На правах рукописи

ГРЕБНЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ИЗ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: **Монич Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Овсянников Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Матвеева Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»**

Защита состоится «23» ноября 2016 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 НИИ строительной физики РААСН и на сайте http://niisf.ru/

Автореферат разослан « » _____2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 ÷ 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 меду 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 че-

рез 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: 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, определяемые как разница между предельной и собственной звукоизоляцией ограждения конечных размеров;
- 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 диссертационной работы:

- разработанный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров 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;

- 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.

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 ВоГУ с использованием электроакустической аппаратуры.

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 разобщения слоев на звукоизоляцию сэндвич-панелей; метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров с акустическим разобщением 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 М. С. Седова. 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 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.).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения: п.6 «Поиск рациональных форм, размеров зданий помещений и их ограждений, исходя из условий их размещения в городской застройке, деятельности людей и движения людских потоков, технологических процессов, протекающих в здании, санитарно гигиенических условий, экологической безопасности»; п.7 «Развитие теоретических основ строительно-акустических методов и средств, поиск рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, направленных на повышение эффективности капиталовложений, энерго- и ресурсосбережение, создание комфортных условий для людей и оптимальных для технологических процессов».

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. Применение разработанных конструкций позволило обеспечить снижение уровней шума в помещении цеха до нормативных значений. Разработанное звукоизо-

лирующее ограждение также было использовано в качестве межкомнатной перегородки при строительстве жилого дома в микрорайоне «Цветы» в г. Нижнем Новгороде. Применение разработанной конструкции позволило обеспечить выполнение нормативных требований по звукоизоляции. Полученные результаты работы используются в учебном процессе ННГАСУ. Новизна и практическая значимость результатов работы подтверждена патентом и заявкой на получение патента.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены возможности применения сэндвич-панелей для создания внутренних ограждающих конструкций, обладающих относительно небольшой массой. Рассмотрены преимущества применения конструкций из сэндвич-панелей перед другими типами ограждений при применении их в строительстве.

Выполнен анализ существующих методов расчета звукоизоляции однослойных и многослойных ограждений различных типов с позиций возможности их применения для расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким средним слоем, определены основные направления исследований.

Исследованием прохождения звука через многослойные ограждения занимались Л. Беранек, И. И. Боголепов, Л.А. Борисов, Е. Винтергерст, А. Дишкманс, Н.И. Иванов, А. Камминс, А. А. Кочкин, Г. Куртце, А. Лондон, Дж. Мур, А. Нильсон, М. А. Пороженко, М. С. Седов, В. Н. Сухов, Е. Сьюэлл, Р. Форд, Дж. Чжоу, Б. Шарп, В. И. Юлин, А. П. Юферев.

Е. Винтергерст впервые установил, что трехслойные сэндвич-панели имеют провал звукоизоляции, расположенный вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса». Данный недостаток звукоизоляции сэндвич-панелей указывается многими авторами как основная причина препятствующая их широкому распространению. В своих работах М. С. Седов, В. И. Юлин делают вывод о необходимости вывода данной резонансной частоты за пределы нормируемого диапазона за счет подбора

геометрических и физико-механических характеристик материалов, из которых изготовлено ограждение.

На основе проведенного анализа установлено следующее.

Сэндвич-панели с жестким склеиванием слоев имеют область пониженной звукоизоляции в диапазоне средних и высоких частот. Частотная характеристика звукоизоляции зависит от физико-механических характеристик материалов облицовок и среднего слоя, а также от способа соединения слоев между собой и размеров ограждения. Разработка сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением требует комплексного учета всех перечисленных факторов.

Для повышения звукоизоляции сэндвич-панелей без значительного увеличения массы необходимо использовать их внутренние резервы. 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).

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

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

Во второй главе на основе теории М. С. Седова о самосогласовании воздушных звуковых полей и волнового поля собственных колебаний ограждения рассмотрен процесс прохождения звука через сэндвич-панели.

С учетом двойственной природы прохождения звука (резонансное и инерционное прохождение) коэффициент прохождения звука через сэндвич-панель определяется выражением

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

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.

