

А.П. Мохирев, И.В. Храмов, А.Д. Гузоватова

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛОСТЕЙ
В КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ПЛИТ**

Введение. Исследования движения звуковых волн в различных поверхностях не новы. Множество трудов посвящено теории звука и распространению его в различных материалах [Попов, Кадцо, 2013; Радоуцкий и др., 2016; Кудряшов, Леонгард, 2018; Бирман, Угрюмов, 2019; Бойтемиров, 2021].

Одним из конструктивных решений для подавления звуковых волн могут являться акустические полости [Амельчугов и др., 2022]. Формы акустических полостей могут быть разнообразными, выбор формы зависит от конкретных задач и требований [Santi et al., 2016; Sil'man, Ponomarev, 2021]. Некоторые из наиболее распространенных форм акустических полостей включают:

- параллелепипеды: прямоугольные или кубические формы, которые применяются для улучшения звукопоглощения и звукоизоляции в помещениях;
- пирамиды: форма, которая обеспечивает хорошее звукопоглощение и улучшение акустики помещения;
- купола: арочная форма, которая может использоваться для создания изолированных акустических камер или студий;
- гексагональные ячейки: форма, которая обеспечивает хорошие звукопоглощение и звукоизоляцию;
- сферы: форма, которая также может использоваться для улучшения акустики и звукоизоляции помещений.

Каждая форма имеет свои уникальные свойства и эффективность отражения звука в зависимости от специфических целей и условий.

В научных трудах [Сумбатян, Боев, 2020; De Santis et al., 2024] исследуется приближенный подход к отражению звука от криволинейных поверхностей, который основан на замене этих поверхностей набором плоских отражателей. Однако вопрос о точности такого приближения остается открытым. Для решения данной проблемы авторы предлагают новый метод. В работе рассматривается асимптотически точное решение, которое соот-

ветствует лучевой теории звука. Полученные явные формулы сравниваются с методом трассировки лучей (МТЛ). Данное исследование поможет лучше понять процессы отражения звука от сложных криволинейных поверхностей и разработать более точные методы моделирования подобных явлений.

Форма параболы играет важную роль в отражении звуковой волны из-за ее свойств фокусировки и диффузии [Храмов, Мохирев, Амельчугов и др., 2022–2024]. Когда звуковая волна попадает на поверхность в форме параболы, она отражается не случайно, а сосредоточивается в определенном месте – фокусе параболы. Это происходит благодаря тому, что звуковая волна, параллельная оси симметрии параболы, отражается в направлении фокуса в соответствии с оптическим законом отражения.

Таким образом, форма параболы позволяет сконцентрировать энергию звуковой волны в определенной точке, увеличивая ее интенсивность в этом месте. Это свойство параболы может быть использовано, например, для создания акустических устройств, способных улавливать звуковые сигналы и усиливать их. Кроме того, форма параболы также способствует диффузии звуковой волны. Поскольку поверхность параболы имеет плавные изгибы и отражает звуковую волну под определенным углом, это способствует рассеянию звука в разные направления и более равномерному распределению звуковой энергии. Форма параболы является уникальной и эффективной для отражения и фокусировки звуковой энергии, а также для снижения отражения и обеспечения более равномерного распределения звука в пространстве.

Цель настоящих исследований – определить наиболее эффективную форму акустических полостей для улучшения звукоизоляции деревянных панелей.

Материалы и методика исследования. Идеальная параболическая форма – это параболическая поверхность, которая создает эффект фокусировки и рассеивания звуковой волны. Когда звуковая волна попадает на параболическую поверхность, она отражается от нее в разных направлениях, что способствует рассеиванию звука. Чем глубже и шире парабола, тем более эффективно она рассеивает звук в разные стороны, так как более крутые углы отражения приводят к более равномерному распределению звуковой энергии. Идеальная параболическая форма используется для создания акустических диффузоров, которые рассеивают звуковые волны и улучшают звучание в помещении. Диффузоры с параболической формой помогают уменьшить переотражение звука и создать более комфортную и равномерную акустическую среду.

