



УДК 699.844

П. А. ГРЕБНЕВ, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры архитектуры, нач. научного центра «Новое строительство»; **Д. В. МОНИЧ**, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой архитектуры

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛЕГКИХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ (ОБЗОР)

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-19-57; эл. почта: p.grebnev@mail.ru

Ключевые слова: звукоизоляция, многослойные ограждения, легкие ограждения, каркасные ограждения, внутренние ограждения.

Представлен анализ конструктивных решений, применяющихся в настоящее время в строительстве, и перспективных многослойных легких ограждающих конструкций зданий. Показаны основные особенности конструктивных решений и физико-механические параметры применяемых материалов, влияющих на звукоизолирующую способность внутренних многослойных легких ограждающих конструкций жилых, общественных и промышленных зданий. Приведен обзор методов расчета звукоизоляции многослойных ограждений. Определены особенности конструктивных решений рассматриваемых ограждений, не учитываемые в рамках существующих методов расчета их звукоизоляции.

Введение

В настоящее время в строительном комплексе России активно применяются многослойные ограждающие конструкции, предназначенные для разделения внутреннего пространства зданий на отдельные помещения. При определении их параметров необходимо соблюдение требований СП 51.13330.2011 «Защита от шума» по параметрам защиты от воздушного шума. Для этого необходимо установить достоверное значение собственной звукоизоляции ($R_{w \text{ собств.}}$) каждого применяемого ограждения, разделяющего помещения с функциональным назначением, указанным в п. 9 СП 51.13330.2011 «Защита от шума». Определение параметра $R_{w \text{ собств.}}$ возможно теоретически или в результате лабораторного эксперимента. При этом, при применении полученного значения, нормируемого одночислового параметра звукоизоляции следует учитывать его уменьшение в соответствии с п. 9.15 СП 51.13330.2011 «Защита от шума» из-за косвенной звукопередачи, имеющей место на реальном объекте строительства.

Для решения задач защиты от воздушного шума может быть использован большой спектр ограждающих строительных конструкций. Механизм прохождения звука через ограждения определяется их конструктивным решением.

Стены и перегородки зданий, выполненные из одного материала: железобетона (диафрагмы жесткости зданий), кирпича, газобетона и тому подобных материалов, представляют собой акустически однородные конструкции. Механизм прохождения звука через такие ограждения подробно исследован Л. Кремером, Л. Беранеком, В. И. Заборовым и другими учеными.



Акустически неоднородные конструкции, представляющие собой многослойные ограждения, сочетают в себе слои различных материалов с сильно отличающимися физико-механическими параметрами. К таким конструкциям можно отнести массивные стены с каркасными и бескаркасными облицовками, перекрытия с плавающим полом и звукоизолирующими потолками различной конструкции, различные многослойные легкие (с поверхностной плотностью $\mu \leq 125 \text{ кг/м}^2$) ограждающие конструкции зданий. Облицовки массивных стен, хотя и способны значительно повысить их звукоизоляцию [1, 2], но применяются преимущественно при реконструкции и капитальном ремонте зданий, а не при новом строительстве, поэтому в данной работе не рассматриваются. Звукоизоляция горизонтальных ограждений зданий, требующая учета ударного шума, в данной работе также не рассматривается.

Многослойные легкие ограждения получили широкое распространение в современном строительстве и зарекомендовали себя в качестве технологичной, с гибким конструктивным решением, унифицированной системы, позволяющей решать широкий спектр задач строительной акустики при создании внутреннего пространства жилых и промышленных зданий. На базе таких конструкций разрабатываются и внедряются ограждения, предназначенные для выполнения сложных специализированных задач изоляции уровней шума большой мощности. При этом конструктивные решения применяемых ограждений с высокой звукоизоляцией нельзя считать рациональными, так как параметры рациональности данного типа ограждений четко не определены. Проектирование многослойных ограждающих конструкций часто сводится к увеличению количества слоев обшивок и толщины каркаса, без определения рациональных значений данных параметров для выполнения конкретных задач защиты от шума. Примером способа определения рациональных параметров каркасных многослойных ограждений может служить работа [3].

1. Анализ конструктивных решений многослойных легких звукоизолирующих ограждений

1.1. Многослойные ограждения со склеенными слоями (сэндвич-панели)

Легкие ограждения, представляющие из себя штучные сэндвич-панели (в том числе активно внедряемые в настоящее время в строительство СИП-панели), как правило, имеют достаточно низкую звукоизоляцию, способную при правильном проектировании обеспечить лишь минимальные требования по комфорту в малоэтажном жилищном строительстве, а также применяются для защиты от шума в промышленных зданиях (сэндвич-панели с облицовками из стальных листов). Низкие параметры их звукоизоляции связаны с тем, что резонансная частота системы «масса – упругость – масса» (f_{msm}) таких ограждений находится в области средних частот. Это объясняется высокой жесткостью несущего остова (среднего слоя) многослойных штучных сэндвич-панелей, что необходимо для обеспечения их прочности и устойчивости при монтаже и эксплуатации. Звукоизоляция сэндвич панелей исследовалась в работах [4–7]. Особенности конструкции таких ограждений, обусловленные наличием жесткого несущего остова, приведены на рис. 1. Отдельно можно выделить перспективные конструкции сэндвич-панелей, для которых при монтаже сначала возводится средний слой, а затем выполняются внешние монолитные облицовочные слои методом торкретирования. Звукоизоляция такого типа конструкций исследовалась в работах [8–10].



Рис. 1. Анализ особенностей несущего остова сэндвич-панелей

Для расширения возможностей применения в строительстве перегородок с торкрет-облицовками, на основании опыта работы с сэндвич-панелями, авторами разработаны два способа улучшения их звукоизолирующих характеристик [8].

Первый способ заключается в размещении тонкого упругого слоя акустического разобщения между внешними облицовками и средним жестким легким слоем. За счет этого резонансный провал вблизи частоты f_{msm} смещается в область более низких частот, вплоть до ее выхода за пределы нормируемого частотного диапазона. Применение этого способа обосновано для ограждений, у которых резонансная частота системы «масса – упругость – масса» (f_{msm}) находится в нормируемом диапазоне частот (100 Гц – 3150 Гц).

Второй способ увеличения звукоизоляции подобных ограждений заключается в фрагментации их облицовок, что позволяет сместить провал звукоизоляции вблизи граничной частоты волнового совпадения в область более высоких частот. Он может быть применен для многослойных легких ограждений с торкрет-облицовками [6, 7].

