/м²; гипсоволокнистых листов (ГВЛ), или фанеры, или древесностружечных плит (ДСП),

или цементно-стружечных плит (ЦСП) с поверхностной плотностью 25-60кг/м². В качестве внутреннего промежуточного слоя используются обычные рулонные гидроизоляционные материалы, наносимые методом наплавления, типа: линокром, техноэласт, а также силикон. С целью изменения изгибной жесткости элемента, без изменения ее массы, в наружных слоях выполняются пропилы.

Установлено, что оптимальный шаг пропилов для ВДЭ следует выбирать в соответствии с толщиной наружных слоев, учитывая габаритные размеры исходных элементов и удобство выполнения пропилов (см.рисунки 1–2 и таблицу 1).

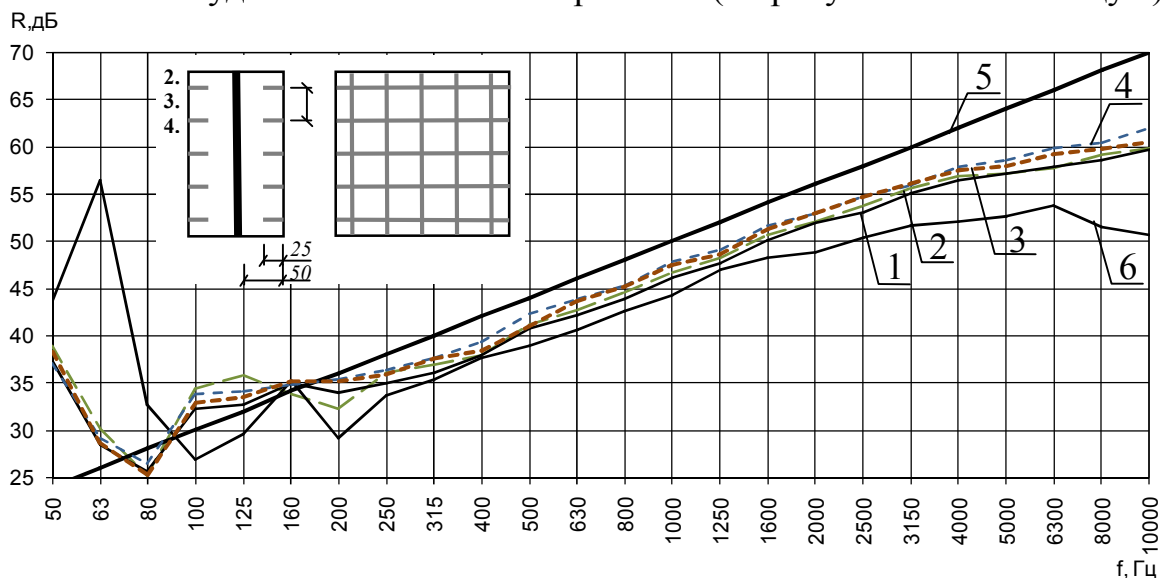


Рисунок 1 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух силикатных газобетонных блоков толщиной по 50,0 мм и прослойки из двух слоев техноэласта толщиной по 3,0 мм, $\mu=75$ кг/м²: 1 – без пропилов, $R_w=48$ дБ; 2 – с пропилами с двух сторон с шагом 100мм, $R_w=49$ дБ; 3 – с пропилами с двух сторон с шагом 50мм, $R_w=51$ дБ; 4 – с пропилами с двух сторон с шагом 25мм, $R_w=51$ дБ; 5 – закон массы; 6 – силикатные газобетонные блоки толщиной 100мм, $R_w=44$ дБ