Акустическая полость параболической формы обладает определенными характеристиками, которые позволяют ей эффективно рассеивать звук и улучшать звукоизоляцию материала. Кроме того, такие формы могут быть использованы для создания эстетичных и функциональных акустических конструкций.

Наилучшая параболическая форма акустической полости для отражения звука определяется на основе принципа фокусировки звуковых волн. Параболическое зеркало используется для сбора и отражения звука в определенном направлении. Для начала нужно определить фокусное расстояние. Фокусное расстояние параболы зависит от глубины ее кривизны. Чем глубже кривизна, тем ближе к оси будет находиться фокус. Фокусное расстояние можно определить теоретически или опытным путем. Размеры параболы и угол наклона определяют характеристики отражаемого звука. Для наилучшего эффекта необходимо подобрать размеры и угол так, чтобы звуковые волны собирались в одной точке – фокусе. Для достижения идеальной отражающей способности необходимо изготовить параболическую поверхность с высокой степенью точности. Это поможет избежать искажений в отраженном звуке. Все высказанное поможет определить идеальную параболическую форму для отражения звука с максимальной эффективностью.

Результаты исследования. При определении наиболее эффективной акустической полости определены фокусы в полусферической и параболической форме (рис. 1).

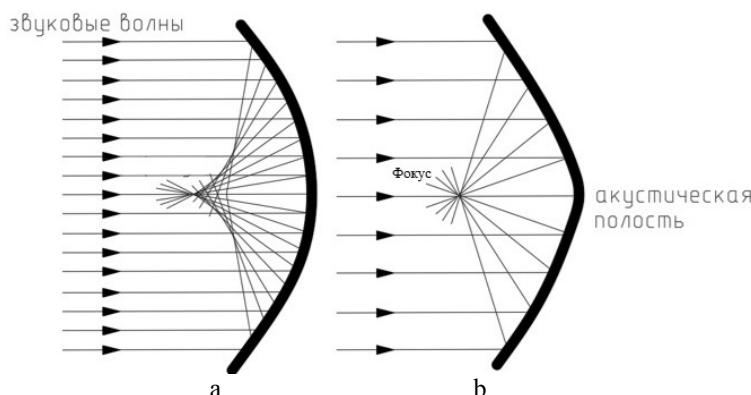


Рис. 1. Фокусировка отражаемого звука при разных формах акустической полости: а – полусфера, б – парабола.

*Fig. 1. Focusing of reflected sound in different forms of acoustic cavity:
a – hemisphere, b – parabola.*

Параболическое зеркало – это зеркальная поверхность в виде параболоида вращения, который обладает способностью фокусировать параллельные лучи звука в одной точке – фокусе. Это свойство делает параболические зеркала идеальным инструментом для сбора и отражения света или звука. Форма параболы математически описывается уравнением $y = x^2$, где x и y – координаты плоскости, а x^2 представляет собой квадрат переменной. При использовании параболического зеркала для отражения звука звуковые волны при попадании на поверхность параболы отражаются под углом, который равен углу падения, и фокусируются в одной точке перед зеркалом. Это позволяет увеличить интенсивность звуковых волн в фокусе, что может быть использовано для улучшения звукоизоляции, воздействия на отраженный звук в определенной точке (фокусе).

На (рис. 2) показано общее решение в повышении звукоизоляционных свойств, которое состоит в отражении звуковых волн P_1 , исходящих от источника звука P_0 , проходящих через акустические полости параболической формы с дальнейшим фокусом в точке А, рассеиванием энергии звуковой волны P_2 и прохождением остаточного звукового давления P_3 . Для решения поставленной задачи разработана деревянная панель с применением конструктивных элементов, повышающих звукоизоляционные свойства от воздушного шума.