Влияющие на звукоизоляцию особенности внешних обшивок для перегородок со склеенными слоями в целом соответствуют аналогичным параметрам ограждений, собираемых на каркасе, и будут рассмотрены при обзоре данных конструкций ниже.

1.2. Многослойные ограждения, собранные на каркасе (каркасно-обшивные перегородки)

Наиболее технологичный вариант каркаса внутренних перегородок, применяемых в настоящее время, это применение металлического холоднокатаного профиля с толщиной стенки 0,6 мм. Каркас ограждения при этом может быть одинарным из профилей различной высоты поперечного сечения (50, 75, 100 мм) и двойным, когда два одинарных каркаса устанавливаются параллельно друг другу. Так как несущий каркас должен обеспечивать прочность и устойчивость легкого ограждения, то стоечные профили часто выполняются с элементами увеличения жесткости (изменение поперечного сечения профиля с



добавлением в него ребер жесткости). Для применения в специализированных перегородках с высокой звукоизоляцией применяют так называемые «сигма-профили» (с высотой поперечного сечения 100 мм), с элементами упругости (изменение сечения профиля с добавлением в него элемента упругости (ЭУ)).

Для легких ограждений большой высоты ($h > 3$ м) для обеспечения прочности и устойчивости применяют усиливающие перемычки между двумя параллельными каркасами. Данные перемычки из условий унификации, как правило, выполняются из гипсокартонных листов (ГКЛ). Они могут быть сплошными по высоте перегородки или выполненными из дискретных элементов. Конструкции с двойным каркасом и усиливающими перемычками могут выполняться большой высоты (до 12 м), что является их преимуществом для проектирования акустического комфорта общественных пространств (многозальные кинотеатры, рестораны, торговые центры, аэропорты и т. п.).

Влияние двойного каркаса с усиливающими перемычками на звукоизоляцию ограждения в настоящее время не исследовано. Анализ особенностей несущего остова каркасно-обшивных перегородок, влияющих на их звукоизоляционные свойства, приведен на рис. 2.

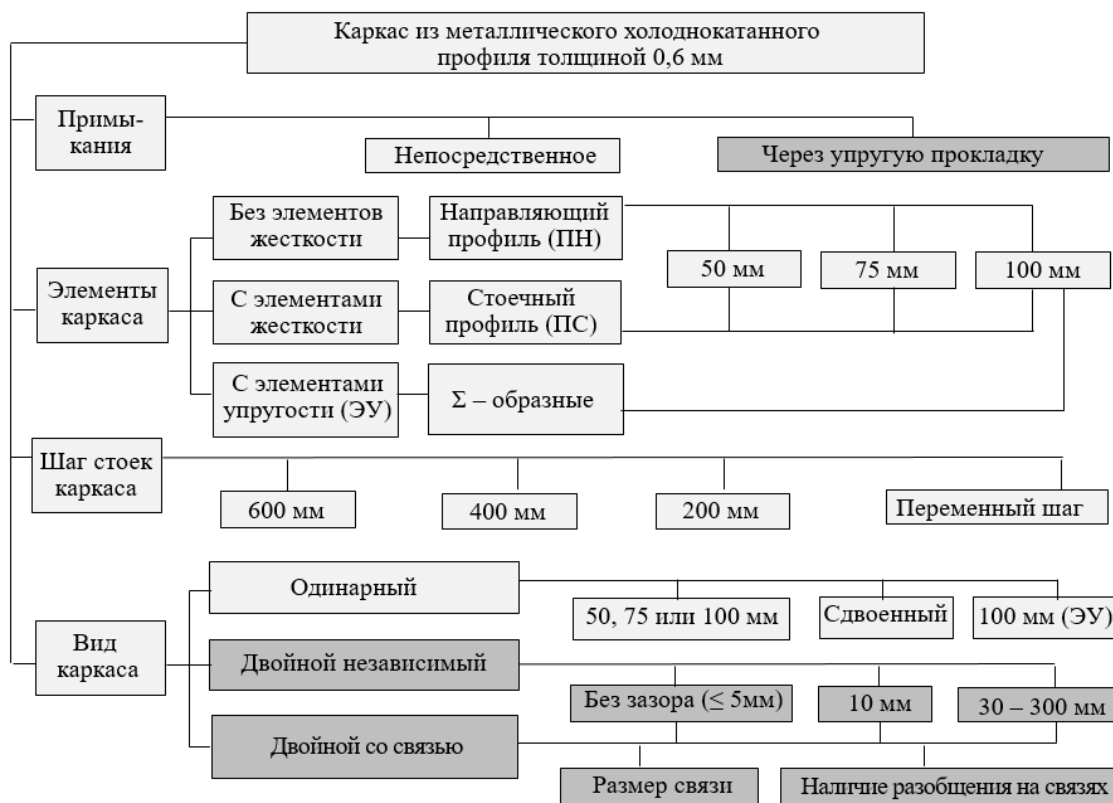


Рис. 2. Анализ особенностей несущего остова каркасно-обшивных перегородок. Темно-серой заливкой выделены конструктивные особенности, влияние которых на звукоизоляцию ограждений изучено недостаточно

Важным элементом многослойного легкого ограждения является его звукопоглощающее заполнение, выполняемое из матов минеральной ваты или стекловолкна. Применяющиеся материалы характеризуются плотностью (от 15 до 100 и более кг/м^3), толщиной и звукопоглощающей способностью.

Также необходимо учитывать степень заполнения воздушного промежутка звукопоглощающим материалом. Оно может быть выполнено полностью (100 %) или частично. Анализ особенностей звукопоглощающего заполнения каркасно-обшивных перегородок приведен на рис. 3.