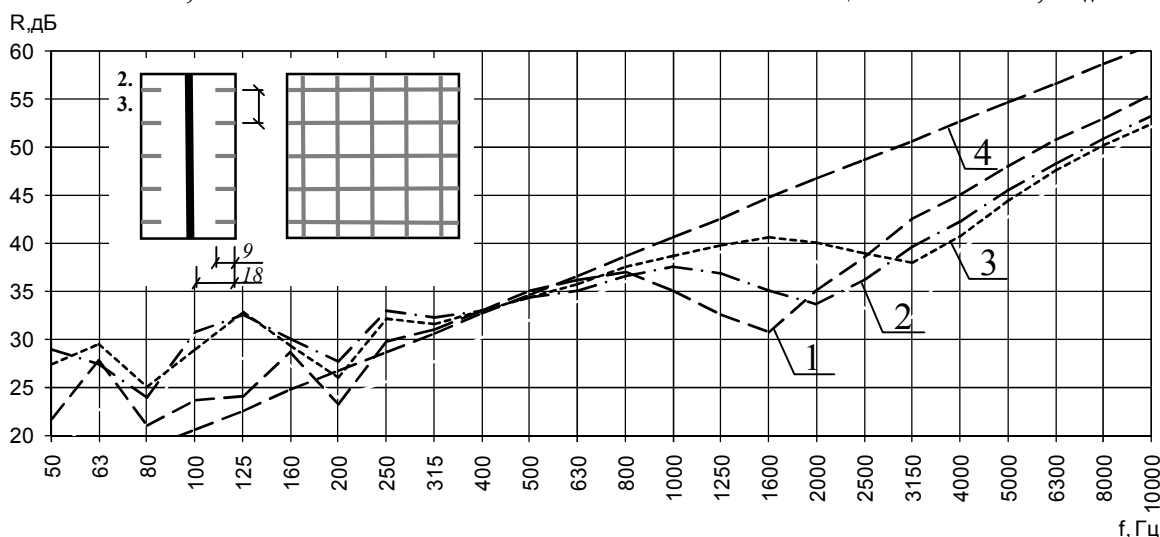


Рисунок 2 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух листов фанеры толщиной по 18,0 мм и прослойки из техноэласта толщиной 3,0 мм, $\mu=24,50$ кг/м²: 1 – без пропилов, $R_w=37$ дБ; 2 – с пропилами с двух сторон с шагом 100мм, $R_w=37$ дБ; 3 – с пропилами с двух сторон с шагом 20мм, $R_w=38$ дБ; 4 – закон массы

Таблица 1 - Сравнительные характеристики звукоизоляции ВДЭ при изменении шага пропилов

Одно- слойный элемент	R_w , дБ	ВДЭ	R_w , дБ	Индекс изоляции воздушного шума R_w , дБ при шаге пропилов			Рост (увеличение) индекса изоляции воздушного шума Δ , дБ
				100мм	50мм	25мм	
Силикатные газобетонные блоки				100мм	50мм	25мм	
100мм	44	50/6/50мм	48	49	51	51	3
150мм	47	75/6/75мм	50	51	53	53	3
Бетонные блоки				100мм	50мм	25мм	
100мм	53	50/6/50мм	55	56	57	57	2
Гипсоволокнистые листы				100мм	50мм	10мм	
-	-	10/3/10мм	41	41	41	42	1
Фанера				100мм	20мм		
-	-	18/3/18мм	37	37	38		1

Для ВДЭ с поверхностной плотностью $75-203 \text{ кг/м}^2$ и наружными слоями толщиной от 50мм рациональный шаг составляет 50мм, при этом увеличение индекса изоляции воздушного шума составляет 3 дБ. Для ВДЭ с ИИЖ с поверхностной плотностью $25-60 \text{ кг/м}^2$ повышение звукоизоляции происходит в области волнового совпадения до 10дБ, а увеличение индекса изоляции воздушного шума составляет 1-2дБ.

Ниже на рисунке 3 и в таблице 2 представлена зависимость частотной характеристики звукоизоляции и индекса изоляции воздушного шума ВДЭ от глубины пропилов, выполненных с двух сторон с шагом 50мм. Видно, что увеличение глубины пропилов приводит к уменьшению изгибной жесткости элемента, и провал граничной частоты волнового совпадения смещается в область более высоких частот (см. рисунок 3). Таким образом, происходит увеличение индекса изоляции воздушного шума на 2-3 дБ.