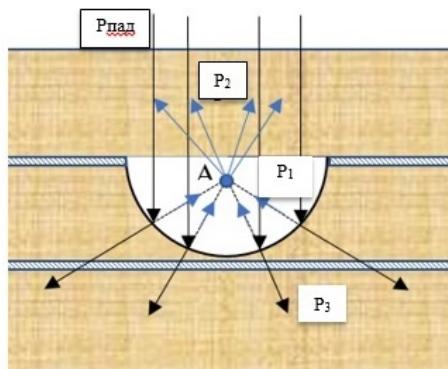


Рис. 2. Модель прохождения звуковой энергии через параболическую акустическую полость

Fig. 2. Model of the passage of sound energy through a parabolic acoustic cavity

Описание процессов, происходящих в звукоизоляционной древесной панели при прохождении через нее звукового давления, изображено на рис. 3.

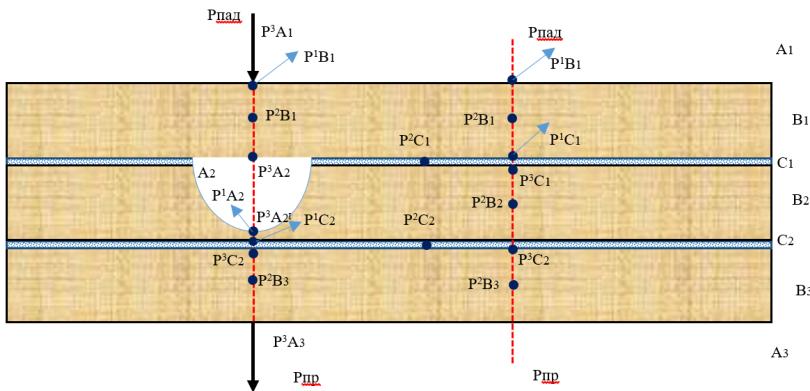


Рис. 3. Модель прохождения звуковой энергии через звукоизоляционную древесную панель

Fig. 3. A model of the passage of sound energy through a soundproof wood panel

Звуковое давление падающей волны $P_{\text{пад}}$ от источника звука проходит через воздушное пространство A_1 , где за счет разностей плотностей сред теряет часть своей интенсивности P^3_{A1} , далее проходя в плоскость слоя деревянной панели B_1 , при соприкосновении с которым происходит частичное отражение звуковой волны P^1_{B1} с дальнейшим рассеиванием в воздушном пространстве A_1 . Проходящая в слой деревянной панели B_1 волна частично поглощается P^2_{B1} .

Звуковая волна, пройдя через слой деревянной панели B_1 и соприкасаясь с клеевым слоем C_1 , частично отражается (P_{C1}^1) с дальнейшим рассеянием остаточной звуковой волны в деревянной панели B_1 . Затем происходит поглощение звуковой волны P_{C1}^2 в клеевом слое C_1 за счет более плотной среды используемого клея.

При использовании акустических звукоизоляционных полостей A_2 в слое панели B_2 звуковая волна P_{B1}^1 , проходя из древесины слоя B_1 в воздушное пространство акустической полости A_2 (между полостью и древесиной клей отсутствует) из-за разности плотностей частично теряет интенсивность (P_{A2}^3). Затем звуковая волна частично отражается от акустической полости P_{A2}^1 и входит обратно в слой панели B_1 , соприкасаясь с которым частично отражается и гасится, постоянно преломляясь, отражаясь в акустической полости A_2 от его поверхности и частично проникая в слои B_1 и B_2 , поглощается древесиной, после чего остаточная ин-

тенсивность звуковой волны поглощается (P^3_{A2}) за счет перехода из воздушного пространства акустической полости A_2 в среду слоя деревянной панели B_2 .

В слое деревянной панели B_2 происходит частичное поглощение звуковой волны (P^2_{B2}).

В kleевом слое C_2 происходит частичное отражение звуковой волны (P^1_{C2}) с дальнейшим частичным поглощением. При переходе из kleевого слоя C_2 в плоскость слоя деревянной панели B_3 звуковая волна частично поглощается (P^3_{C2}). Далее в слое деревянной панели B_3 также происходит частичное поглощение (P^2_{B3}).

