

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-11-27-31>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ИМПЕДАНСА ДЕРЕВЯННОЙ ПАНЕЛИ

© **Сергей Петрович Амелчугов, Александр Петрович Мохирев*,
Игорь Владимирович Тарасов, Игорь Владимирович Храмов**

Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82;

*e-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

*Статья поступила 17 мая 2022 г. Поступила после доработки 8 июня 2022 г.
Принята к публикации 8 августа 2022 г.*

Проектирование и производство эффективных звукопоглощающих материалов — важное направление в строительной индустрии. В работе представлены результаты исследования особенностей звукопоглощающих свойств строительных конструкций — деревянных панелей, изготовленных по CLT-технологии. Звукоизоляция и звукопоглощение CLT-панелей основаны на звуковом сопротивлении. Звуковое давление оказывает фронтальная волна. Данные обрабатывали с использованием преобразования Лапласа, разложение звука на спектральные компоненты осуществляли при помощи преобразования Фурье. Исследовали деревянные CLT-панели ячеистой структуры с определенными геометрическими параметрами. Выявлено, что акустический импеданс композитной звукопоглощающей CLT-панели выше, чем массивной панели CLT. Кроме того, отмечено отличие звукового сопротивления при противоположном направлении прохождения звука относительно внутренних параболических полостей. Установлено, что внутренние полости выступают резонаторами мгновенного действия, а ограждающие элементы CLT-конструкции (стены, перекрытия) могут кратно снижать уровень шума. Поэтому единичную полость («звуковой карман»), образованную параболоидом и плоскостью ламели древесины, можно рассматривать как модуль или элемент звукопоглощения. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании звукопоглощающих материалов с применением композитных звукопоглощающих CLT-панелей и модульного проектирования.

Ключевые слова: звукопоглощение; звукоизоляция; акустический импеданс; CLT-панель; деревянная панель.

STUDY OF THE SOUND IMPEDANCE OF A WOODEN PANEL

© **Sergey P. Amelchugov, Aleksandr P. Mokhirev*,
Igor V. Tarasov, Igor V. Khramov**

Siberian Federal University, 82, pr. Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia; *e-mail: amokhirev@sfu-kras.ru

Received May 17, 2022. Revised June 8, 2022. Accepted August 8, 2022.

The development and production of effective sound-absorbing materials is an important direction in the construction industry. The results of studying features of the sound-absorbing properties of building structures, i. e., wooden panels, manufactured using CLT technology are presented. Sound insulation and sound absorption of CLT panels are based on the sound resistance. The sound pressure is formed by a frontal wave. The data were processed using the Laplace transform, the decomposition of sound into spectral components was carried out using the Fourier transform. Studies of wooden CLT panels with a cellular structure and given geometric parameters revealed that the acoustic impedance of the composite sound-absorbing CLT panel is higher than that of the massive CLT panel. Moreover, there is a difference in the sound resistance in the opposite direction of sound passage relative to the internal parabolic cavities. It is shown that the internal cavities act as instant resonators, whereas the enclosing elements of the CLT structure (walls, ceilings) with internal parabolic cavities can reduce the noise level by several times. Consequently, a single cavity ("sound pocket") formed by a paraboloid and a plane of a wooden lamella can

be considered a module or an element of sound absorption. The results obtained can be used in the design of sound-absorbing materials using CLT composite sound-absorbing panels and modular design.

Keywords: sound absorption; sound insulation; acoustic impedance; CLT-panel; wooden panel.

Введение

Для повышения комфортности и качества жизни необходимо снижать уровень воздействия шума на человека. Проектирование и производство эффективных звукопоглощающих материалов — важное направление в строительной индустрии [1 – 4].

Звукопоглощающие материалы должны хорошо поглощать звуковые волны и обладать стабильными физико-механическими свойствами [5 – 8]. Звукопоглощающие конструкции и материалы широко применяют в различных областях промышленности при эксплуатации разнообразных машин и механизмов [9 – 13].

Существующая классификация звукопоглощающих акустических материалов (по эффективности, жесткости, структуре и возгораемости) отражает их основные особенности [14, 15]. Отметим, что наиболее значим структурный признак (прежде всего для пористо-волокнистых, пористо-ячеистых и пористо-губчатых материалов), так как характер и объем пористости могут оказывать существенное влияние на уровень и характер шумового воздействия.

Для различных конструкций и узлов достаточность звукоизоляции зачастую зависит от толщины конструкции, свойств композитных материалов. Характеристики звукоизоляции принимаются по результатам натурных испытаний на данную конструкцию. Однако несовершенство расчетных методов оценки звука значительно снижает качество принимаемых проектных решений и приводит либо к перерасходу строительных материалов, либо некачественной звукоизоляции.