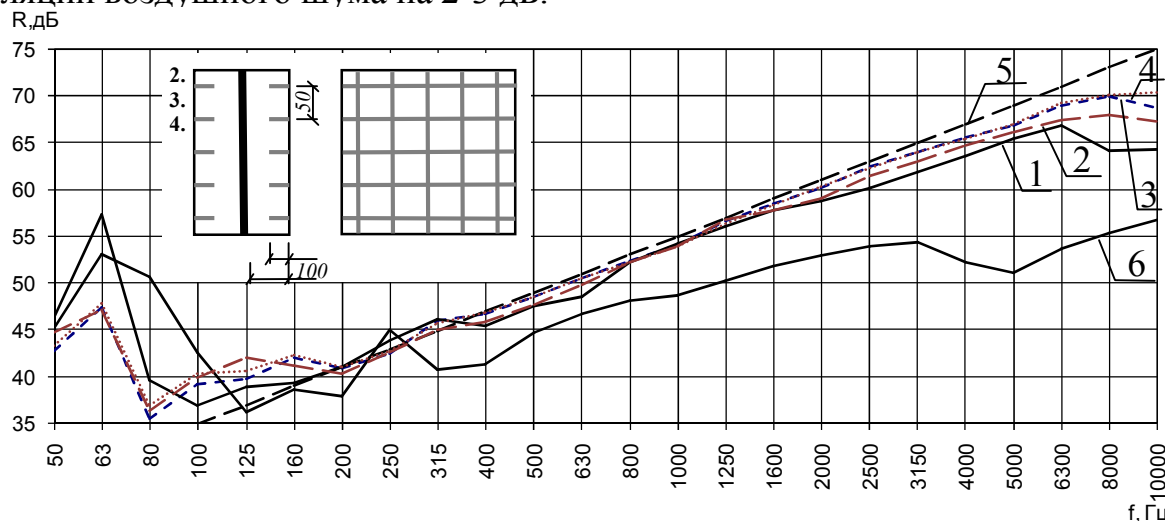


Рисунок 3 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух силикатных газобетонных блоков толщиной по 100,0 мм и прослойки из двух слоев техноэласта толщиной по 3,0 мм, $\mu=133 \text{ кг/м}^2$: 1 – без пропилов, $R_w=53 \text{ дБ}$; 2 – с пропилами с двух сторон на глубину 25мм, $R_w=53 \text{ дБ}$; 3 – с пропилами с двух сторон на глубину 50мм, $R_w=56 \text{ дБ}$; 4 – с пропилами с двух сторон на глубину 75мм, $R_w=56 \text{ дБ}$; 5 – закон массы; 6 – газобетонные блоки толщиной 200мм, $R_w=49 \text{ дБ}$

Таблица 2 - Сравнительные характеристики звукоизоляции ВДЭ при изменении глубины пропилов

Одно- слойный элемент	R_w , дБ	ВДЭ	R_w , дБ	Глубина пропилов			Рост (увеличение) ин- декса изоляции воз- душного шума Δ , дБ
				1/3 толщ.	1/2 толщ.	2/3толщ.	
Силикатные газобетонные блоки							
150мм	47	75/6/75мм	50	51	53	53	3
200мм	49	100/6/100мм	53	54	56	56	3
Бетонные блоки							
100мм	53	50/6/50мм	55	55	57	57	2

Результаты исследования, приведенные в таблице 2, показывают, что увеличение глубины пропилов более чем на половину толщины наружных слоев вибродемпфированного элемента нецелесообразно, так как не приводит к дальнейшему росту звукоизоляции.

Была проведена серия испытаний двух образцов, пропилы в одном из них сделаны в обоих наружных слоях на $\frac{1}{2}$ толщины слоя, а в другом – только в одном наружном слое, но на глубину, равную толщине данного слоя. Таким образом, суммарная глубина пропилов будет одинаковая (см. рисунок 4, таблица 3). Анализ полученных результатов показывает, что смещение частоты волнового совпадения происходит только у образца с пропилами, расположенными в обоих наружных слоях, при этом в области средних частот и граничной частоты волнового совпадения исходного образца наблюдается рост звукоизоляции на $3 \div 15$ дБ, индекс изоляции воздушного шума исследуемых элементов увеличивается на $1 \div 3$ дБ.