Заключительная потеря интенсивности звуковой волны P^3_{A3} происходит при переходе из слоя деревянной панели B_3 в воздушную среду A_3 ; далее остаточное звуковое давление $P_{\text{пр}}$ доходит до потребителя.

Итоговое значение прошедшего звукового давления $P_{\text{пр}}$ можно представить в виде формулы (1):

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - (P^3_{A1} + P^1_{B1} + P^2_{B1} + P^1_{C1} + P^2_{C1} + P^3_{C1} + P^2_{B2} + P^3_{A2} + P^1_{A2} + P^3_{A2} + P^1_{C2} + P^2_{C2} + P^3_{C2} + P^2_{B3} + P^3_{A3}), \quad (1)$$

где $P_{\text{пад}}$ – звуковое давление падающей волны от источника звука,

P^3_{A1} – переход из воздушной среды в среду слоя B_1 ,

P^1_{B1} – отражение звуковой волны от плоскости деревянной панели B_1 ,

P^2_{B1} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_1 ,

P^1_{C1} – отражение от kleевого слоя C_1 ,

P^2_{C1} – поглощение звуковой волны в kleевом слое C_1 ,

P^3_{C1} – переход из kleевого слоя C_1 в слой деревянной панели B_2 ,

P^2_{B2} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_2 ,

P^3_{A2} – переход из слоя B_1 в воздушное пространство акустической полости A_2 ,

P^1_{A2} – отражение звуковой волны от звукового кармана,

P^3_{A2} – переход из воздушного пространства акустической полости A_2 в слой деревянной панели B_2 ,

P^1_{C2} – отражение от kleевого слоя C_2 ,

P^2_{C2} – поглощение звуковой волны в kleевом слое C_2 ,

P^3_{C2} – переход из kleевого слоя C_2 в слой деревянной панели B_3 ,

P^2_{B3} – поглощение звуковой волны деревянной панелью B_3 ,

P^3_{A3} – переход из среды слоя деревянной панели B_3 в воздушную среду A_3 ,

$P_{\text{пр}}$ – прошедшее звуковое давление.

Выводы.

Парabolicкая форма акустических полостей имеет свойство отражать звуковые волны в единую точку, называемую фокусом. Это позволяет увеличить интенсивность звука в этой точке и усилить его. Кроме того, парабола уменьшает рассеивание звука и позволяет передавать звук на большее расстояние с минимальными потерями.

Таким образом, благодаря своим фокусирующими свойствам, парабола является предпочтительной формой для отражения звука. Это делает ее эффективным инструментом для создания акустических систем, направленных на улучшение распространения звука в конкретном направлении или на увеличение мощности и четкости звукового сигнала. Это позволяет воздействовать на отраженный звук в определенной точке (фокусе), что является дальнейшей задачей исследований.

Предлагаемая конструкция звукоизоляционной древесной панели позволяет улучшить акустический комфорт. Разработанная древесная панель не противоречит межгосударственному стандарту ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций» [Мохирев и др., 2022].

Представленная модель описывает все акустические процессы, происходящие при прохождении звуковой энергии через конструкцию усовершенствованной звукоизоляционной панели.

При сравнении полученных результатов [Храмов и др., 2022] с древесными панелями без применения звукоизоляционных элементов исследования показали увеличение коэффициента дополнительной звукоизоляции по сравнению с исходным материалом на 6–8%, что является хорошим результатом.

Полученные данные демонстрируют потенциал звукоизоляционных древесных панелей для снижения воздушного шума в различных сферах применения [Храмов и др., 2023].

Продолжение исследований и разработок в этой области позволит еще больше оптимизировать звукоизоляционные возможности деревянных панелей, расширяя их применимость и способствуя созданию более комфортной среды.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-78-10002, <https://tscf.ru/project/22-78-10002/>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Амельчугов С.П., Мохирев А.П., Тарасов И.В., Храмов И.В. Исследование звукового импеданса деревянной панели // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 11. С. 27–31.