Прохождение звука для конструкций реальных размеров рассматривается в областях неполных пространственных резонансов (НПР, $f_{\Gamma mn_0} < f < f_{\Gamma mn}$) и полных пространственных резонансов (ППР, $f > f_{\Gamma mn}$)

Граничная частота $f_{\Gamma mn}$, разделяющая области НПР и ППР, определяется как

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

где μ_1 – поверхностная плотность облицовки, кг/м^2; $\Delta f_{\Gamma mn}$ – положительная по знаку поправка до ближайшей большей частоты собственных колебаний обшивки, Гц; c_0 – скорость звука в воздухе, м/с; D – цилиндрическая жесткость облицовки, Па·м^2.

Резонансная частота системы «масса – упругость – масса» для сэндвич-панели определяется как

$$f_{\text{р}} = 0{,}16\sqrt{\frac{E_{\text{Д}}(\mu_1 + \mu_2)}{d\mu_1\mu_2}}\,, \qquad (3)$$

где $E_{\text{Д}}$ – динамический модуль упругости среднего слоя, Па; d – толщина среднего слоя, м; μ_1, μ_2 – поверхностные плотности первой и второй облицовок соответственно, кг/м^2.

При резонансном прохождении звука через сэндвич-панель коэффициент прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой определяется как

$$\tau_{\text{ПС}} = \frac{1}{\dfrac{6{,}8}{c_{\text{И}}^2}\dfrac{\mu^2 f^2}{A^2}\left(\dfrac{f^2}{f_{\text{р}}^2} - 1\right)^2 + 1}\,, \qquad (4)$$

где $f_{\text{р}}$ – резонансная частота системы «масса – упругость – масса» сэндвич-панели, Гц; $c_{\text{И}}$ – скорость распространения бегущей волны, м/с; μ – поверхностная плотность сэндвич-панели, кг/м^2; A – характеристика самосогласования волновых полей; f – текущая частота звука, Гц.

При инерционном прохождении звука через сэндвич-панель коэффициент прохождения звука через наружные облицовки с упругой связью между собой определяем по формуле

$$\tau_{\text{ПИ}} = \frac{1}{\dfrac{6{,}8\mu^2 f^2}{c_{\text{И}} F_{1\text{И}}^2}\left(\dfrac{f^2}{f_{\text{р}}^2} - 1\right)^2 + 1}\,, \qquad (5)$$

где $F_{1\text{И}}$ – функция отклика первой облицовки, на которую падет звук; $c_{\text{И}}$, f, $f_{\text{р}}$, μ – то же, что в формуле (4).

При резонансном прохождении звука в частотной области НПР ($f_{Гmn_0} < f < f_{Гmn}$) коэффициент прохождения звука для первой облицовки определяется как

$$\tau_{1С} = \frac{1}{\frac{10^{-5}}{A_{01}^4}\mu_1^2 f^2 \eta_1 + 1}, \qquad (6)$$

для второй облицовки $$\tau_{2С} = \frac{1}{\frac{3{,}1}{c_И^2 A_{02}^4}\mu_2^2 f^2 \eta_2 \cos^2\theta_2 + 1}, \qquad (7)$$

где η_1 и η_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; $f_{Гmn}$ – граничная частота области ППР, Гц; μ_1, μ_2 – то же, что в формуле (3); $c_И$, f – то же, что в формуле (4); θ_2 – угол падения звуковых волн на вторую облицовку, который в данной работе, для учета размеров ограждений, применяемых в строительстве, предложено вычислять по формуле

$$\cos\theta_2 = \frac{d}{\sqrt{b^2 + d^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}, \qquad (8)$$

где a – длина сэндвич-панели, м; b – ширина сэндвич-панели, м; d – то же, что в формуле (3).

