

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21

Исследование параметров звуко- и теплоизоляции для различных вариантов ограждающих конструкций из CLT-панелей

А.Д. Рытов, А.А. Титунин

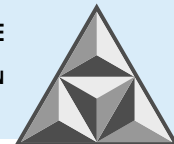
Антон Дмитриевич Рытов¹, Андрей Александрович Титунин^{1,2*}

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация

antonrytov@yandex.ru

²Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

*a_titunin@ksgos.ru**



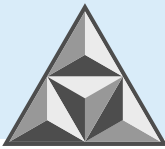
Для различных вариантов конструктивного исполнения наружных и внутренних стен из CLT-панелей исследованы параметры звукопоглощения и теплопроводности. При оценке эффективности применения звукопоглощающих материалов использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать процесс распространения звука через многослойную ограждающую конструкцию. Предложено использовать CLT-панели с внутренними слоями из тепло- и звукоизолирующих материалов, обеспечивающих высокий уровень заводской готовности конструкций. Изучена звукопоглощающая способность конструкций со вставками из минеральной ваты и вспененных полимеров. Рассмотрены варианты расположения вставок внутри CLT-панелей и описана их работа при различных частотах звука. Для условий Костромской области расчетным методом определены показатели теплопроводности ограждающих конструкций, основным элементом которых являются пяти- и семислойные деревянные панели. При этом в семислойных панелях толщиной 224 мм теплоизоляционный слой минеральной ваты должен составлять не менее 100 мм.

Ключевые слова: CLT-панели, деревянное домостроение, звукоизоляция, звукопроводность, теплопроводность

Для цитирования:

Рытов А.Д., Титунин А.А. Исследование параметров звуко- и теплоизоляции для различных вариантов ограждающих конструкций из CLT-панелей // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 8-21. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21

Investigation of sound and heat insulation parameters for different variants of CLT-panel enclosure structures

A.D. Rytov, A.A. Titunin

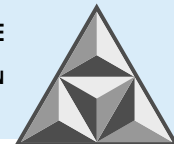
Anton Dmitrevich Rytov¹, Andrey Aleksandrovich Titunin^{1,2*}

¹Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

antonrytov@yandex.ru,

²Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation

*a_titunin@kosgos.ru**



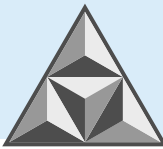
Sound absorption and thermal conductivity parameters were investigated for different variants of structural design of external and internal walls made of CLT-panels. The authors used the COMSOL Multiphysics software package to evaluate the effectiveness of sound-absorbing materials. It allows modelling the process of sound spreading through a multilayer enclosing structure. The authors recommend using CLT-panels with inner layers of heat- and sound-insulating materials. Such panels provide a high level of factory readiness of structures. The authors studied the sound absorption capacity of structures with mineral wool and polymer foam inserts. The paper considers variations in the arrangement of inserts within CLT-panels and describes their performance at different sound frequencies. The authors have determined the heat conductivity indices of the enclosing structures for the conditions of the Kostroma region by the calculation method. The main element of the structures are five- and seven-layer wooden panels. In this case, the heat insulation layer of mineral wool should be at least 100 mm in seven-layer panels with a thickness of 224 mm.

Keywords: CLT-panels, wooden house building, sound insulation, sound conductivity, thermal conductivity

For citation:

Rytov A.D., Titunin A.A. Investigation of sound and heat insulation parameters for different variants of CLT-panel enclosure structures // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 8-21.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21