Принято, что акустическое давление связано с амплитудой волны, ее циклической частотой, скоростью распространения в веществе и плотностью материалов строительной конструкции. Интенсивность плоской синусоидальной волны I связана с акустическим давлением следующей зависимостью:

$$I = \frac{P_a^2}{2\rho c}, \quad (1)$$

где P_a — звуковое давление; ρ — плотность невозмущенной среды; c — скорость звука в материале конструкции.

Произведение ρc называется удельным волновым (или акустическим) сопротивлением среды и характеризует рассеяние энергии волны в акустическом поле.

Древесина по своим физико-механическим свойствам — пористый материал, поэтому ее часто используют в конструировании звукопоглощающих материалов. Вместе с тем достичь большего уровня звукопоглощения можно, применяя не только сборные конструкции (слоистые и др.), но также и за счет формы и размеров пор, угла их расположения [9].

CLT-панели — композитный материал, изготовленный из деревянных, склеенных и спрессованных между собой панелей, сложенных крест-накрест относительно друг друга в ряды. Панели характеризуются следующими преимуществами: экологичностью, эстетической привлекательностью, прочностью, высокой огнестойкостью, долговечностью, быстрым монтажом, низкой теплопроводностью, высокой теплоемкостью, низким весом и отсутствием усадки. Кроме того, CLT-панели универсальны: их можно использовать для стен, перекрытий, крыш, сочетать с любыми видами наружной и внутренней отделки.

Цель работы — исследование звукопоглощающих свойств внутреннего слоя CLT-панели.

Материалы, методика

Исследовали деревянные панели ячеистой структуры с определенными геометрическими параметрами, изготовленные по CLT-технологии.

Звукоизоляция и звукопоглощение CLT-панелей основаны на звуковом сопротивлении. При этом звуковое давление оказывает фронтальная волна. Считается, что важнейшая с точки зрения звукового комфорта область слышимости человека находится в третьоктавных полосах частот в диапазоне 100 – 3150 Гц.

Акустический импеданс — комплексное сопротивление, которое вводится при рассмотрении колебаний акустических систем, — представляет собой отношение комплексных амплитуд звукового давления и объемной колебательной скорости частиц среды. В общем случае акустический импеданс выражается формулой

$$Z_a = R_a + iX_a, \quad (2)$$

где $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; R_a — акустическое сопротивление; X_a — акустическое реактивное сопротивление.

Заметим, что действительная часть уравнения (2) связана с диссипацией энергии в самой системе и с поглощением энергии звука, а знак «—» в мнимой части акустического импеданса ме-

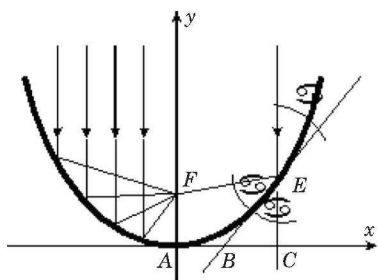


Рис. 1. Схема отражения звука в параболической полости: F , A — фокус и вершина параболы; FE — фокальный радиус; BE — касательная к параболе в точке E ; AC — проекция фокального радиуса

Fig. 1. Sound reflection in a parabolic cavity: F , A — focus and vertex of the parabola; FE — focal radius; BE — tangent to the parabola at point E ; AC — projection of the focal radius

няет направление реактивной звуковой волны на обратное. Поэтому очевидно, что предпочтительнее строительная конструкция, в которой акустическое реактивное сопротивление равно акустическому сопротивлению:

$$R_a = -iX_a. \quad (3)$$

Таким образом, практическое звукопоглощение строительными конструкциями состоит в расчете характеристик внутренних параболических полостей (рис. 1).

Обсуждение результатов

Установили, что ограждающие элементы CLT-конструкции (стены, перекрытия) с внутренними параболическими полостями могуткратно снижать уровень шума.

Приняли следующие допущения: звуковые колебания — негармонический сигнал, спектр колебаний составляет 100 – 3150 Гц, импеданс зависит от частоты, параметры конструкции не меняются со временем.

Звук раскладывали на спектральные компоненты при помощи преобразования Фурье, далее рассматривали воздействие каждой спектральной компоненты. Сумма откликов на спектральные компоненты равнялась отклику на исходный негармонический сигнал.