При резонансном прохождении звука в области частот выше граничной частоты ППР ($f > f_{Гmn}$) для первой облицовки коэффициент прохождения определится как

$$\tau_{1С} = \frac{1}{9{,}1\cdot 10^{-5}\cdot \mu_1^2 \frac{f^3}{f_{Гmn}} \eta_1 \sqrt{1 - \frac{f_{Гmn}}{f}} + 1}, \qquad (9)$$

для второй облицовки $$\tau_{2С} = \frac{1}{\frac{10{,}7}{c_И^2}\mu_2^2 \frac{f^3}{f_{Гmn}} \eta_2 \cos\theta_2 \sqrt{1 - \frac{f_{Гmn}}{f}} + 1}, \qquad (10)$$

где η_1, η_2, θ_2, $f_{Гmn}$ – то же, что в формулах (6), (7); $c_И$, f – то же, что в формуле (4); μ_1, μ_2 – то же, что в формуле (3).

Выражение для определения коэффициента инерционного прохождения звука через первую облицовку сэндвич-панели определится как

$$\tau_{1И} = \frac{1}{\frac{2\cdot 10^{-5}\mu_1^2 f^2}{F_{1И}^2}+1}, \qquad (11)$$

через вторую облицовку $$\tau_{2И} = \frac{1}{\frac{6{,}8\mu_2^2 f^2 \cos^2\theta_2}{c_И F_{2И}^2}+1}, \qquad (12)$$

где μ_1, μ_2 – то же, что в формуле (3); $c_И$, f – то же, что в формуле (4); θ_2 – то же, что в формулах (6), (7); $F_{1И}$ – то же, что в формуле (5); $F_{2И}$ – функция отклика второй облицовки.

Используя значения коэффициентов прохождения звука, полученные для областей НПР и ППР, вычисляются значения звукоизоляции сэндвич-панели в нормируемом диапазоне частот.

Согласно теории самосогласования волновых полей ограждение имеет максимально возможную (предельную) звукоизоляцию, когда основной вклад в излучение звука ограждением вносят инерционные волны. В работе впервые получены аналитические зависимости для определения предельной звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким соединением слоев. Предельная звукоизоляция сэндвич-панели определяется из выражения

$$R_{пред} = 10\log\left(\left[\frac{2\cdot 10^{-5}\mu_1^2 f^2}{F_{1И}^2}+1\right]\left[\frac{6\cdot 10^{-5}\mu_2^2 f^2 \cos^2\theta_2}{F_{2И}^2}+1\right]\right), \qquad (13)$$

где μ_1, μ_2 – то же, что в формуле (3); f – то же, что в формуле (4); θ_2 – то же, что в формулах (6), (7); $F_{1И}$ – то же, что в формуле (5); $F_{2И}$ – то же, что в формуле (12).

В третьей главе на основании теоретического расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким средним слоем и полученных аналитических зависимостей для определения их предельной звукоизоляции определены резервы повышения звукоизоляции ограждающих конструкций данного типа. Резервы повышения звукоизоляции сэндвич-панелей характеризуются величиной

$$\Delta r = R_{ПРЕД} - R, \qquad (14)$$

где Δr – величина резонансных отклонений (снижение звукоизоляции ограждения относительно своих предельных значений за счет резонансного прохождения звука), дБ; $R_{ПРЕД}$ – предельная звукоизоляция ограждения, определяемая для сэндвич-панелей по формуле (13); R – собственная звукоизоляция ограждения, дБ.

Анализируя рисунок 1, можно видеть, что для сэндвич-панелей существуют две области, где наблюдаются наибольшие резонансные откло-

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

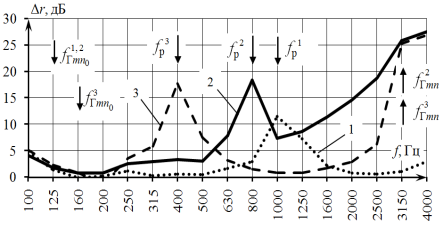


Рисунок 1 – Частотные характеристики резонансных отклонений: 1 – сэндвич-панель толщиной 62 мм (μ = 15 кг/м^2); 2 – сэндвич-панель толщиной 75 мм (μ = 28 кг/м^2); 3 – сэндвич-панель толщиной 125 мм (μ = 35 кг/м^2)

По результатам выполненных теоретических исследований можно определить основную задачу при проектировании рациональных конструктивных решений звукоизолирующих ограждающих конструкций зданий: *необходимо эффективно использовать резервы повышения звукоизоляции ограждения, определяемые инерционным прохождением звука* ($\tau_И >> \tau_С$).