ВВЕДЕНИЕ

Деревянное домостроение в начале 20-х годов XXI века получило дополнительный импульс к развитию в России благодаря совместным усилиям проектировщиков, конструкторов, разработчиков нормативной документации и принятию на федеральном уровне ряда стратегических документов, согласно которым стало возможным строительство многоэтажных деревянных зданий [1]. Многие эксперты связывают рост объемов ввода промышленных и гражданских зданий из древесины с появлением на рынке инновационных для России строительных конструкций – CLT-панелей (от англ. *Cross-Laminated Timber* – «перекрестно-клееная древесина») и LVL-бруса (от англ. *Laminated Veneer Lumber* – «пиломатериал из слоеного шпона»). Строительные материалы из древесины в большей мере, чем бетон, керамический кирпич и железобетон, отвечают критериям энергоэффективности зданий и «зеленых технологий» [2-5]. Однако существуют причины, сдерживающие рост объемов использования современных конструкций из древесины в жилищном строительстве [6].

Одной из причин низкого спроса на квартиры в многоэтажных домах из CLT-панелей называют относительно высокую стоимость жилья – от 80 тыс. руб. за 1 м² [7]. Такая цена 1 м² жилого фонда обусловлена высокой стоимостью самих панелей, затратами на обеспечение требований пожарной безопасности и устройство шумо- и теплоизоляции наружных и внутренних стен, а также междуэтажных перекрытий.

По показателям теплопроводности древесина относится к высокоэффективным материалам (коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.102$ до 0.180 Вт·м⁻¹·К⁻¹) [8], но звук она проводит достаточно хорошо [9].

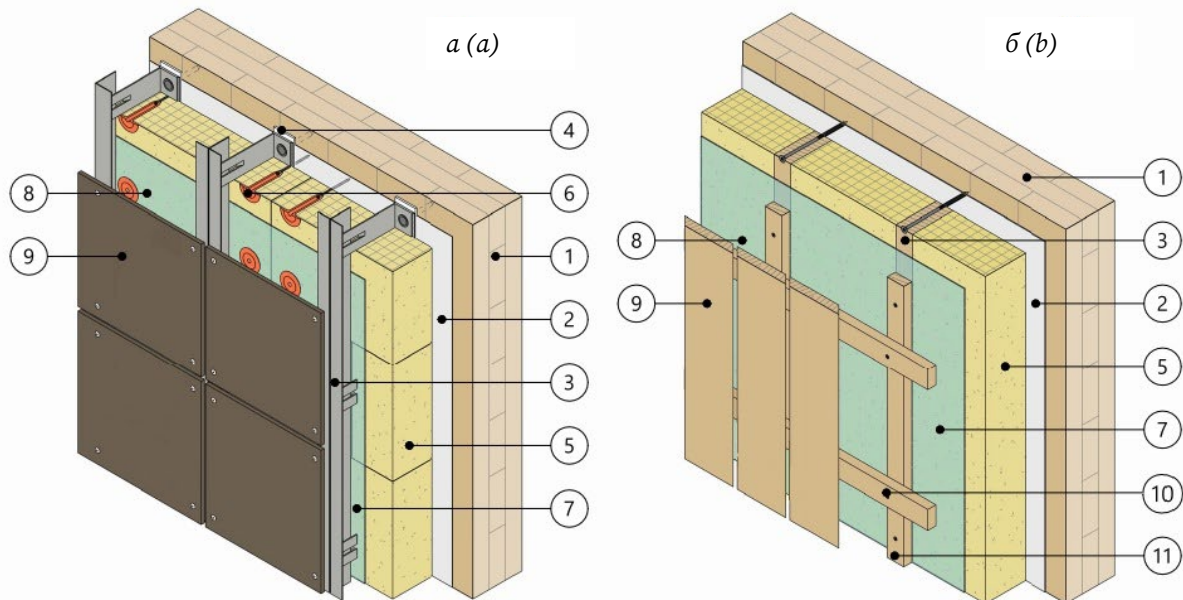
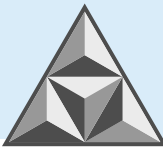