Источник звука $f_{in}(t)$ предварительно преобразовывали в комплексное представление $F(s)$, используя прямое преобразование Лапласа:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f_{in}(t) e^{-st} dt, \quad (4)$$

где s , t — комплексная и вещественная переменные.

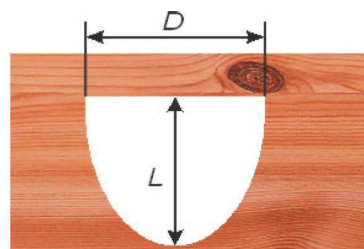


Рис. 2. Схема «звукового кармана» CLT-панели

Fig. 2. Diagram of a “sound pocket” of CLT-panel

Комплексное звуковое сопротивление конструкции через преобразованное комплексное представление источника звука и комплексную передаточную функцию строительной конструкции $H(s)$ выражается следующим образом:

$$F_{t,H}(s) = H(s)F_l(s). \quad (5)$$

Для CLT-конструкции величина R_a из уравнения (2) для негармонического звука соответствует звуковому сопротивлению и может быть вычислена экспериментально по звуковому давлению.

Акустическое реактивное сопротивление X_a зависит от звуковой частоты ω и параметра C — свойств внутренних полостей конструкции резонаторов (геометрических размеров, плотности материала, чистоты обработки поверхностей, коэффициента звукопоглощения строительного материала). Его находили по формуле

$$X_a = -i/(\omega C). \quad (6)$$

При этом

$$C = f(l, d, \rho, \alpha), \quad (7)$$

где l , d , ρ , α — вещественные числа (l — глубина обработки полости; d — диаметр полостей; ρ — плотность материала; $\alpha = E_{\text{погл}}/E_{\text{пад}}$ — коэффициент звукопоглощения строительного материала).

Физические свойства входящих в (7) величин можно определить стандартными методами испытаний.

Поскольку внутренние полости — резонаторы мгновенного действия, это подразумевает совершение одного периода колебания за время, не превышающее период колебания источника звука.

На рис. 2 приведена схема «звукового кармана» CLT-панели, из которой следует, что полость образована параболомидом и плоскостью ламели древесины.

Единичную полость резонатора CLT-панели («звуковой карман») можно рассматривать как

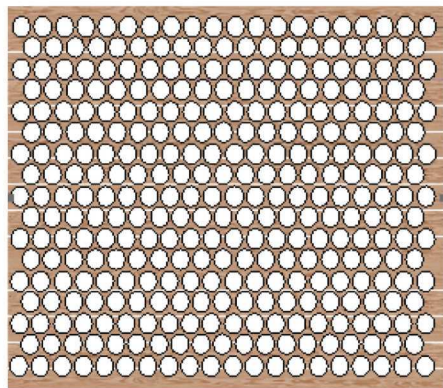


Рис. 3. Звукопоглощающая CLT-панель нового поколения

Fig. 3. The sound-absorbing CLT-panel of the new generation

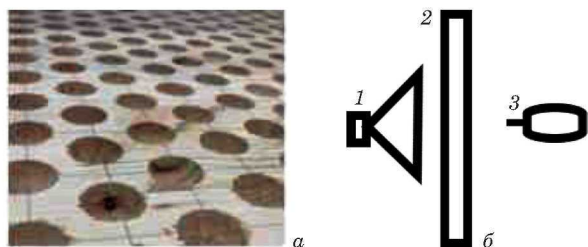


Рис. 4. Внутренняя ламель с параболическими полостями (а) и схема эксперимента (б) (1 — тоногенератор, 2 — исследуемая панель, 3 — шумомер)

Fig. 4. The internal lamella with parabolic cavities (а) and a scheme of the experiment (b) (1 — tone-generator, 2 — panel under study, 3 — sound level meter)

модуль или элемент звукопоглощения. Это позволяет планировать и рассчитывать звукозащиту из CLT-панелей с учетом модульного проектирования и снижать уровень шума до допустимых пределов.

Общее решение состоит в том, что на средней (наиболее ненагруженной) плите (ламели) панели располагают симметричные полости, выполненные фрезой параболической формы. Размеры полостей зависят от толщины плиты CLT-панели (рис. 3).

Для испытаний по проверке предложенного способа улучшения звукопоглощения во внутреннем слое панели CLT выполнили параболические полости ($D = L = 35$ мм). К центральной части панели с наружной стороны установили генератор звуковых волн, с внутренней стороны — интегральный шумомер (рис. 4). Сравнивали величины звукового давления для звукопоглощающей панели и массивной панели того же размера. Исследования звукопоглощающей панели проводили, меняя тоногенератор и шумомер местами.