По результатам теоретических исследований звукоизоляции сэндвич-панелей установлено следующее.

Для эффективного использования резервов повышения звукоизоляции, расположенных вблизи граничной частоты ППР облицовок сэндвич-панелей ($f_{Гmn}$), необходимо использовать листовые материалы с отношением поверхностной плотности и цилиндрической жесткости (μ/D) находящимся в диапазоне от $2{,}3\times10^{-2}$ с^2/м^4 до $3{,}6\times10^{-2}$ с^2/м^4.

Значительное увеличение прохождения звука через сэндвич-панель вблизи резонансной частоты системы «масса – упругость – масса» ($f_р$) является основным фактором, негативно влияющим на звукоизоляцию. Этот эффект обусловлен тем, что для рассматриваемых сэндвич-панелей, с толщиной среднего слоя 50 ÷ 100 мм, которые могут найти применение в строительстве, резонансная частота системы находится в области средних и высоких частот (630 ÷ 1250 Гц). Для повышения звукоизоляции сэндвич-панели необходимо вывести область повышенного прохождения звука, расположенную вблизи резонансной частоты $f_р$, за пределы нормируемого диапазона частот (100 ÷ 3150 Гц), или максимально возможно сместить ее в диапазон низких частот. Это можно реализовать двумя способами:

- применением материала среднего слоя с низким динамическим модулем упругости ($E_Д$);

- акустическим разобщением облицовок и среднего слоя.

На базе теоретических исследований, представленных выше, разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с жестким склеиванием слоев, позволяющий рассчитать звукоизоляцию реальных сэндвич-панелей конечных размеров.

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

$$f_{\text{р}} = 0{,}16\sqrt{\frac{E_0(\mu_1+\mu_2)}{d\mu_1\mu_2}}\,, \qquad (15)$$

где μ_1 и μ_2 – поверхностные плотности первой и второй облицовок соответственно, 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

$$E_0 = kE_{\text{Д}}\,, \qquad (16)$$

где $E_{\text{Д}}$ – динамический модуль упругости материала среднего слоя сэндвич-панели, Па; k – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий толщину разобщающих слоев между облицовками и средним слоем сэндвич-панели ($k \le 1$, см. рисунок 2).

График на рисунке 2 построен по результатам комплекса экспериментальных исследований звукоизоляции сэндвич-панелей с различной степенью акустического разобщения слоев.

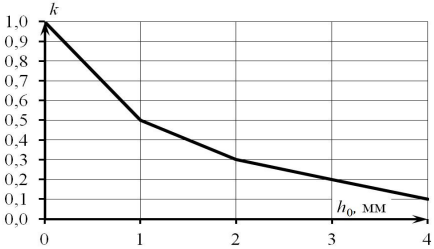


Рисунок 2 – Значения коэффициента k при различной толщине разобщающих слоев

С помощью разработанного метода 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.

Проведенные исследования позволяют проектировать звукоизолирующие ограждения на основе сэндвич-панелей с заранее заданными значениями звукоизоляции в нормируемом диапазоне частот, эффективно ис-

пользуя резервы повышения звукоизоляции, определяемые инерционным прохождением звука.

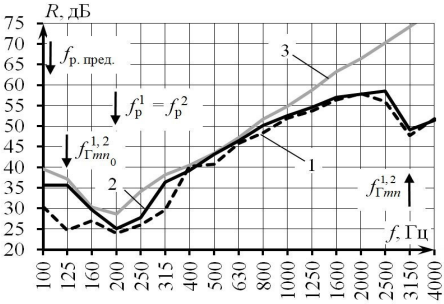


Рисунок 3 – Частотные характеристики звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением: 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретические данные; 3 – предельная звукоизоляция

На рисунке 3 представлено сравнение частотных характеристик звукоизоляции сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (размер образца 2,0 м × 1,2 м, облицовки из ГВЛ (ρ = 1150 кг/м^3, μ = 14,3 кг/м^2, D = 528 Па·м^2, $E_Д$ = 2,95·10^6 Па) толщиной по 12,5 мм, средний слой из пенопласта толщиной 50 мм, (ρ = 20 кг/м^3, μ = 1,0 кг/м^2, D = 92 Па·м^2, $E_Д$ = 8,5·10^6 Па), акустическое разобщение в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по 4 мм), полученных теоретически и экспериментально.