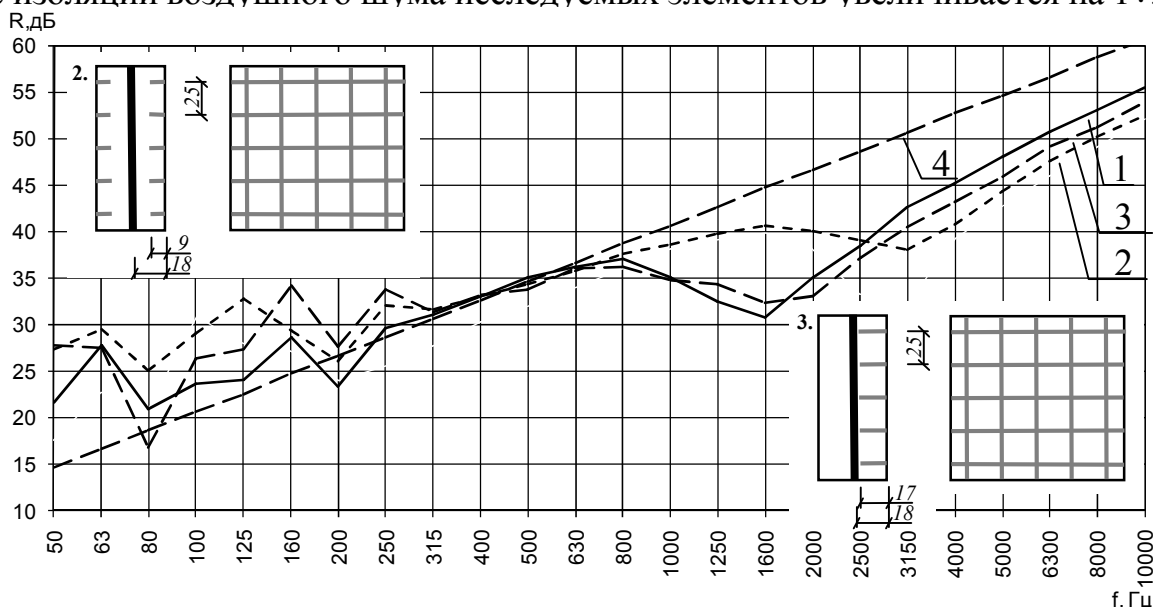


Рисунок 4 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух листов фанеры толщиной по 18,0 мм и прослойки из техноэласта толщиной 3,0 мм, $\mu=24,50$ кг/м²: 1 – без пропилов; $R_w=37$ дБ; 2 – пропилы с обеих сторон элемента выполнены с шагом 20 мм на глубину 9 мм, $R_w=38$ дБ; 3 – пропилы с одной стороны элемента выполнены на глубину 17 мм, $R_w=36$ дБ; 4 – закон массы

Следует отметить, что частотная характеристика звукоизоляции образца с пропилами, выполненными только в одном наружном слое, на высоких частотах имеет провал звукоизоляции, соответствующий резонансу целого наружного слоя, как и в частотной характеристике звукоизоляции исходного ВДЭ. При этом

у образцов с использованием ГВЛ и фанеры в диапазоне средних частот наблюдается снижение частотной характеристики звукоизоляции на 1-2дБ, и индекс изоляции воздушного шума незначительно снижается на 1дБ.

Таблица 3 - Сравнительные характеристики звукоизоляции ВДЭ при одинаковой суммарной глубине пропилов

ВДЭ	R _w , дБ	ВДЭ с пропилами, выполненными		Рост (увеличение) индекса изоляции воздушного шума Δ, дБ
		с обеих сторон на глубину 1/2 толщ. наружного слоя	с одной стороны на всю толщину наружного слоя	
Фанера				
18/3/18мм	37	38	36	1
Цементно-стружечная плита (ЦСП)				
12/1/12мм	41	44	41	3
Гипсоволокнистые листы (ГВЛ)				
10/3/10мм	41	42	40	1

Таким образом, проведенные исследования влияния глубины и шага пропилов в ВДЭ показали, что достижение максимальных значений роста индекса изоляции воздушного шума наблюдается у образцов с пропилами, выполненными на половину толщины обоих наружных слоев, при шаге, соответствующем толщине данного слоя, учитывая удобство нанесения пропилов и габаритные размеры самого элемента.

Анализ экспериментальных данных частотных характеристик звукоизоляции (см. рисунки 1–4 и таблицу 4) показывает, что звукоизоляция ВДЭ с ИИЖ повышается за счет смещения граничной частоты волнового совпадения в область более высоких частот и повышения звукоизоляции в области средних и высоких частот. Наблюдается повышение звукоизоляции ВДЭ с ИИЖ по сравнению с исходным ВДЭ на 2÷6 дБ в нормируемом диапазоне частот, а в области волнового совпадения до 10дБ. Индекс изоляции воздушного шума ВДЭ после ИИЖ увеличивается на 2÷3 дБ.

Таблица 4 - Сравнительные характеристики звукоизоляции ВДЭ до и после ИИЖ и с однослойными элементами равной поверхностной плотности

Одно-слойный элемент	R _w , дБ	ВДЭ	R _w , дБ	ВДЭ с ИИЖ	R _w , дБ	Рост (увеличение) индекса изоляции воздушного шума Δ, дБ ВДЭ с ИИЖ	
						в сравнении с ВДЭ до ИИЖ	в сравнении с однослойным элементом
Силикатные газобетонные блоки							
100мм	44	50/6/50мм	48	50'/6/50'мм	51	3	7
150мм	47	75/6/75мм	50	75'/6/75'мм	53	3	6
200мм	49	100/6/100мм	53	100'/6/100'мм	56	3	7
Полистиролбетонные блоки							
150мм	47	80/6/80мм	50	80'/6/80'мм	52	2	5
Бетонные блоки							
100мм	53	50/6/50мм	55	50'/6/50'мм	57	2	4

Установлено, что месторасположение пропилов не оказывает влияния на звукоизоляцию ВДЭ во всем частотном диапазоне (см. рисунок 5). Таким образом, при проектировании и эксплуатации данных элементов и конструкций из них целесообразно использовать внутренние пропилы, расположенные со стороны вибродемпфирующего слоя.