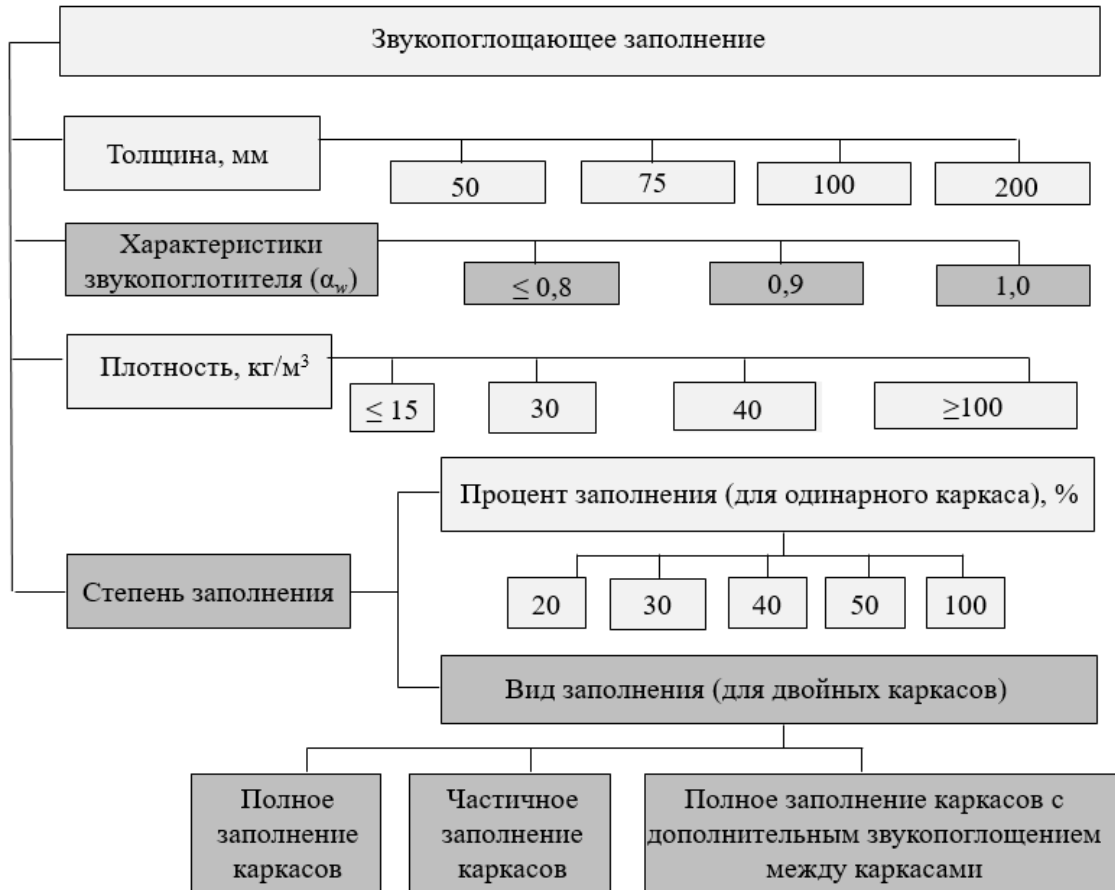


Рис. 3. Анализ особенностей звукопоглощающего заполнения каркасно-обшивных перегородок. Темно-серой заливкой выделены конструктивные особенности, влияние которых на звукоизоляцию ограждений изучено недостаточно

Внешние обшивки могут быть различными. В классическом варианте каркасно-обшивных перегородок – листовыми, но также могут выполняться по технологии торкретирования или быть комбинированными.

Для снижения передачи звука на средних и низких частотах ($f < 200$ Гц) при создании конструкций с высокими звукоизолирующими свойствами применяют ГКЛ повышенной плотности (1000 кг/м^3). Количество слоев обшивок, как правило, составляет от 1 до 4 (редко – до 6) с каждой стороны.

При выборе параметров листовых обшивок необходимо учитывать наличие резкого снижения звукоизоляции на высоких частотах вследствие влияния полных пространственных резонансов (область ППР, $f > f_{\Gamma mn}$). При использовании одного слоя обшивки большой толщины ($h > 15$ мм) может быть применен способ фрагментации элемента обшивки для увеличения значения его резонансной частоты более 3150 Гц [8]. Также возможно применение необходимого для обеспечения требуемой звукоизоляции количества облицовочных слоев



относительно небольшой толщины (от 6 до 10 мм), для которых граничная частота области ППР выходит за верхнюю частоту нормируемого диапазона ($f_{Гмм} > 3150$ Гц).

Анализ параметров внешних обшивок многослойных легких перегородок приведен на рис. 4.

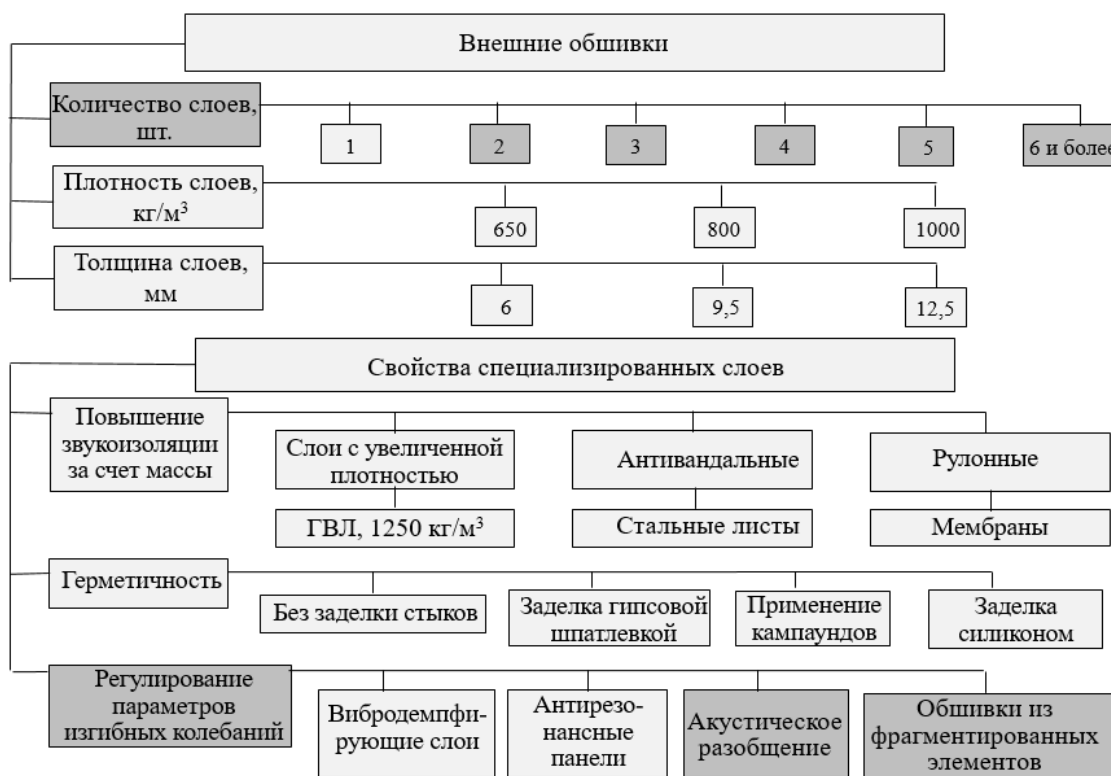


Рис. 4. Анализ параметров внешних обшивок многослойных легких ограждений. Темно-серой заливкой выделены конструктивные особенности, влияние которых на звукоизоляцию изучено недостаточно