Бойтемиров Ф.А. Перспективность применения древесины в высотных зданиях на основе проведенного исследования // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 10 (1046). С. 37–39.

Бирман А.Р., Угрюмов С.А. Фанерная панель. Патент на полезную модель № 193354 U1 Российская Федерация, МПК B27D 1/06: № 2019118160: заявл. 10.06.2019: опубл. 25.10.2019.

Кудряшов А.П., Леонгард Д.К. Звукоизоляционное дверное полотно. Патент на полезную модель № 177663 U1 Российская Федерация, МПК E06B 5/16: № 2017114097: заявл. 21.04.2017: опубл. 05.03.2018.

Мохирев А.П., Храмов И.В., Амельчугов С.П., Лях Н.И., Смирнов И.Ю. Устройство для испытания звукоизоляции древесных панелей // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 2. С. 71–81.

Попов К.Н., Кадцо М.Б. Строительные материалы и изделия: учебник. М.: Высш. шк., 2013. 372 с.

Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукоизолирующие материалы и конструкции // Вестник БГТУ. 2016. № 6. С. 76–79.

Сумбатян В.А., Боев Н.В. Об отражении звука от криволинейных поверхностей в акустике помещений // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020. Вып. 1. Ст. 2010602.

Храмов И.В., Мохирев А.П., Амельчугов С.П., Храмова К.Р. Совершенствование конструкции древесной панели для повышения звукоизоляции // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по мат. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 356–359.

Храмов И.В., Мохирев А.П., Лютоева Е.В. Результаты эксперимента звукового давления, проходящего через шумоизолационные древесные панели // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по мат. II Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2023. С. 396–400.

De Santis Yu., Aloisio A., Pasca D.P., Gavrić I., Fragiocomo M. Mechanical characterization of soundproofed inclined screws connections // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 412. Art. no. 134641.

Santi S., Pierobon F., Corradini G., Cavalli R., Zanetti M. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system // Journal of Wood Science. 2016. No. 62. P. 416–428.

Sil'man Yu.Yu., Ponomarev R.A. Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the issues posed by urbanisation // Problems of the economy and construction management in conditions of ecologically oriented development. Irkutsk, 2021. P. 327–333.

References

- Amelchugov S.P., Mokhirev A.P., Tarasov I.V., Khramov I.V.* Investigation of the sound impedance of a wooden panel. *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*, 2022, vol. 88, no. 11, pp. 27–31. (In Russ.)
- Birman A.R., Ugryumov S.A.* Plywood panel. Utility Model Patent No. 193354 U1 Russian Federation, IPC B27D 1/06: No. 2019118160; decl. 06/10/2019; publ. 10/25/2019. (In Russ.)
- Boytemirov F.A.* The prospects of using wood in high-rise buildings based on the conducted research. *BST: Bulletin of construction equipment*, 2021, no. 10 (1046), pp. 37–39. (In Russ.)
- De Santis Yu., Aloisio A., Pasca D.P., Gavrić I., Fragiocomoa M.* Mechanical characterization of soundproofed inclined screws connections. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 412, art. no. 134641.
- Khramov I.V., Mokhirev A.P., Amelchugov S.P., Khramova K.R.* Improving the design of a wood panel to increase sound insulation. *Current issues of construction: a look into the future: a collection of scientific articles based on the mat. of the All-Russ. sci.-pract. conf. dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Civil Engineering Institute*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 356–359. (In Russ.)
- Khramov I.V., Mokhirev A.P., Lyutoeva E.V.* Results of the experiment of sound pressure passing through sound-insulating wood panels. *Actual issues of construction: a look into the future: a collection of scientific articles based on the mat. of the II All-Russ. sci.-pract. conf.* Krasnoyarsk, 2023, pp. 396–400. (In Russ.)
- Kudryashov A.P., Leonhard D.K.* Soundproof door leaf. Utility model patent No. 177663 U1 Russian Federation, IPC E06B 5/16: No. 2017114097; decl. 04/21/2017; publ. 03/05/2018. (In Russ.)
- Mokhirev A.P., Khramov I.V., Amelchugov S.P., Lyakh N.I., Smirnov I.Yu.* Device for testing sound insulation of wood panels. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 71–81. (In Russ.)
- Popov K.N., Kadzo M.B.* Building materials and products: textbook. Moscow: Higher School, 2013. 372 p. (In Russ.)
- Radoutsky V.Yu., Shulzhenko V.N., Stepanova M.N.* Modern sound-absorbing materials and structures. *Bulletin of BSTU*, 2016, no. 6, pp. 76–79. (In Russ.)
- Santi S., Pierobon F., Corradini G., Cavalli R., Zanetti M.* Massive wood material for sustainable building design: the Massive-Holz-Mauer wall system. *Journal of Wood Science*, 2016, no. 62, pp. 416–428.
- Silman Yu. Yu., Ponomarev R. A.* Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the problems of urbanization // Problems of economics and construction management in an environmentally oriented development, April 14–15, 2020. Baikal State University, 2021, pp. 327–333.