Анализируя рисунок 3, можно заключить, что значения звукоизоляции сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением, полученные по разработанному методу, имеют неплохую сходимость с экспериментально полученными данными во всех рассматриваемых частотных диапазонах.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований и результаты экспериментальных исследований звукоизоляции сэндвич-панелей в лабораторных и натурных условиях.

Исследования проведены в больших реверберационных камерах лабораторий акустики ННГАСУ и ВоГУ по стандартной методике, с использованием прецизионной электроакустической аппаратуры «*Soundbook*» (Германия) и «*Larson & Davis*» (США).

В лабораторных условиях проведены исследования влияния физико-механических параметров облицовок, геометрических размеров ограждения, толщины среднего слоя, динамического модуля упругости среднего слоя, толщины и материала слоев акустического разобщения на звукоизоляцию сэндвич-панелей. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами теоретических исследований, проведенных на основе теории самосогласования волновых полей М. С. Седова.

На основании проведенного комплекса теоретических расчетов и экспериментальных исследований разработано рациональное конструктивное решение сэндвич-панели, представленное на рисунке 4.

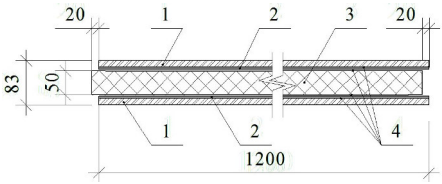


Рисунок 4 – Схема сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением (поперечное сечение)

Облицовки (1) сэндвич-панели с рациональным конструктивным решением приняты из ГВЛ, толщиной по 12,5 мм каждый ($\mu/D = 2{,}8\times10^{-2}$ с^2/м^4); средний слой (3) из пенопласта толщиной 50 мм; акустическое разобщение (2) выполнено в виде слоев полиэфирного волокна толщиной по 4 мм, слои склеены между собой (4).

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 перегородки размером 1,2 × 2,0 м была измерена в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ННГАСУ. Полученная частотная характеристика приведена на рисунке 5.

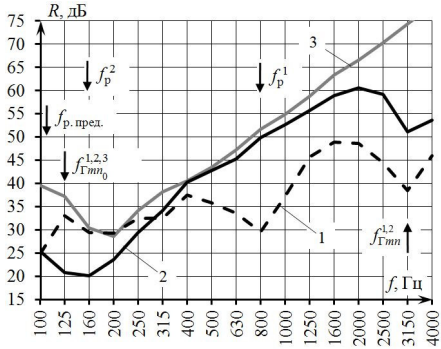


Рисунок 5 – Сравнение частотных характеристик звукоизоляции ограждений: 1 – сэндвич-панель без акустического разобщения слоев; 2 – перегородка из сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев; 3 – предельная звукоизоляция

Анализируя рисунок 5, можно заключить, что ограждение из сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением обладает звукоизоляцией, близкой к предельным значениям в широком диапазоне частот (от 200 Гц до 4000 Гц). Данный эффект повышения звукоизоляции достигается за счет того, что резонансная частота системы «масса – упругость – масса» панели (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 (μ^1 = 33,0 кг/м^2, μ^2 = 34,3 кг/м^2).

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 зда-

ний (в качестве внутренних перегородок, выгородок, стен звукоизолирующих кабин и др.). Схема разработанного ограждения приведена на рисунке 6.

Разработанное ограждение отличает удобный и быстрый монтаж по принципу «пол – потолок», выполнение требований по пожарной безопасности за счет применения огнезащитной шпатлевки для заделки стыков (по результатам пожарно-технических испытаний, ограждение соответствует классу пожарной опасности К0 (30)).