2. Применение многослойных ограждений в натуральных условиях

Анализ конструктивного решения и опыт экспериментальных исследований многослойных легких ограждающих конструкций зданий показывает, что данные ограждения могут иметь высокие значения собственной звукоизоляции (R_w собств. до 78 дБ) [2], которые невозможно достигнуть в натуральных условиях из-за косвенной звукопередачи. Поэтому задача создания рационального конструктивного решения ограждения для применения его в конкретном здании должна решаться с учетом факторов косвенного прохождения звука через ограждение и смежные ограждающие конструкции, приведенных на рис. 5. При этом должны учитываться объемно-планировочное и конструктивное решения здания и инженерные системы здания, проходящие через конкретное ограждение. Исследованию косвенной передачи звука через внутренние ограждения зданий для смежных помещений посвящены работы В. И. Заборова [11], В. Г. Крейтана [12]. Системы из двух смежных и с большим количеством помещений могут быть рассчитаны с учетом косвенной и структурной звукопередачи на основе метода статистического энергетического анализа [13, 14].

Для определения звукоизоляции в натуральных условиях рациональным представляется применение подхода, приведенного в ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 «Звукоизоляция воздушного шума между помещениями», определяя акустические характеристики элементов по результатам теоретического расчета (прямое прохождение), и лабораторных исследований частотных характеристик приведенной разности звукового давления для малых технических элементов, дверей и т. п. (по ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 «Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума»).

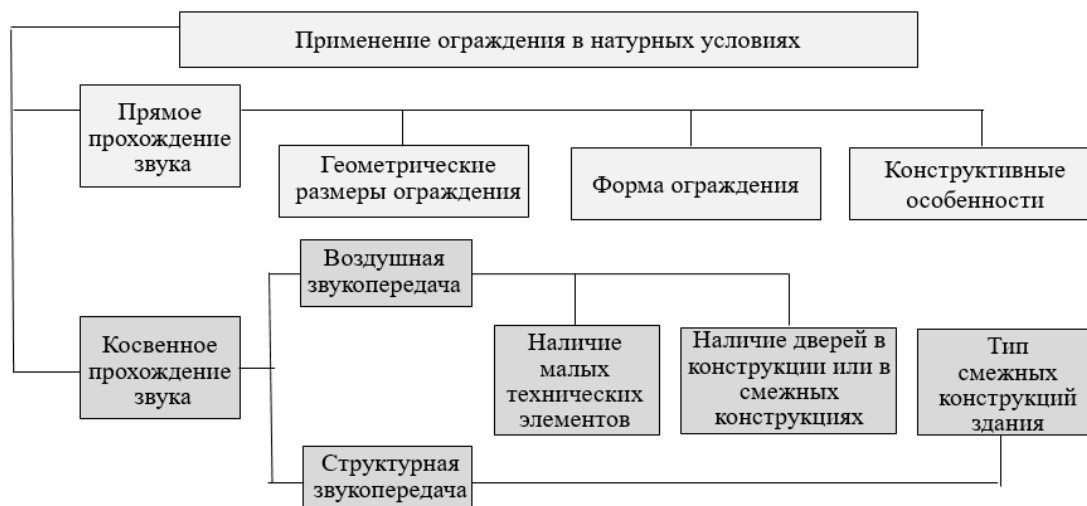


Рис. 5. Факторы, влияющие на косвенное прохождение звука через ограждающую конструкцию между помещениями здания в натуральных условиях. Темно-серой заливкой выделены параметры, влияние которых необходимо учитывать при выполнении теоретических расчетов звукоизоляции многослойных легких ограждающих конструкций

3. Теоретические методы расчета звукоизоляции многослойных легких ограждений

Для формирования современного представления о прохождении звука через ограждающие конструкции зданий важными этапами послужили известные работы лорда Релея (Дж. Стретт) и Л. Кремера.

Исследованиям механизма прохождения звука через двойные ограждения посвящены работы многих зарубежных ученых: А. Шоха, К. Гезеле, Е. Винтергерста, Л. Беранека, А. Лондона, Ф. Дж. Фахи, А. Шоха, Б. Г. Шарпа и др. Жосс и Лямур [15] получили выражения для коэффициентов резонансного и инерционного прохождения звука через однослойную пластину. Данный метод расчета применяется в зарубежной нормативной практике расчетов звукоизоляции (EN 12354-1:2000, ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012).

В отечественной науке исследованиям вопроса прохождения звука через ограждения посвящены работы И. И. Боголепова [16], В. И. Заборова [11], Г. Л. Осипова [17, 18], В. Г. Крейтана [12], Р. Ю. Винокура [18]. На основании комплекса многолетних исследований в НИИ строительной физики РААСН были разработаны инженерные методы расчета звукоизоляции многослойных ограждений [18], приведенные в качестве нормативных в СП 275.1325800.2016



«Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции».

С. Н. Овсянников разработал методику расчета звукоизоляции многослойных остеклений с различным количеством стекол (до пяти) на базе аналитических выражений для определения коэффициентов резонансной и нерезонансной звукопередачи [19, 20].

Наиболее полно процесс прямого прохождения звука через однослойные и двойные ограждающие конструкции зданий с учетом резонансного и инерционного характера прохождения звука описал в рамках теории самосогласования волновых полей М. С. Седов [21]. Он предложил решение задачи об изоляции воздушного шума двойным прямоугольным ограждением конечных размеров, разделяющим два объема смежных помещений. В основе теории лежит явление самосогласования волновых полей с обеих сторон ограждения (со стороны помещения с источником звука и со стороны приемного помещения) и волновых полей самого ограждения (собственного и инерционного).

Инерционное прохождение звука (τ_i) зависит от поверхностной плотности ограждения и его геометрических размеров. Резонансное прохождение звука (τ_r) зависит от степени самосогласования волновых полей в помещении с источником звука и приемном помещении с волновым полем самого ограждения, а также от потерь энергии в материале рассматриваемой ограждающей конструкции.