Рис. 1. Конструкция наружной стены: *a* – с навесным вентилируемым фасадом; *b* – с каркасно-обшивным фасадом и вентзазором; 1 – базовая стена из CLT-панели; 2 – пароизоляция; 3 – несущие элементы каркаса; 4 – теплоизоляционная прокладка; 5 – теплоизоляционный слой; 6 – телескопический дюбель с саморезом; 7 – гидроветрозащита; 8 – воздушный зазор; 9 – наружная облицовка; 10 – контробрешетка; 11 – обрешетка

Fig. 1. Exterior wall construction: *a* – with a hinged ventilated facade; *b* – with a frame-sheathed facade and vent; 1 – base wall made of CLT panel; 2 – vapor barrier; 3 – supporting frame elements; 4 – thermal insulation gasket; 5 – thermal insulation layer; 6 – telescopic dowel with self-tapping screw; 7 – hydraulic protection; 8 – air gap; 9 – exterior cladding; 10 – counter-grille; 11 – lattice



Поэтому одной из задач проектировщиков является разработка эффективных решений по обеспечению шумоизоляции жилых помещений [10, 11]. Как правило, устройство тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций выполняется после возведения каркаса здания и сопровождается значительными трудозатратами. В качестве примера на рис. 1, 2 приведены возможные варианты устройства наружных (рис. 1) и внутренних стен из CLT-панелей (рис. 2).

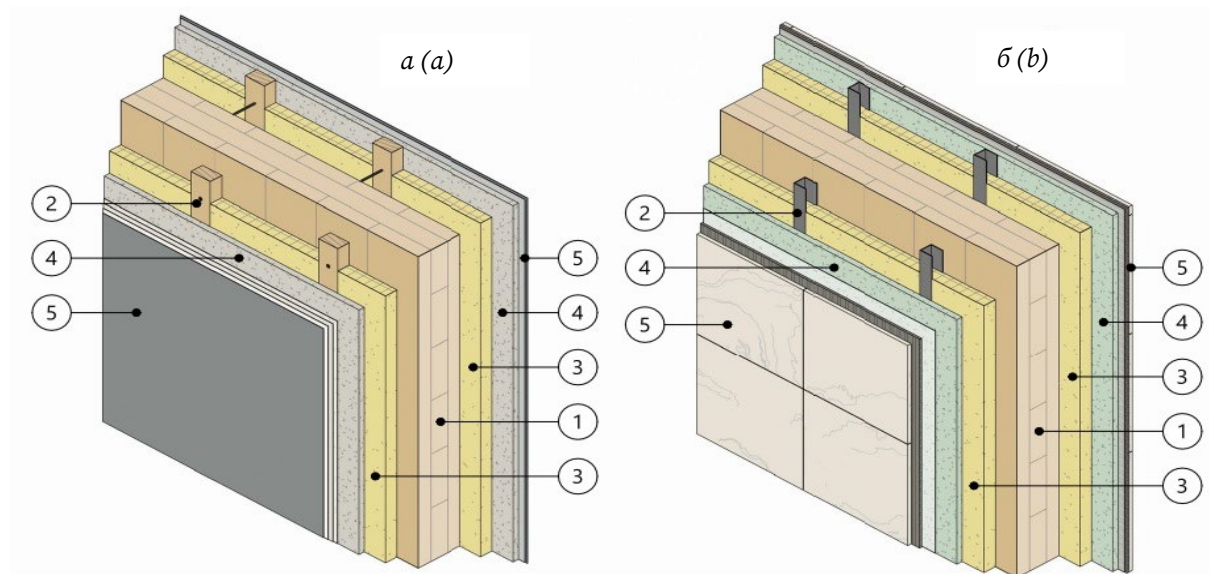
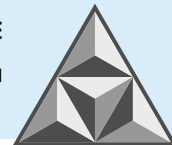


Рис. 2. Конструкция внутренней стены (перегородки): *а* – с обшивкой по деревянному каркасу; *б* – для использования в помещениях с влажным режимом; 1 – базовая стена из CLT-панели; 2 – деревянный (*а*) или металлический (*б*) каркас; 3 – тепло-звукоизоляционный материал; 4 – обшивка из листовых материалов; 5 – отделочные слои