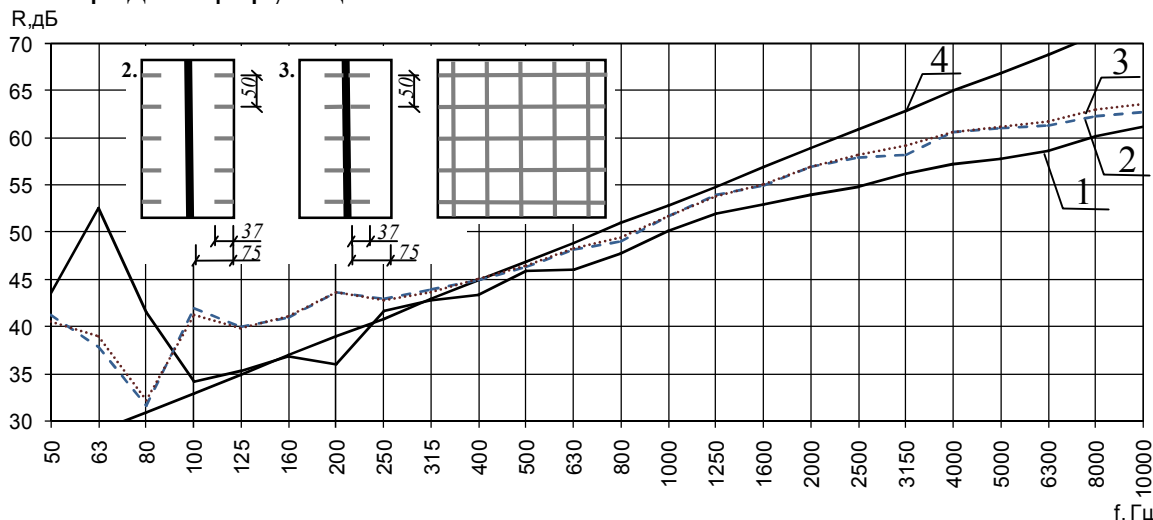


Рисунок 5 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух силикатных газобетонных блоков толщиной по 75,0 мм и прослойки из двух слоев техноэласта толщиной по 3,0 мм, $\mu=105\text{кг/м}^2$: 1 – без пропилов, $R_w=50\text{дБ}$; 2 – наружные пропилы с шагом 50мм, $R_w=53\text{дБ}$; 3 – внутренние пропилы с шагом 50мм, $R_w=53\text{дБ}$; 4 – закон массы

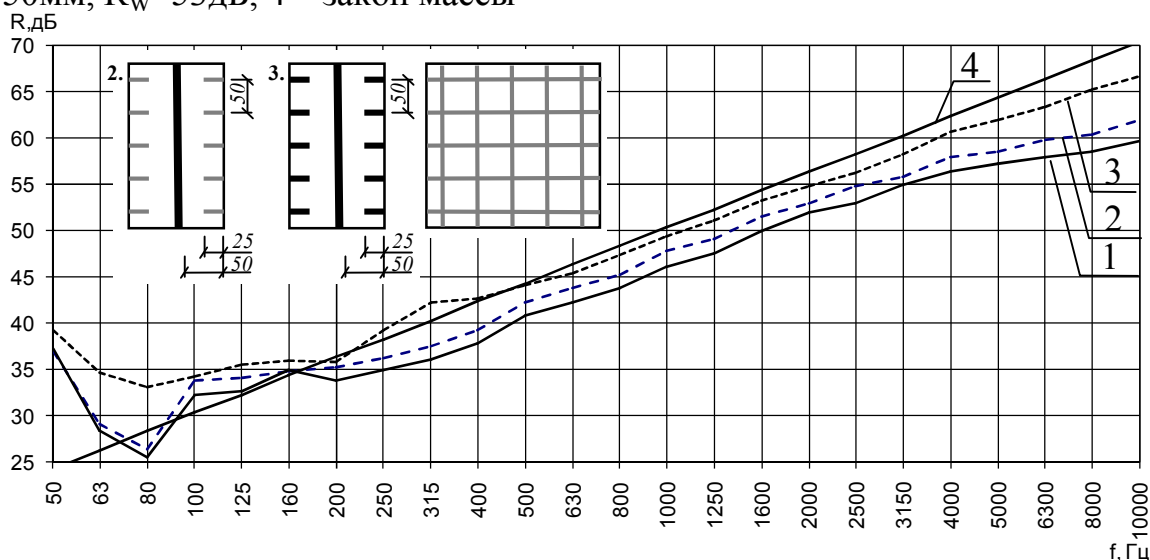


Рисунок 6 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух силикатных газобетонных блоков толщиной по 50,0 мм и прослойки из двух слоев техноэласта толщиной по 3,0 мм, $\mu=75\text{ кг/м}^2$: 1 – без пропилов, $R_w=48\text{дБ}$; 2 – наружные пропилы с двух сторон с шагом 50мм на глубину 25мм, $R_w=51\text{дБ}$; 3 – наружные пропилы с двух сторон с шагом 50мм на глубину 25мм заполнены техноэластом, $R_w=53\text{дБ}$; 4 – закон массы