Характеристикой звукоизолирующей способности ограждения в рамках теории самосогласования волновых полей является коэффициент прохождения через него звука (суммарно, в режиме собственных и вынужденных колебаний), который связан с ней следующей зависимостью:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau_r + \tau_i}, \quad (1)$$

где R – звукоизоляция ограждающей конструкции, дБ; τ_r – коэффициент резонансного прохождения звука; τ_i – коэффициент инерционного прохождения звука.

В рамках теории самосогласования волновых полей рассматриваются два пути прохождения звука через двойные ограждения конечных размеров: прохождение через обе обшивки и через воздушный промежуток с рассмотрением их в качестве самостоятельных колебательных структур и прохождение через всю конструктивную систему в целом, звуковые колебания обшивок в которой взаимосвязаны упругостью воздуха в промежутке между обшивками.

Коэффициент прохождения звука через двойную или многослойную ограждающую конструкцию конечных размеров записывается в следующем виде [21]:

$$\tau = \tau_r + \tau_i = \tau_{er} + \tau_{ei} + \tau_{1r}\tau_{2r} + \tau_{1i}\tau_{2i}, \quad (2)$$

где индекс «e» означает прохождение звука через обшивки с упругой связью между ними; индекс «r» – резонансное прохождение звука; индекс «i» – инерционное прохождение звука; индексы «1», «2» – порядковые номера обшивок двойного или многослойного ограждения (обшивка с индексом «1» располагается

со стороны помещения с источником звука, с индексом «2» – со стороны приемного помещения).

Теория М. С. Седова дает возможность определения предельной звукоизоляции однослойного или многослойного ограждения, которая определяется только инерционным механизмом прохождения через него звука. Данная величина делает возможным определение резервов повышения звукоизоляции ограждения на каждой частоте рассматриваемого частотного диапазона по выражению (1) при равенстве нулю резонансной составляющей прохождения звука:

$$\tau_r = \tau_{er} + \tau_{1r}\tau_{2r} = 0. \quad (3)$$

Резервы повышения звукоизоляции позволяют наглядно показать, насколько принятое конструктивное решение эффективно или рационально (т. е. насколько значения звукоизоляции отличаются в меньшую сторону от максимально возможных значений собственной звукоизоляции для данного конкретного ограждения, определяемых инерционным прохождением звука на каждой рассматриваемой частоте).

Подходы и методы теории самосогласования были использованы для создания методов расчета различных видов многослойных ограждений представителями Нижегородской научной школы строительной акустики, основанной Седовым М. С.

В. И. Юлиным проведены теоретические и экспериментальные исследования изоляции воздушного шума для сэндвич-панелей с различными материалами внешних листовых облицовок и среднего слоя [22]. Получено аналитическое выражение для расчета скоростей изгибных и сдвиговых волн в сэндвич-панелях и решение уравнения свободных колебаний для сэндвич-панелей с несжимаемым средним слоем.

А. А. Кочкин теоретически и экспериментально исследовал звукоизоляцию многослойных ограждений с вибродемпфирующими слоями [23, 24]. Разработан метод расчета звукоизоляции ограждений данного типа с учетом конечных размеров.

А. П. Юфев на базе теории самосогласования волновых полей провел теоретические и экспериментальные исследования процесса прохождения звука через различные типы двойных ограждающих конструкций [25]. Разработан метод расчета звукоизоляции двойных ограждений с учетом их геометрических размеров, ширины воздушного промежутка между слоями и физико-механических параметров слоев.

Д. Л. Щеголевым проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований двойных светопрозрачных ограждающих конструкций зданий при направленном падении звука, с разработкой метода расчета звукоизоляции [26].

Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивной перегородки с одинарным каркасом, выполненным из сигма-профилей, по теории самосогласования волновых полей приведен в работе [27]. Автором, в зависимости от соотношения длины падающей на ограждение волны к шагу стоек каркаса, выделены две области с различным механизмом прохождения звука, для которых приведены аналитические выражения звукоизоляции с учетом резонансной и инерционной составляющих. При этом наличие элементов упругости в профилях каркаса учтено за счет введения параметра приведенной жесткости каркасно-обшивной



перегородки (в области 1), значения которого были определены при помощи численного моделирования для некоторых сочетаний материалов обшивок и формы сечения профиля одинарного каркаса.

Гребнев П. А. исследовал звукоизоляцию трехслойных сэндвич-панелей на базе теории самосогласования волновых полей и в ходе экспериментальных исследований [4, 5, 28]. Определены резервы повышения звукоизоляции для данного типа ограждений. Разработан новый тип легких сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев, что позволило значительно повысить звукоизоляцию за счет смещения резонансной частоты «масса – упругость – масса». Разработан метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с акустическим разобщением слоев.

Д. В. Монич на основе теории самосогласования волновых полей разработал методологию расчета звукоизоляции и разработки рациональных конструктивных решений легких многослойных ограждающих конструкций с одинарными обшивками и облицовками, обеспечивающую эффективное использование внутренних резервов повышения звукоизоляции [29–31]. Разработал методы расчета звукоизоляции новых типов легких многослойных ограждений: каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями, однослойных легких ограждений с антирезонансными панелями и сэндвич-панелей с пазогребневым соединением слоев.

Заключение

В ходе анализа конструктивных решений перспективных и применяющихся в настоящее время в строительстве многослойных легких ограждающих конструкций зданий определены конструктивные особенности и физико-механические свойства применяемых в них материалов, влияющих на их звукоизоляцию.

На базе анализа существующих теоретических методов расчета выделены не учитываемые (или учитываемые не в полной мере) факторы конструктивного решения, без учета которых нельзя решить задачу о проектировании рациональных по параметру звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий, в особенности при высоких значениях их собственной звукоизоляции.

По результатам проведенного анализа определены конструктивные параметры легких ограждений, которые не учитываются существующими методами расчета звукоизоляции (выделены темно-серой заливкой на рис. 1–4):

1) конструктивные параметры, изменение которых позволяет регулировать параметры изгибных колебаний ограждения:

1.1) фрагментация обшивок или облицовок (при их изготовлении методом торкретирования);

1.2) уменьшение толщины обшивок или облицовок с одновременным увеличением количества их слоев;

2) конструктивные параметры обшивок и несущих каркасов:

2.1) усиливающие перемычки между параллельными стоечными профилями двойного каркаса;

2.2) акустическое разобщение между элементами:

а) между обшивками и профилями каркаса;

б) между листами в многослойных обшивках;



- в) между усиливающими перемычками и профилями двойного каркаса;
- 2.3) расстояние между параллельными стоечными профилями двойного каркаса (с возможностью его увеличения до 300 мм);
- 2.4) применение более одного слоя листовых материалов внешних облицовок;
- 3) параметры звукопоглощающего заполнения воздушного промежутка между обшивками:
 - 3.1) физико-механические свойства звукопоглощающего материала;
 - 3.2) способ заполнения воздушного промежутка звукопоглощающим материалом.