Fig. 2. Construction of an internal wall (partition): *a* – with a wooden frame lining; *b* – for use in wet rooms; 1 – base wall made of CLT panels; 2 – wooden (*a*) or metal (*b*) frame; 3 – heat and sound insulation material; 4 – cladding made of sheet materials; 5 – finishing layers

Чтобы эффективно устранить посторонние звуки в помещении, необходимо качественно отделить одно пространство от другого. Это «базовое» утверждение не всегда выполняется в условиях современной жилой застройки. С одной стороны, высокая конкуренция заставляет застройщика снижать затраты на возведение жилья и предлагает минимальные условия акустического комфорта, а с другой стороны – сам владелец, ввиду высокой стоимости шумоизолирующих материалов, неохотно организует улучшение жилищных условий. При этом соседи нередко нарушают покой владельца, и шум, при определенных параметрах, негативно влияет на психику и состояние здоровья человека [12]. Выход из сложившейся ситуации – предложить рынку встроенную шумоизоляцию, которая позволит снизить итоговую стоимость 1м² жилья.

В настоящем исследовании авторы рассматривают новые варианты конструктивного исполнения стен, перегородок и перекрытий, отличающиеся от стандартных решений тем, что тепло- и шумоизоляционный материал предлагается располагать в слоях CLT-панелей. Такой конструктивный подход, предложенный учеными из Португалии [10], позволяет не только повысить сопротивление теплопередаче панелей и уменьшить распространение ударного шума, но и обеспечивает необходимую степень заводской готовности строительных конструкций, что в итоге приводит к снижению стоимости работ. В работах португальских, российских [11] и итальянских исследователей [12], а также ученых других стран отмечается, что при проектировании многослойных систем пока не существует единой методики, позволяющей с необходимой точностью описать процесс тепломассопереноса в конструкции



и одновременно прогнозировать конкретные показатели шумоизоляции, особенно в интервале низких частот. При этом ученые сходятся во мнении, что конечно-элементные методы более пригодны для моделирования процессов распространения тепла и звука в многослойных конструкциях из неоднородных материалов, чем поиск иных методических решений.

При использовании тепло- и шумоизолирующих вставок внутри CLT-панелей возникает задача по определению оптимального расположения этих вставок во внутренних слоях конструкции, а также их размеров, существенно не снижающих прочностные свойства панелей. Также требуется оценить эффективность предлагаемого варианта устройства тепло- и шумоизоляции по сравнению с теми, которые используются в российской практике индустриального строительства деревянных зданий (см. рис. 1) и выполняются на строительной площадке. Для решения указанных задач авторами проведены исследования с использованием метода моделирования звукопроводности панелей в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе первого этапа экспериментальных исследований выполнен анализ влияния вида материала и расположения звукоизолирующих вставок на параметры шумоподавления внутренних перегородок из CLT-панелей.

С учетом ранее проведенных опытов [13] и в соответствии с технической документацией программного обеспечения *COMSOL Multiphysics* [14], созданы виртуальные модели ограждающих конструкций (аналог CLT-панелей) со вставками из тепло- и звукоизолирующих материалов. Рассмотрены пять вариантов расположения вставок внутри семислойной панели.