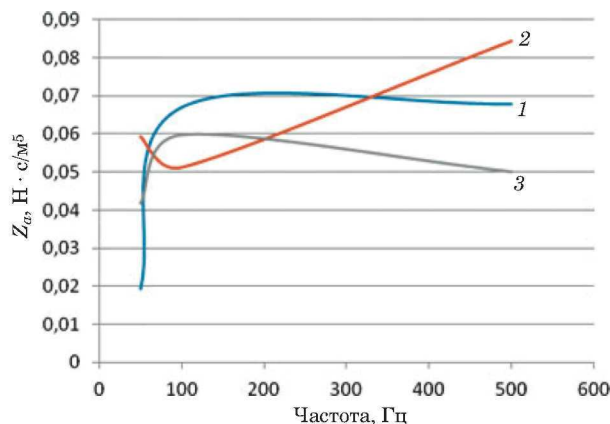


Рис. 5. Частотные зависимости звукового импеданса для звукопоглощающей CLT-панели (1 — к источнику, 2 — от источника) и массивной панели CLT (3)

Fig. 5. Frequency dependences of the sound impedance for the sound-absorbing CLT panel (1 — to the source, 2 — from the source) and the massive CLT panel (3)

Испытания ячеистой структуры с определенными геометрическими параметрами выявили отличие звукового сопротивления при прохождении звука относительно направления внутренних параболических полостей CLT-панели с внутренней и внешней сторон. Установили, что ограждающие элементы CLT-конструкции (стены, перекрытия) с внутренними параболическими полостями ($D = L = 35$ мм)кратно снижают уровень шума.

На рис. 5 приведены частотные зависимости акустического импеданса. Видно, что в случае звукопоглощающей CLT-панели значения импеданса выше, чем для массивной панели CLT. Кроме того, установили, что наибольшая разница в звуковом давлении наблюдается в диапазоне частот более 300 Гц.

Закключение

Проведенные испытания показали, что акустический импеданс звукопоглощающей CLT-панели выше, чем массивной панели CLT. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании звукопоглощающих материалов с применением композитных звукопоглощающих CLT-панелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнова Е. В., Васюткина Д. И. Результаты сравнительного анализа акустических свойств строительных материалов / Вестник БГТУ. 2013. № 1. С. 26 – 29.
2. Цукерников И. Е., Шубин И. Л., Невенчанная Т. О. Проектирование защиты от производственного шума / Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1751415.