Для обоснованного применения современных звукоизолирующих легких ограждений в строительстве необходимо разработать метод учета косвенной звукопередачи по смежным конструкциям. Решение данной задачи позволит получить методологию конструирования и применения в строительстве рациональных типов многослойных легких звукоизолирующих ограждений в практике строительства. Эти вопросы планируется рассмотреть в последующих работах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гребнев, П. А. Типология современных звукоизолирующих ограждающих конструкций зданий / П. А. Гребнев // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2024. – № 3. – С. 25–39.
2. Исследование факторов, влияющих на звукоизоляцию существующих ограждений с дополнительной звукоизоляцией на основе с использованием слоистых вибродемпфированных элементов / Н. А. Кочкин, А. В. Иванова, И. Л. Шубин, А. А. Кочкин // Строительные материалы. – 2024. – № 6. – С. 40–45. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-825-6-40-45. – EDN XFANAO.
3. Оценка рациональности конструктивных решений звукоизолирующих легких перегородок с торкрет-облицовками / Д. С. Кузьмин, Д. В. Монич, П. А. Гребнев, М. А. Пороженко // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 16–20. – DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-16-20. – EDN EUULRN.
4. Experimental study of sound insulation in multilayer building partitions / V. N. Bobyl'ov, V. A. Tishkov, D. V. Monich, V. V. Dymchenko // Noise Control Engineering Journal. – 2014. – Vol. 62, No. 5. – P. 354–359. – DOI 10.3397/1/376234. – EDN UFJNEN.
5. Гребнев, П. А. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / П. А. Гребнев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2 (49). – С. 109–118. – EDN TOLUXR.
6. Исследование звукоизоляции бескаркасных сэндвич-панелей с различными материалами среднего слоя / В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев, Д. В. Монич, С. Р. Попов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 2 (46). – С. 9–17. – EDN XRVGQX.
7. Звукоизоляция сэндвич-панелей с присоединенными облицовками / В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев, В. И. Ерофеев [и др.] // Жилищное строительство. – 2020. – № 7. – С. 8–13. – DOI 10.31659/0044-4472-2020-7-8-13. – EDN EJQUSC.
8. Способы повышения звукоизоляции бескаркасных сэндвич-панелей / В. Н. Бобылев, В. И. Ерофеев, Д. В. Монич, П. А. Гребнев, Д. С. Кузьмин // Приволжский



научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 2 (58). – С. 32–45. – EDN XMXOJO.

9. Экспериментальные исследования звукоизоляции сэндвич-панелей с торкрет-облицовками / В. Н. Бобылев, Д. В. Монич, П. А. Гребнев, О. В. Градова // Жилищное строительство. – 2022. – № 7. – С. 18–23. – DOI 10.31659/0044-4472-2022-7-18-23. – EDN TWPCAS.

10. Кузьмин, Д. С. Звукоизоляция легких перегородок с торкрет-облицовками и акустическим разобщением слоев / Д. С. Кузьмин, Д. В. Монич, В. Н. Бобылев, П. А. Гребнев // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 1 (65). – С. 57–64. – EDN SLDLNZ.

11. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В. И. Заборов. – Москва : Стройиздат, 1969. – 185 с.

12. Крейтан, В. Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах / В. Г. Крейтан. – Москва : Стройиздат, 1990. – 260 с. – ISBN 5-274-01086-5.

13. Овсянников, С. Н. Основные принципы расчета звукопередачи в зданиях методом СЭА / С. Н. Овсянников, О. В. Лелюга / Томский государственный архитектурно-строительный университет. – Томск : Издательство ТГАСУ, 2023. – 160 с. – ISBN 978-5-6049514-9-1.

14. Овсянников, С. Н. Математическое моделирование распространения звука в здании / С. Н. Овсянников, М. С. Овсянников // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27, № 6. – С. 117–140. – DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. – EDN: TAIVPW.

15. Josse, R. Transmission du son par une paroi simple / R. Josse, C. Lamure // Acustica. – 1964. – Vol. 14. – S. 266–280.

16. Боголепов, И. И. Теоретическое исследование звукоизолирующей способности судовых двустенных конструкций / И. И. Боголепов // Труды ЦНИИ технологии судостроения. – Ленинград, 1963. – Вып. 45 – С. 16–35.

17. Лагунов, Л. Ф. Борьба с шумом в машиностроении / Л. Ф. Лагунов, Г. Л. Осипов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 150 с.

18. Руководство по расчёту и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий / НИИСФ Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1983. – 64 с.

19. Овсянников, С. Н. Звукоизоляция многослойных остеклений в отдельных переплетах / С. Н. Овсянников, А. С. Самохвалов, И. Л. Шубин // Жилищное строительство. – 2024. – № 12. – С. 20–28. – DOI 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28. – EDN IOXNGH.

20. Расчеты звукоизоляции одно-, двух и трехслойных светопрозрачных конструкций / С. Н. Овсянников, О. В. Лелюга, А. С. Самохвалов, Т. С. Большанина // Жилищное строительство. – 2022. – № 11. – С. 29–35. – DOI 10.31659/0044-4472-2022-11-29-35. – EDN RAYEUJ.

21. Седов, М. С. Звукоизоляция / М. С. Седов // Техническая акустика транспортных машин : справочник / под редакцией Н. И. Иванова. – Санкт–Петербург, 1992. – Глава 4. – С. 68–106.

22. Юлин, В. И. О звукоизоляции трехслойной пластины с жестким наполнителем / В. И. Юлин // Исследования в области строительства : труды / Горьковский инженерно-строительный институт имени В. П. Чкалова. – Горький, 1973. – Выпуск 64, часть 2. – С. 39–43.

23. Седов, М. С. О звукоизоляции слоистых вибродемпфированных панелей ограниченных размеров / М. С. Седов, А. А. Кочкин // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1987. – № 8. – С. 55–58. – EDN XXGKPH.