Материалы вставок подбирали не только исходя из соображений снижения звукопроводности, но и с учетом влияния на теплопроводность деревянной панели. Схемы расположения вставок представлены на рис. 3, а их конструктивные особенности и виды изоляционных материалов (минеральная вата, пенопласт, пенополистирол, армированный целлюлозными волокнами гипс) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Варианты звукоизоляции стен из CLT-панелей

Table 1. Options for soundproofing walls made of CLT-panels

Номер варианта	Материал вставок				Количество слоев звукоизоляции	Слои, где располагаются вставки	Толщина каждого слоя, мм
	минеральная вата	пенопласт (EPS)	пенополистирол (XPS)	минеральная вата и гипсоволокнистый лист			
1	+	+	+	+	5	2-6	32
2	+	+	+	+	5	2-6	32
3	+	+	+	-	1	4	32
4	+	+	+	-	2	4	16
5	+	+	+	-	1	4	32

В первом варианте вертикальные и горизонтальные ряды вставок шириной, равной ширине деревянных ламелей, располагаются без смещения и образуют воздушные полости, которые проходят через пять внутренних слоев панели. Во втором варианте вставки в вертикальном и горизонтальном положении расположены друг к другу со смещением.

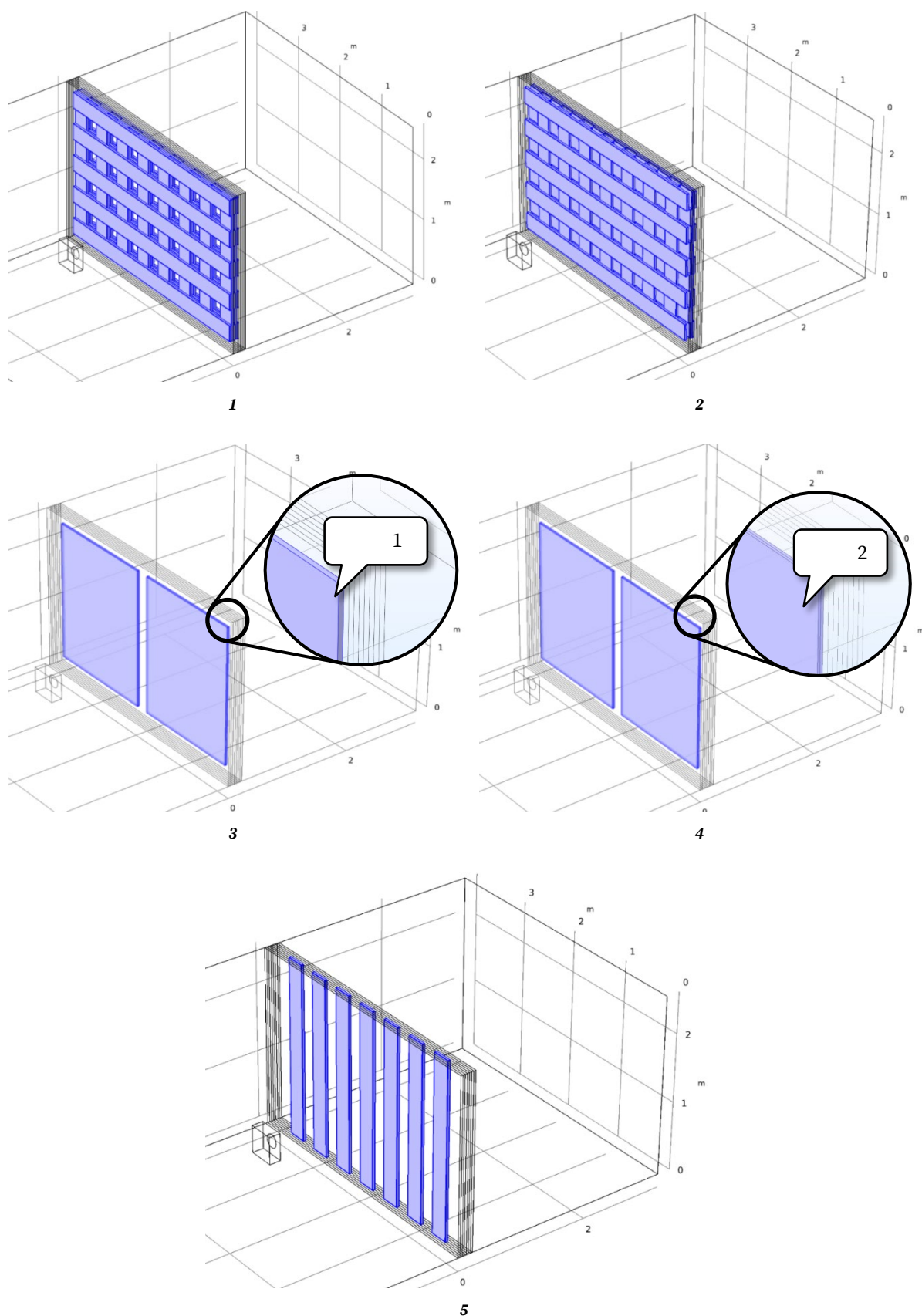
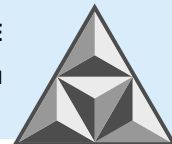
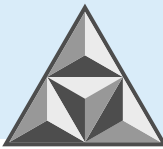