Оценено влияние заполнения пропилов вибродемпфирующим материалом, используемым в качестве мягкого слоя, либо любым другим на звукоизоляцию ВДЭ с ИИЖ. Установлено, что для ВДЭ с ИИЖ с поверхностной плотностью 75-203 кг/м^2 (см. рисунок 6) повышение звукоизоляции составляет 5÷15дБ во всем

частотном диапазоне, а индекс изоляции воздушного шума увеличивается на 4-5дБ. При этом месторасположение пропилов, заполненных вибродемпфирующим материалом, не влияет на звукоизоляцию в нормируемом диапазоне частот.

Для ВДЭ с ИИЖ с поверхностной плотностью 25кг/м^2 (см. рисунок 7) повышение звукоизоляции в области волнового совпадения и высоких частот составляет до 18дБ, индекс изоляция воздушного шума увеличивается на 4дБ по сравнению с исходным ВДЭ.

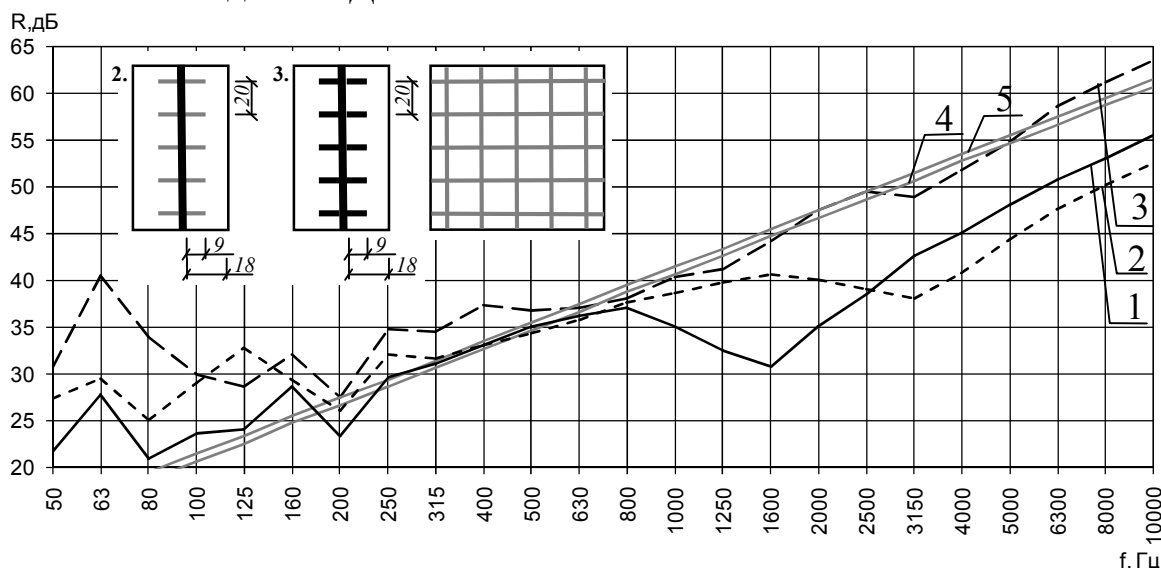


Рисунок 7 - Частотные характеристики звукоизоляции ВДЭ, состоящих из двух листов фанеры толщиной по 18,0 мм и прослойки из силикона толщиной 3,0 мм, $\mu=25,0\text{ кг/м}^2$: 1 – без пропилов, $R_w=37\text{дБ}$; 2 – внутренние пропилы с двух сторон с шагом 20мм на глубину 9мм, $R_w=38\text{дБ}$; 3 – внутренние пропилы с двух сторон с шагом 20мм на глубину 9мм заполнены силиконом, $R_w=41\text{дБ}$; 4 – закон массы для конструкции 2; 5 – закон массы для конструкции 3, $\mu=28,0\text{ кг/м}^2$

Рост звукоизоляции закономерен, так как в этом случае увеличиваются общий коэффициент потерь и поверхностная плотность ограждения. Следует отметить, что повышение звукоизоляции однослойных элементов на такую же величину возможно путем увеличения поверхностной плотности ограждения более чем в 2 раза, что приведет либо к увеличению нагрузок и материалоемкости, либо к применению двустенных конструкций с воздушным промежутком, а значит увеличению общей толщины конструкции и снижению полезной площади помещений.