24. Кочкин, А. А. О проектировании звукоизоляции легких ограждений с промежуточным вибродемпфирующим слоем / А. А. Кочкин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 191–193. – EDN NTLBOB.



25. Седов, М. С. Расчет звукоизоляции двухстенных конструкций / М. С. Седов, А. П. Юферев. – Горький : ГИСИ им. В.П. Чкалова, 1983. – 40 с.
26. Щеголев, Д. Л. Способ расчета двустенных светопрозрачных конструкций / Д. Л. Щеголев // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектур и строительных наук. – 2010. – С. 91–94.
27. Дымченко, В. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с одинарным каркасом / В. В. Дымченко // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 4 (48). – С. 21–31. – EDN MJXYUH.
28. Бобылев, В. Н. Инженерный метод расчета звукоизоляции сэндвич-панелей с учетом двойственной природы прохождения звука / В. Н. Бобылев, В. А. Тишков, П. А. Гребнев, Д. В. Мониц // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 134–138.
29. Мониц, Д. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок с антирезонансными панелями / Д. В. Мониц // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1 (61). – С. 61–71. – EDN GCWHTB.
30. Мониц, Д. В. Метод расчета звукоизоляции легких перегородок с бескаркасными антирезонансными панелями / Д. В. Мониц // Жилищное строительство. – 2021. – № 11. – С. 27–33. – DOI 10.31659/0044-4472-2021-11-27-33. – EDN ACQOKO.
31. Мониц, Д. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок / Д. В. Мониц // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4 (60). – С. 30–39. – EDN KYPWKS.

GREBNEV Pavel Alekseevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of architecture, head of the “New Construction” scientific center; MONICH Dmitriy Viktorovich, doctor of technical sciences, associate professor, holder of the chair of architecture

ANALYSIS OF SOUND INSULATION CALCULATION METHODS OF MULTILAYER LIGHTWEIGHT BUILDING ENCLOSURES (REVIEW)

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.
Tel.: (831) 430-19-57; e-mail: p.grebnev@mail.ru

Key words: sound insulation, multilayer enclosures, lightweight enclosures, frame enclosures, internal enclosures.

This article presents an analysis of design solutions currently used in construction, as well as promising multilayer lightweight building enclosures. It highlights the key design features and physical and mechanical properties of the materials used, which influence the sound insulating performance of interior multilayer lightweight building enclosures in residential, public, and industrial buildings. A review of methods for calculating the sound insulation of multilayer enclosures is provided. Design features of the structural solutions of the enclosures under consideration that are not taken into account within the framework of existing calculation methods of sound insulation, are identified.



REFERENCES

1. Grebnev P. A. Tipologiya sovremennykh zvukoizoliruyushchikh ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy [Typology of modern soundproofing enclosing structures of buildings]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2024, № 3, P. 25–39.
2. Kochkin N. A., Ivanova A. V., Shubin I. L., Kochkin A. A. Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na zvukoizolyatsiyu sushchestvuyushchikh ograzhdeniy s dopolnitelnoy zvukoizolyatsiey na otnose s ispolzovaniem sloistyx vibrodempfi-rovannykh ehlementov [Study of factors influencing sound insulation of existing enclosures with additional sound insulation on the separation using layered vibration-damped elements]. *Stroitelnye materialy [Construction materials]*. 2024, № 6, P. 40–45. DOI 10.31659/0585-430X-2024-825-6-40-45. EDN XFAHAO.
3. Kuzmin D. S., Monich D. V., Grebnev P. A., Porozhenko M. A. Otsenka ratsionalnosti konstruktivnykh resheniy zvukoizo-liruyushchikh legkikh peregorodok s torkret-oblicovkami [Assessment of the rationality of design solutions for soundproofing lightweight partitions with shotcrete cladding]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing construction]*. 2024, № 6, P. 16–20. DOI 10.31659/0044-4472-2024-6-16-20. EDN EUULRN.
4. Bobylev V. N., Tishkov V. A., Monich D. V., Dymchenko V. V. Experimental study of sound insulation in multilayer building partitions. *Noise Control Engineering Journal*, 2014, Vol. 62, № 5. P. 354–359. DOI 10.3397/1/376234. EDN UFJNEN.
5. Grebnev P. A. Teoreticheskie i ehksperimentalnye issledovaniya zvukoizolyatsii beskarkasnykh ograzhdayushchikh konstruksiy iz sehndvich-paneley [Theoretical and experimental studies of sound insulation of frameless enclosing structures made of sandwich panels]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]*. 2015, № 2 (49), P. 109–118. EDN TOLUXR.
6. Bobylev V. N., Grebnev P. A., Monich D. V., Popov S. R. Issledovanie zvukoizolyatsii beskarkasnykh sehndvich-paneley s razlichnymi materialami srednego sloya [Study of sound insulation of frameless sandwich panels with different materials of the middle layer]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2018, № 2 (46), P. 9–17. EDN XRVGQX.
7. Bobylev V. N., Grebnev P. A., Erofeev V. I., Monich D. V., Kuzmin D. S., Tikhomirov L. A. Zvukoizolyatsiya sehndvich-paneley s prisoedinennymi oblicovkami [Sound insulation of sandwich panels with attached facings]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing construction]*. 2020, № 7, P. 8–13. DOI 10.31659/0044-4472-2020-7-8-13. - EDN EJQUSC.
8. Bobylev V. N., Erofeev V. I., Monich D. V., Grebnev P. A., Kuzmin D. S. Sposoby povysheniya zvukoizolyatsii beskarkasnykh sehndvich-paneley [Methods for improving the soundproofing of frameless sandwich panels]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021, № 2 (58), P. 32–45. EDN XMXOJO.
9. Kuzmin D. S., Monich D. V., Grebnev P. A., Gradova O. V. Ehksperimentalnye issledovaniya zvukoizolyatsii sehndvich-paneley s torkret-oblitsovkami [Experimental studies of sound insulation of sandwich panels with shotcrete facings]. *Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing construction]*. 2022, № 7, P. 18–23. DOI 10.31659/0044-4472-2022-7-18-23. EDN TWPCAS.
10. Kuzmin D. S., Monich D. V., Bobylev V. N., Grebnev P. A. Zvukoizolyatsiya legkikh peregorodok s torkret-oblicovkami i akusticheskim razobshche-niem sloev [Sound insulation of lightweight partitions with shotcrete facings and acoustic separation of layers]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2023, № 1 (65), P. 57–64. EDN SLDLNZ.
11. Zaborov V. I. Teoriya zvukoizolyatsii ograzhdayushchikh konstruksiy [Theory of sound insulation of enclosing structures]. Moscow, Stroyizdat, 1969, 185 p.