Sumbatyan V.A., Boev N.V. On the reflection of sound from curved surfaces in room acoustics. Scientific Notes of the Faculty of Physics of Moscow University, 2020, iss. 1, art. no. 2010602. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.11.2024

Мохирев А.П., Храмов И.В., Гузоватова А.Д. Теоретическое обоснование акустических полостей в конструкции деревянных плит // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 390–402. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.390-402

В работе представлено исследование проектирования акустических характеристик звукоизоляционной деревянной панели. Растущая потребность в эффективных стратегиях контроля шума в различных областях применения, таких как деревянное домостроение, привела к разработке инновационных звукоизоляционных материалов. В этом исследовании изучается включение звукопоглощающих элементов в деревянные панели для повышения их звукоизоляционных свойств. В основе теоретического обоснования применения акустических полостей лежит принцип акустических резонаторов. При наличии объемных полостей в конструкции возникает возможность создания резонансных явлений, которые могут существенно влиять на уровень звукового давления и демпфирование звуковых волн. Резонирование, возникающее на определенных частотах, способствует снижению интенсивности звука, что позволяет улучшить акустические характеристики готовой конструкции. В процессе проектирования учитывается выбор звукопоглощающих элементов и их интеграция в конструкцию деревянных панелей. Различные звукопоглощающие материалы, такие как пористые поглотители, микроперфорированные панели и резонансные полости, оцениваются с точки зрения их коэффициентов звукопоглощения. Оптимальная конфигурация определяется посредством моделирования и экспериментальных измерений с использованием стандартизованных методов, определенных в ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций». Методика изготовления предполагает интеграцию звукопоглощающих элементов в конструкцию деревянной панели при сохранении ее структурной целостности. Разработанная звукоизоляционная деревянная панель предлагает универсальное решение для снижения шума, открывая новые возможности в проектах деревянного домостроения. Применение новых видов древесных плит позволит значительно улучшить технологию строительства и повысить уровень акустического комфорта. Для изучения снижения звукового давления использовались специальные шумоизоляционные древесные панели с внутренними конструктивными элементами в виде параболических полостей, которые способствуют поглощению звука. В данном исследовании изучается внедрение

элементов поглощения звука в деревянные панели для улучшения их шумозащитных свойств. Путем внедрения параболических выемок (или "звуковых карманов") в деревянную панель можно значительно улучшить её звукоизоляционные свойства. Данные конструктивные элементы, выполненные методом фрезерования, способствуют поглощению звука и снижению звукопроводимости панели. Параболические выемки отражают, поглощают и рассеивают звуковые волны, уменьшая переход звука через материал, что способствует снижению уровня шума и улучшению акустического комфорта в помещении, где установлена данная панель.

Ключевые слова: отражение звука, шумоизоляция, конструкция деревянной панели, акустическая полость, звуковая энергия.