В четвертой главе представлены практический метод расчета звукоизоляции ограждающих конструкций из ВДЭ с ИИЖ, а также рекомендации по проектированию данных ограждений.

На основании теоретических и экспериментальных исследований ВДЭ с ИИЖ, следует, что предлагаемые конструкции из ВДЭ с ИИЖ обладают лучшими звукоизолирующими характеристиками по сравнению с другими конструкциями, равной поверхностной плотности. Полученные расчетные выражения позволяют запроектировать и рассчитать ВДЭ с ИИЖ с заданными параметрами путем выбора шага, глубины пропилов и материала вибродемпфирующего слоя с требуемым коэффициентом потерь, а также возможности за-

полнения пропилов данным материалом.

Применение на практике в строительстве предлагаемых конструкций из ВДЭ с ИИЖ доказывает их акустическую эффективность.

В главе представлены инженерный метод расчета звукоизоляции ВДЭ с ИИЖ, даны рекомендации по проектированию и применению данных конструкций из ВДЭ с ИИЖ в гражданском строительстве с обоснованием экономической эффективности применения предлагаемых конструкций по сравнению с традиционными решениями внутренних ограждающих конструкций. Согласно расчетам экономия за счет устройства более эффективной звукоизолирующей конструкции составляет 28 823 руб. на 100 м² ограждения, а также при использовании предлагаемых межквартирных перегородок из ВДЭ с ИИЖ наблюдается увеличение полезной площади помещений на 2 м², а, следовательно, дополнительная прибыль составляет 85 616 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований получены следующие выводы и рекомендации:

1. Дальнейшее повышение звукоизоляции ВДЭ возможно путем изменения изгибной жесткости и вибропоглощения в элементах. Это обеспечивается путем регулирования изгибной жесткости за счет деления части элементов на отдельные участки пропиливанием и заполнением их вибродемпфирующим материалом.

2. Теоретически на базе теории М.С. Седова и практически на основе выполненных экспериментальных исследований установлено, что звукоизоляцию можно повысить за счет смещения граничной частоты волнового совпадения в область высоких частот, что может быть обеспечено путем изменения изгибной жесткости и повышения коэффициента потерь.

3. Установлено, что изменение изгибной жесткости путем устройства пропилов повышает звукоизоляцию при неизменной поверхностной плотности ВДЭ за счет перемещения граничной частоты волнового совпадения в область более высоких частот. Величина повышения может достигать 2-3 дБ.

4. Установлено, что заполнение пропилов вибродемпфирующим материалом дополнительно дает возможность повысить звукоизоляцию на 2-3 дБ. Эта конкретная величина повышения звукоизоляции зависит от коэффициента потерь вибродемпфирующего материала.

5. Экспериментально доказано, что изменение изгибной жесткости и заполнение пропилов вибродемпфирующим материалом приводит к росту звукоизоляции ВДЭ и составляет для различных материалов от 1 до 5 дБ. Для наиболее распространенных материалов с поверхностной плотностью 75 кг/м² и выше (газосиликатные, полистиролбетонные и бетонные блоки) эта величина составляет 4-5 дБ, что равносильно увеличению поверхностной плотности однослойных ограждений на 80-100%.

6. Установлен диапазон рационального шага и глубины пропилов в зависимости от характеристик ВДЭ, предложены приближенные методы оценки шага пропилов для ВДЭ.

7. Предложен метод расчета и методика проектирования звукоизоляции ВДЭ с ИИЖ.

8. Эффективность применения конструкций из ВДЭ с ИИЖ подтверждается актами о внедрении. Экономическая эффективность предложенных конструктивных решений внутренних ограждений по сравнению с традиционными решениями для Вологодской области составляет 28 823 рубля на каждые 100м² ограждения.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации (* работы в изданиях из перечня ВАК):

1. Кочкин, А.А. К оценке погрешности измерений звукоизоляции ограждений/А.А. Кочкин, Н.М. Дементьев, **Л.Э. Быкова**//Вузовская наука – региону: вторая Всероссийская науч.-практ. конф. – Вологда, 2004. – С. 435–436.

2. Кочкин, А.А. Создание акустического комфорта в жилом здании конструктивным способом/А.А. Кочкин, **Л.Э. Быкова**//Экология, акустика и защита от шума: материалы науч.-техн. семинара. – Севастополь, 2005. – С. 32–34.

3. Кочкин, А.А. К вопросу о звукоизоляции слоистых вибродемпфированных ограждений с использованием гипсоволокнистых листов/А.А. Кочкин, **Л.Э. Быкова**//Вузовская наука – региону: материалы третьей всероссийская науч.-техн. конф./ВоГТУ: в 3 т. – Вологда, 2005. – Т.1. – С. 34–36.