Рис. 3. Варианты расположения звукоизолирующих вставок в CLT-панелях: 1 – первый вариант; 2 – второй вариант; 3 – третий вариант; 4 – четвертый вариант; 5 – пятый вариант
Fig. 3. Variants of sound-proofing inserts in CLT-panels: 1 – first variant; 2 – second variant; 3 – third variant; 4 – fourth variant; 5 – fifth variant



В варианте 3 вставки в виде листовых материалов расположены в четвертом центральном слое CLT-панели. В варианте 4 в центральном слое расположены две вставки толщиной по 16 мм с воздушным зазором между ними. В варианте 5 использовали только вертикальные вставки, расположенные в центральном слое CLT-панели.

С целью определения параметра звукопоглощения для испытуемой конструкции нами выбран мультифизический интерфейс взаимодействия акустики с твердым телом в частотной области – «Acoustic-Solid Interaction, Frequency Domain». Чтобы технически грамотно построить виртуальные модели, необходимо обеспечить корректное мультифизическое взаимодействие между газообразной средой и твердыми (либо полутвердыми) материалами, применяемыми на практике.

Так, для варианта 4 внутри деревянной панели создавали воздушный промежуток, по аналогии с настройкой работы между воздушной средой помещения и твердой поверхностью CLT-панели. Постановка расчетных моделей осуществлялась по схеме двух реверберационных камер. Размеры каждой камеры составляли 4.0×3.0×2.6 м. Источником шума по выбранной схеме выступал условный диффузор диаметром 0.19 м с назначенным типичным ускорением 100 м·с⁻². Диффузор располагали на «закрытом деревянном ящике», имеющем размеры 0.36×0.16×0.39 м. Резонатор размещали параллельно исследуемой конструкции, на некотором расстоянии от нее.

В общем случае для всех моделей реализовали «частотный расчет», представляющий собой решение уравнения Гельмгольца относительно акустического давления:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m; \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b; \quad (2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ_c – плотность (постоянная величина) (кг·м⁻³);

p_t – общее давление (Па);

q_d – источник в дипольной области (Н·м⁻³);

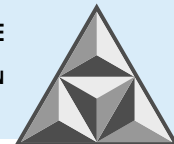
k_{eq} – эквивалентное волновое число (м⁻¹);

Q_m – источник в монопольной области (с⁻²); p – давление (Па);

p_b – фоновое давление (Па); c_c – скорость звука (м·с⁻¹); ω – частота (Гц).

На данном этапе в эксперименте с моделями конструкций фигурировали частоты: 31.5; 63; 125; 250; 500 Гц. Таковые отвечают требованиям ГОСТ 12090-80 «Частоты для акустических измерений» [15] и СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [16], а также позволяют оценить звукоподавление на «определяющей» частоте [17]. Полученные из расчетных моделей данные об уровне звукового давления в помещении без резонатора (за конструкцией) обрабатывали методом «средней линии».