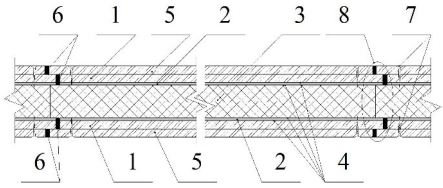


Рисунок 6 – Поперечное сечение звукоизолирующего ограждения из сэндвич-панелей с рациональным конструктивным решением: 1 – облицовки; 2 – акустическое разобщение; 3 – средний слой; 4 – клеевые слои; 5 – дополнительные внешние облицовки; 6 – огнезащитная шпатлевка; 7 – саморезы; 8 – вертикальный лабиринтный стык

Звукоизоляция разработанного ограждения из сэндвич-панелей размером 3,6 м × 2,5 м с рациональным конструктивным решением и дополнительными внешними листовыми облицовками была измерена в больших реверберационных камерах лаборатории акустики ВоГУ. Полученные частотные характеристики приведены на рисунке 7.

При обшивке звукоизолирующего ограждения дополнительной облицовкой с одной стороны (кривая 2) звукоизоляция в диапазоне 160 ÷ 4000 Гц увеличивается на 2 ÷ 6 дБ, а индекс изоляции воздушного шума возрастает на 3 дБ до величины R_w = 52 дБ. При обшивке ограждения дополнительными внешними облицовками с двух сторон (кривая 3) звукоизоляция ограждения увеличивается во всем нормируемом диапазоне частот, а индекс изоляции воздушного шума возрастает на 5 дБ до величины R_w = 54 дБ.

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.

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 получен индекс изоляции воздушного шума R'_w = 43 дБ, для ограждения с одной дополнительной облицовкой R'_w = 47 дБ, для ограждения с двумя дополнительными облицовками

R'_w = 50 дБ. Частотные характеристики звукоизоляции исследованных ограждений приведены на рисунке 8.

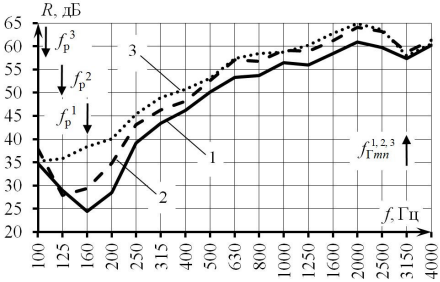


Рисунок 7 – Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной перегородки из сэндвич-панелей в лабораторных условиях: 1 – ограждение без дополнительных облицовок; 2 – ограждение с одной дополнительной облицовкой; 3 – ограждение с двумя дополнительными облицовками

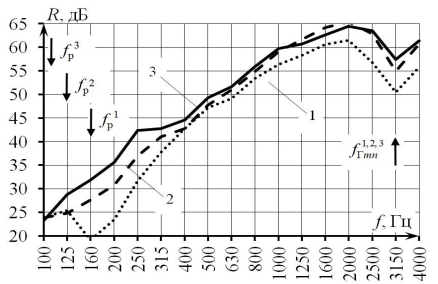


Рисунок 8 – Частотные характеристики звукоизоляции бескаркасной перегородки из сэндвич-панелей в натурных условиях: 1 – ограждение без дополнительных облицовок; 2 – ограждение с одной дополнительной облицовкой; 3 – ограждение с двумя дополнительными облицовками

По результатам натурных исследований доказана высокая эффективность разработанных звукоизолирующих ограждений и перспективность их внедрения на объектах гражданского и промышленного строительства. Оформлен 1 патент и 1 заявка на получение патента.

В приложениях работы приведены фотографии реверберационных камер лабораторий акустики ННГАСУ и ВоГУ, схемы установки образцов в измерительных проемах, акты внедрения результатов исследований и протокол пожарно-технического испытания ограждения, копия патента.

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. 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.

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.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

- предложенный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей конечных размеров следует использовать в практике проектирования конструктивных решений многослойных ограждений, предназначенных для применения в гражданском и промышленном строительстве;

- разработанные конструктивные решения бескаркасных звукоизолирующих ограждений из сэндвич-панелей следует использовать в зданиях со свободными системами планировок, в малоэтажном строительстве, а также в качестве выгородок, стенок звукоизолирующих кабин наблюдения в промышленных зданиях.

Перспективы разработки темы исследований. На базе разработанных конструктивных решений ограждений может быть разработана номенклатура звукоизолирующих ограждающих конструкций с различными вариантами материалов облицовок и среднего слоя.