4. 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. конф.– Пенза, 2005.– С. 215–218.

5. Кочкин, А.А. О регулировании звукоизоляции ограждающих конструкций/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Вузовская наука - региону: материалы четвертой всероссийская науч.-техн. конф./ВоГТУ: в 2 т. – Вологда, 2006.– Т.1. – С. 330–331.

6. Кочкин А.А. Снижение шума газовой котельной ВоГТУ с использованием слоистых вибродемпфированных ограждений. /А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Актуальные проблемы акустической экологии и защиты от шума: материалы науч.-техн. семинара/НИИСФ РААСН. – Севастополь, 2006. – С.48–50.

7. Кочкин, А.А. Защита жилья от шума технологического оборудования методами звукоизоляции/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Гармонизация европейских и российских нормативных документов по защите населения от повышенного шума: материалы международной науч.-практ. конф.– Москва – София – Кавала, 2009. – С. 147–149.

8. Кочкин, А.А. О повышении звукоизоляции существующей перегородки в жилом доме/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Вузовская наука – региону: материалы восьмой всерос. науч.-техн. конф./ВоГТУ: в 2 т.– Вологда, 2010. – Т.1.– С.335–336.

9. Кочкин, А.А. К вопросу о проблеме снижения уровней шума в жилых комнатах квартир/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Актуальные проблемы развития жилищно-коммунального хозяйства городов и населенных пунктов: материалы IX международной науч.-практ. конф.– Москва – София – Кавала, 2010. – С. 221–223.

10. * Кочкин, А.А. О повышении звукоизоляции ограждающих конструк-

ций/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Academia. Архитектура и строительство.– 2010. – №3.– С. 198–199.

11. 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.

12. * Кочкин, А.А. Исследование коэффициента потерь материалов и конструкций легких ограждений/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Вестник МГСУ: научно-технический журнал. Периодическое издание – 2011.– Т.1, № 3.– С. 366–370.

13. Пат. 107802 Российская Федерация: Звукоизолирующая вибродемпфированная слоистая панель с измененной изгибной жесткостью/А.А. Кочкин, **Л.Э.Шашкова**: патентообладатель Вологодский гос.технический университет. –№ 2010150067; заявл. 06.12.2010; опубл. 27.08.2011. – Б. и. № 24. – 2 с.

14. Пат. 114472 Российская Федерация: Двойная звукоизолирующая конструкция с обшивками из слоистых вибродемпфированных панелей с измененной изгибной жесткостью/А.А.Кочкин, **Л.Э. Шашкова**; патентообладатель Вологодский гос.технический университет. – № 2011117882/03; заяв. 04.05.2011, опубл. 27.03.2012. – Б. и. № 9. – 2 с.

15. Кочкин, А.А. Влияние измененной изгибной жесткости вибродемпфированного слоистого ограждения на его звукоизоляцию/А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова** //Проблемы и пути развития энергосбережения и защиты от шума в строительстве и ЖКХ: XV международная науч.-практ. конф./НИИСФ РААСН. – Москва – Будва, 2011.– С. 189–191.

16. * Кочкин, А.А. Создание экологичной звуковой среды в зданиях с использованием звукоизолирующих слоистых ограждений с вибропоглощением/ А.А. Кочкин, **Л.Э. Шашкова**//Известия Самарского научного центра РАН. – 2011.–Т. 13, № 1 (8).– С. 2098–2101.

17. * 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.

18. **Шашкова, Л.Э.** Исследование звукоизоляции слоистых вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью/Л.Э. Шашкова//Экологическая безопасность и энергосбережение в строительстве: материалы междунар. науч.-практ. конф./НИИСФ РААСН.– Москва – Кавала, 2013.– С. 123–125.

19. **Шашкова, Л.Э.** О способе повышения звукоизоляции ограждений средней плотности/Л. Э. Шашкова//Материалы VII ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: в 2-х т.– Вологда: ВоГУ, 2014.– Т.1: Технические науки.– С. 182-184.

20. **Шашкова, Л.Э.** Проектирование звукоизоляции конструкций из вибродемпфированных элементов с измененной изгибной жесткостью/Л. Э. Шашкова, А.А. Кочкин//Вузовская наука – региону: материалы XII всерос. науч.-техн. конф.– Вологда: ВоГУ, 2014.– С. 170-172.

Подписано в печать 20.10.2014 г. Формат $60 \times 84^{1/16}$. Бумага офисная, Печать офсетная
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 343

Отпечатано: РИО ВоГУ
160035, г. Вологда, ул. С.Орлова, 6