3. Окунева Г. А., Радоуцкий В. Ю., Шаптала В. Г. Исследование звукоизолирующих свойств строительных материалов и конструкций на основе пеностекла / Вестник БГТУ. 2008. № 4. С. 45 – 48.
4. Косов И. И. Деревянные панели CLT в строительстве общественных зданий / Интеграл. 2019. № 2-1. С. 4 – 19.
5. Федюк Р. С., Баранов А. В., Тимохин Р. А., Свинцов А. П. Методы определения характеристик звукопоглощения строительных материалов и звукоизоляции конструкций (обзор) / Вестник Инженерной школы ДФУ. 2020. № 4(45). С. 125 – 139. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-13
6. Федотов Е. С., Кустов О. Ю. Исследование влияния вида акустического сигнала на определение импеданса образцов звукопоглощающих конструкций / Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2017. Т. 1. С. 280 – 283.
7. Черемных Н. Н. Особенности расчета акустической эффективности звукопоглощения в деревообработке / Леса России и хозяйство в них. 2013. № 1(44). С. 188 – 190.
8. Аношкин А. Н., Захаров А. Г., Городкова Н. А., Чурсин В. А. Расчетно-экспериментальные исследования резонансных многослойных звукопоглощающих конструкций / Вестник ПНИПУ. 2015. № 1. С. 5 – 20. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.01
9. Inzhutov I., Melnikov P., Amelchugov S., et al. Investigation of Acoustic Impedance of a New Floor Panel / XIII International Scientific Conference Architecture and Construction. — Bristol: IOP, 2020. P. 012002 [in Russian]. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012002
10. Madrigal-Melchor J., Enciso-Muñoz A., Contreras-Solorio D., Saldaña-Saldaña X., Reyes-Villagrana R. A New Alternative Method for the Generation of Acoustic Filters, Modulating Acoustic Impedance: Theoretical Model / Open Journal of Acoustics. 2017. N 7. P. 39 – 51. DOI: 10.4236/oja.2017.73005
11. Suardana N., Sugita I., Wardana I. Hybrid acoustic panel: the effect of fiber volume fraction and panel thickness / Materials Physics and Mechanics. 2020. Vol. 44. N 1. P. 77 – 82. DOI: 10.18720/MPM.4412020_9
12. Abdulaziz A., Hedaya M., Elsabbagh A., et al. Acoustic emission source location in composite-honeycomb sandwich panel / International Journal of Renewable Energy Research. 2021. Vol. 11. N 2. P. 851 – 860.
13. Bykov A., Komkin A., Moskalenko V. Measurements of acoustic flow parameters in the orifice on non-linear regimes / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Moscow: Institute of Physics, 2019. P. 012015 [in Russian]. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012015
14. Захаров А. Г., Аношкин А. Н., Паньков А. А., Писарев П. В. Акустические резонансные характеристики двух- и трехслойных сотовых звукопоглощающих панелей / Вестник ПНИПУ. 2016. № 46. С. 144 – 159. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.08
15. Радоуцкий В. Ю., Шульженко В. Н., Степанова М. Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции / Вестник БГТУ. 2016. № 6. С. 76 – 79.
2. Tsukernikov I. E., Shubin I. L., Nevenchannaya T. O. Designing protection against industrial noise / Uch. Zap. Fiz. Fak. Mosk. Univ. 2017. N 5. P. 1751415 [in Russian].
3. Okuneva G. A., Radoutsky V. Yu., Shaptala V. G. Study of sound-insulating properties of building materials and structures based on foam glass / Vestn. BG TU. 2008. N 4. P. 45 – 48 [in Russian].
4. Kosov I. I. Wooden panels CLT in the construction of public buildings / Integral. 2019. N 2-1. P. 4 – 19 [in Russian].
5. Fedjuk R. S., Baranov A. V., Timokhin R. A., Svin-tsov A. P. Methods for determining the characteristics of sound absorption of building materials and sound insulation of structures (review) / Vestn. Inzh. Shkoly DFU. 2020. N 4(45). P. 125 – 139 [in Russian]. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-13
6. Fedotov E. S., Kustov O. Yu. Investigation of the influence of the type of acoustic signal on the determination of the impedance of samples of sound-absorbing structures / Aërokosm. Tekhn. Vys. Tekhnol. Innov. 2017. Vol. 1. P. 280 – 283 [in Russian].
7. Cheremnykh N. N. Features of calculation of acoustic efficiency of sound absorption in woodworking / Lesa Rossii Khoz. Nikh. 2013. N 1(44). P. 188 – 190 [in Russian].
8. Anoshkin A. N., Zakharov A. G., Gorodkova N. A., Chursin V. A. Computational and experimental studies of resonant multilayer sound-absorbing structures / Vestn. PNIPU. 2015. N 1. P. 5 – 20 [in Russian]. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.01
9. Inzhutov I., Melnikov P., Amelchugov S., et al. Investigation of Acoustic Impedance of a New Floor Panel / XIII International Scientific Conference Architecture and Construction. — Bristol: IOP, 2020. P. 012002 [in Russian]. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012002
10. Madrigal-Melchor J., Enciso-Muñoz A., Contreras-Solorio D., Saldaña-Saldaña X., Reyes-Villagrana R. A New Alternative Method for the Generation of Acoustic Filters, Modulating Acoustic Impedance: Theoretical Model / Open Journal of Acoustics. 2017. N 7. P. 39 – 51. DOI: 10.4236/oja.2017.73005
11. Suardana N., Sugita I., Wardana I. Hybrid acoustic panel: the effect of fiber volume fraction and panel thickness / Materials Physics and Mechanics. 2020. Vol. 44. N 1. P. 77 – 82. DOI: 10.18720/MPM.4412020_9
12. Abdulaziz A., Hedaya M., Elsabbagh A., et al. Acoustic emission source location in composite-honeycomb sandwich panel / International Journal of Renewable Energy Research. 2021. Vol. 11. N 2. P. 851 – 860.
13. Bykov A., Komkin A., Moskalenko V. Measurements of acoustic flow parameters in the orifice on non-linear regimes / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Moscow: Institute of Physics, 2019. P. 012015 [in Russian]. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012015
14. Zakharov A. G., Anoshkin A. N., Pankov A. A., Pisarev P. V. Acoustic resonance characteristics of two- and three-layer cellular sound-absorbing panels / Vestn. PNIPU. 2016. N 46. P. 144 – 159. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.08 [in Russian].
15. Radoutsky V. Yu., Shulzhenko V. N., Stepanova M. N. Modern sound-absorbing materials and structures / Vestn. BGTU. 2016. N 6. P. 76 – 79 [in Russian].

REFERENCES