Список публикаций по теме диссертации
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК
при Минобрнауки России

1. 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.

2. **Гребнев, П. А.** Исследования звукоизолирующих свойств многослойных ограждений с жестким заполнителем / **П. А. Гребнев**, Д. В. Монич // Жилищное строительство. – 2012. – №6 – С. 50-51.

3. **Гребнев, П. А.** Исследование звукоизолирующих свойств бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / **П. А. Гребнев**, Д. В. Монич // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 53-58.

4. **Гребнев, П. А.** Теоретические и экспериментальные исследования звуко-изоляции бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / **П. А. Гребнев** // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 2 (49). – С. 109-118.

5. 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.

Публикации в других изданиях

6. **Гребнев, П. А.** Исследование звукоизолирующих свойств сэндвич-панелей с жестким заполнителем / **П. А. Гребнев** // 15 нижегородская сессия молодых учёных. Технические науки. г. Н. Новгород – 2010. – С. 105.

7. **Гребнев, П. А.** Исследование звукоизолирующих свойств сэндвич-панелей / **П. А. Гребнев** // 12-й международный научно-промышленный форум «Великие Реки 2010» (труды конгресса), г. Н. Новгород. – 2010. – С. 195.

8. Бобылев, В. Н. Исследования звукоизолирующих свойств ортотропных и изотропных ограждающих конструкций, запроектированных с учетом требований ресурсосбережения / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, **П. А. Гребнев**, Д. В. Монич, С. А. Паузин, Д. Г. Колесников // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2010 году: сборник научных трудов РААСН / Москва-Орел, 2011 г. – 2011. – С. 393-399.

9. Бобылев, В. Н. Исследования звукоизоляции наружных и внутренних ограждающих конструкций с эффективными конструктивными решениями / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, **П. А. Гребнев**, Д. В. Монич, С. А. Паузин, Д. Л. Щёголев, В. В. Дымченко, Д. В. Мурыгин, Д. Г. Колесников // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2011 году: сборник научных трудов РААСН / Москва, 2012 г. – 2012. – С. 238-245.

10. Бобылев, В. Н. Теоретические и экспериментальные исследования влияния жесткости на звукоизоляцию внутренних ограждений различных видов конструкций / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев**, С. А. Паузин, Щёголев, В. В. Дымченко // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году: сборник научных трудов / Рос. Академия архит. и строит. наук; Волгогр. Гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград, 2013 г. – 2013. – С. 238-245.

11. Бобылев, В. Н. Исследование звукоизолирующих свойств многослойных ограждений с жестким легким заполнителем / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев** // 16-й международный научно-промышленный форум «Великие Реки 2014» (труды конгресса), г. Н. Новгород. – 2014. – С. 182-184.

12. **Гребнев, П. А.** Исследование звукоизолирующих свойств сэндвич-панелей / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев** // IV международный фестиваль науки, сборник тезисов, г. Н. Новгород. – 2014.

13. Бобылев, В. Н. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций / Д. В. Монич, В. А. Тишков, **П. А. Гребнев** // Монография: ННГАСУ. – Нижний Новгород, 2014. – 117 с.

14. Бобылев, В. Н. Инженерный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев** // Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение, надежность, экологическая безопасность: материалы конф. IV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Г.Л. Осипова. г. Москва, 2014.

15. Бобылев, В. Н. Звукоизоляция сэндвич-панелей с жестким средним слоем / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев** // V международный фестиваль науки, сборник тезисов, г. Н. Новгород. – 2014. – С. 30-33

16. Бобылев, В. Н. Разработка рациональных конструктивных решений звукоизолирующих ограждающих конструкций на основе сэндвич-панелей / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, Д. В. Монич, **П. А. Гребнев** // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – 2015. – №18. – С. 96-99

Свидетельства о государственной регистрации

17. 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. –2с.

18. Заявка на получение патента №2016122737 Российская Федерация. Звукоизолирующее ограждение пониженной пожарной опасности / В. Н. Бобылев, **П. А. Гребнев**, Д. В. Монич, 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.