Mokhirev A.P., Khramov I.V., Guzovatova A.D. Theoretical substantiation of acoustic cavities in the construction of wooden slabs. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 390–402 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.390-402

The paper presents a study of the design of acoustic characteristics of a soundproof wooden panel. The growing need for effective noise control strategies in various applications, such as wooden house construction, has led to the development of innovative sound insulation materials. This study examines the incorporation of sound-absorbing elements into wooden panels to enhance their sound insulation properties. The theoretical basis for the use of acoustic cavities is based on the principle of acoustic resonators. In the presence of volumetric cavities in the structure, it becomes possible to create resonant phenomena that can significantly affect the sound pressure level and damping of sound waves. Resonation occurring at certain frequencies helps to reduce the intensity of sound, which improves the acoustic characteristics of the finished structure. The design process takes into account the choice of sound-absorbing elements and their integration into the construction of wooden panels. Various sound-absorbing materials such as porous absorbers, microporated panels and resonant cavities are evaluated in terms of their sound absorption coefficients. The optimal configuration is determined by modeling and experimental measurements using standardized methods defined in GOST 27296-2012 «Buildings and structures. Methods for measuring the sound insulation of enclosing structures». The manufacturing technique involves the integration of sound-absorbing elements into the construction of a wooden panel while maintaining its structural integrity. The developed soundproof wooden panel offers a universal solution for noise reduction, opening up new opportunities in wooden house construction projects. The use of new types of wood slabs will significantly improve the construction technology and the level of acoustic comfort. To study the reduction of sound pressure, special sound-insulating wood panels with internal structural elements in the form of parabolic cavities that contribute to sound absorption were used. This study examines the introduction of sound absorption elements into wooden panels to

improve their noise protection properties. By introducing parabolic recesses (or «sound pockets») into a wooden panel, its sound insulation properties can be significantly improved. These structural elements, made by milling, contribute to sound absorption and reduce the sound conductivity of the panel. Parabolic recesses reflect, absorb and disperse sound waves, reducing the transition of sound through the material, which helps to reduce noise levels and improve acoustic comfort in the room where this panel is installed.

Keywords: sound reflection, sound insulation, wooden panel construction, acoustic cavity, sound energy.

МОХИРЕВ Александр Петрович – профессор, научный сотрудник Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета;

662544, ул. Победы, д. 42, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия;
профессор кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, доктор технических наук, доцент. Researcher ID: N-9961-2019. ORCID: 0000-0002-1692-3323.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

MOKHIREV Aleksandr P. – DSc (Technical), Professor, researcher at the Lesosibirsk Pedagogical Institute, a branch of the Siberian Federal University;

662544. Pobedy str. 42. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Territory. Russia;
Professor at the Department of Highways and Urban Structures of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University, Associate Professor. Researcher ID: N-9961-2019. ORCID: 0000-0002-1692-3323.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

ХРАМОВ Игорь Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики, экономики и естествознания Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета;

662544, ул. Победы, д. 42, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия;
инженер учебной лаборатории испытания строительных материалов и конструкций кафедры строительных конструкций и управляемых систем Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета. Researcher ID: AAA-3222-2022. ORCID: 0000-0003-4010-5707.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: ikhramov@sfu-kras.ru

KHRAMOV Igor V. – Senior Lecturer at the Department of Higher Mathematics, Economics and Natural Sciences of the Lesosibirsk Pedagogical Institute, a branch of the Siberian Federal University;

662544. Pobedy str. 42. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Territory. Russia;

Engineer at the educational Laboratory for Testing Building Materials and Structures of the Department of Building Structures and Controlled Systems of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University. Researcher ID: AAA-3222-2022. ORCID: 0000-0003-4010-5707.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: ikhramov@sfu-kras.ru

ГУЗОВАТОВА Анна Дмитриевна – студент Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета.

660041, Свободный пр., д. 82, стр. 1, г. Красноярск, Россия. E-mail: gusovatova@mail.ru

GUZOVATOVA Anna D. – Student of the Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University.

660041. Svobodny av. 82. Build. 1. Krasnoyarsk. Russia. E-mail: gusovatova@mail.ru