12. Kreytan V. G. Zashchita ot vnutrennikh shumov v zhilykh domakh [Protection from internal noise in residential buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1990, 260 p.
13. Ovsyannikov S. N., Lelyuga O. V. Osnovnye printsipy rascheta zvukoperedachi v zdaniyakh metodom statisticheskogo ehner-geticheskogo analiza [Basic principles of calculating sound transmission in buildings using by the method of statistical energy analysis]. Tomsk, Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2023, 160 p.
14. Ovsyannikov S. N., Ovsyannikov M. S. Matematicheskoe modelirovaniye rasprostraneniya zvuka v zdanii [Mathematical modeling of sound propagation in a building]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Journal of Construction and Architecture]. 2025, Vol. 27, № 6, P. 117–140. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-117-140. EDN: TAIVPW
15. Josse R., Lamure C. Transmission du son par une paroi simple [Sound transmission by a single wall]. Acustica, 1964, Vol. 14, P. 266–280.
16. Bogolepov I. I. Teoreticheskoye issledovaniye zvukoizoliruyushchey sposobnosti sudovykh dvustennykh konstruksiy [Theoretical Study of Soundproofing Capacity of Double-Skinned Marine Structures]. Trudy CNII tekhnologii sudostroeniya [Proceedings of the Central Research Institute of Shipbuilding Technology]. Leningrad, 1963, Issue 45, P. 16–35.
17. Lagunov L. F., Osipov G. L. Borba s shumom v mashinostroenii [Noise Control in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1980, 150 p.
18. Rukovodstvo po raschyotu i proektirovaniyu zvukoizolyatsii ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy [Guide to Calculating and Designing Soundproofing of Building Enclosing Structures]. NIISF Gosstroya SSSR, Moscow, Stroyizdat, 1983, 64 p.
19. Ovsyannikov S. N., Samokhvalov A. S., Shubin I. L. Zvukoizolyatsiya mnogosloynnykh ostekleniy v razdelnykh perepletakh [Sound insulation of multilayer glazing in separate frames]. Zhilishchnoye stroitelstvo [Housing construction]. 2024, № 12, P. 20–28. DOI 10.31659/0044-4472-2024-12-20-28. EDN IOXGHG.
20. Ovsyannikov S. N., Lelyuga O. V., Samokhvalov A. S., Bolshanina T. S. Zvukoizolyatsiya mnogosloynnykh ostekleniy v razdelnykh perepletakh [Soundproofing calculations of single-, double- and three-layer translucent structures]. Zhilishchnoye stroitelstvo [Housing construction]. 2022, № 11, P. 29–35. DOI 10.31659/0044-4472-2022-11-29-35. EDN RAYEUI.
21. Sedov M. S. Zvukoizolyatsiya [Sound insulation] Tekhnicheskaya akustika transportnykh mashin [Technical acoustics of transport vehicles]: spravochnik. pod redaktsiyey N. I. Ivanova. St. Petersburg, 1992, Ch. 4, P. 68–106.
22. Yulin V. I. O zvukoizolyatsii trekhslonnoy plastiny s zhestkim zapolnitelem [On soundproofing of a three-layer plate with a rigid filler]. Issledovaniya v oblasti stroitelstva [Research in the field of construction]: trudy Gorkovskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta imeni V. P. Chkalova. Gorky, 1973, Issue 64, chast 2, P. 39–43.
23. Sedov M. S., Kochkin A. A. O zvukoizolyatsii sloistykh vibrodempirovannykh paneley ogranichennykh razmerov [On sound insulation of layered vibration-damped panels of limited dimensions] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1987, № 8, P. 55–58. EDN XXGKPH.
24. Kochkin A. A. O proektirovaniy zvukoizolyatsii legkikh ograzhdeniy s promezhutochnym vibrodemp-firuyushchim sloem [On the design of sound insulation of lightweight enclosures with an intermediate vibration-damping layer]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. 2010, № 3, P. 191–193. EDN NTLBOB.
25. Sedov M. S., Yuferev A. P. Raschet zvukoizolyatsii dvukhsennykh konstruksiy [Calculation of sound insulation of double-wall structures]. Gorky, GISI im. V.P. Chkalova, 1983, 40 p.
26. Shchegolev D. L. Sposob rascheta dvustennykh svetoprozrachnykh konstruksiy [Method of calculating double-walled translucent structures]. Vestnik Volzhskogo regional'nogo



otdeleniya Rossiyskoy akademii arkhitekturi i stroitelnykh nauk [Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]. 2010, P. 91–94.

27. Dymchenko V. V. Metod rascheta zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh pe-regorodok s odinarnym karka-som [Method of calculating sound insulation of frame-sheathing partitions with a single frame]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2018, № 4 (48), P. 21–31. EDN MJXYHH.

28. Bobylev V. N., Tishkov V. A., Grebnev P. A., Monich D. V. Inzhenerny metod rascheta zvukoizolyatsii sehndvich-paneley s uchetom dvoystvennoy prirody prokhozheniya zvuka [Engineering method for calculating sound insulation of sandwich panels taking into account the dual nature of sound transmission]. Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. 2016, № 1, P. 134–138.

29. Monich D. V. Metod rascheta zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh peregorodok s antirezonsnymi panelyami [Method for calculating the sound insulation of frame-sheathing partitions with antiresonance panels]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2022, № 1(61), P. 61–71. EDN GCWHTB.

30. Monich D. V. Metod rascheta zvukoizolyatsii legkikh peregorodok s beskarkasnymi antirezonsnymi panelyami [Method for calculating the sound insulation of lightweight partitions with frameless antiresonance panels]. Zhilishchnoe stroitelstvo [Housing construction]. 2021, № 11, P. 27–33. DOI 10.31659/0044-4472-2021-11-27-33. EDN ACQOKO.

31. Monich D. V. Metod rascheta zvukoizolyatsii karkasno-obshivnykh peregorodok [Method for calculating sound insulation of frame-sheathing partitions]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.- stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021, № 4 (60), P. 30–39. EDN KYPWKS.

© П. А. Гребнев, Д. В. Монич, 2026

Получено: 15.01.2026 г.