Целью второго этапа исследования являлось сравнение параметров теплоизоляции наружных стен зданий из CLT-панелей при использовании утеплителя из минеральной ваты толщиной в 100 мм. Рассмотрены две типовые ограждающие конструкции, которые аналогичны таковым, представленным на рис. 1. В качестве основного слоя принимали пяти- и семислойную CLT-панель толщиной 160 и 224 мм соответственно. Наружная отделка



здания была представлена в виде вентилируемого фасада из гранитных плит толщиной 1 см и воздушной прослойки 2 см.

Общепринятым в практике проектирования зданий и сооружений является соблюдение требований к ограждающим конструкциям в целях обеспечения [18]:

- заданных параметров микроклимата, необходимых для жизнедеятельности людей и работы технологического или бытового оборудования;
- тепловой защиты;
- защиты от переувлажнения ограждающих конструкций;
- эффективности расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию;
- необходимой надежности и долговечности конструкций.

Для расчета нами выбран район строительства в Костроме (Российская Федерация). Относительная влажность воздуха в жилом помещении составляла 55%; средняя температура в здании зафиксирована на отметке +20 °C.

Метод определения необходимой толщины утеплителя подбирали в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [18], СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [19] и СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [20].

По результатам расчетов производили сравнение приведенного сопротивления теплопередаче с требуемым значением, а также оценивали распределение действительного и максимального парциального давления паров воды в конструкции.

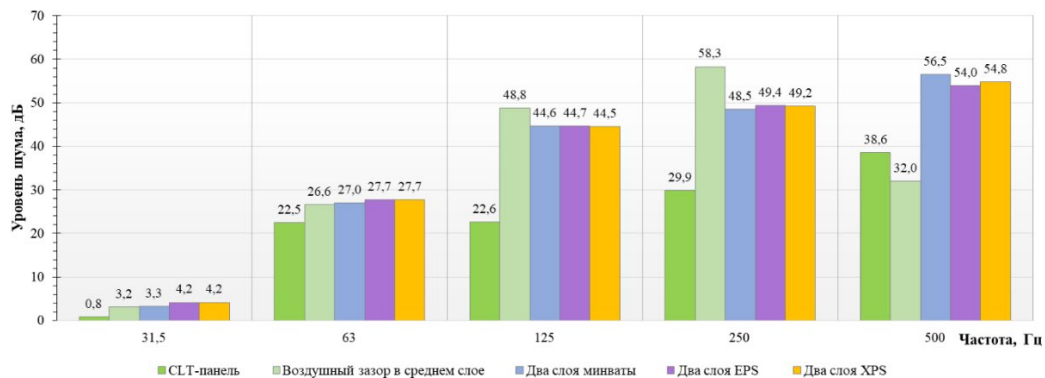
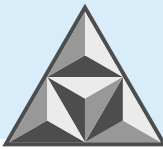
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из результатов анализа влияния шумоизолирующих слоев, расположенных внутри CLT-панелей по описанным выше пяти вариантам их расположения (см. табл. 1), явилось то, что в программном комплексе *COMSOL Multiphysics* нами получены значения уровня шума (dB) за перегородкой при различных частотах звука. Каждый вид вставки в отдельно взятом варианте сравнивается с исходным уровнем шума для цельнодеревянной семислойной CLT-панели. Для наглядности полученные результаты представлены на рис. 4. Все результаты не приводятся, поскольку получен отрицательный эффект от использования всех звукоизолирующих вставок и на всех частотах источника звука. Для варианта 4 (рис. 4, а) благодаря добавлению воздушного зазора в центральном слое панели удалось добиться снижения (на 6.6 дБ) шума на частоте 500 Гц. Хорошие результаты получены для варианта 5 расположения шумоизолирующих вставок (рис. 4, б): на частотах 31.5, 63, 125 и 250 Гц зарегистрированы близкие показатели шума с обычной цельнодеревянной панелью, а на частоте 500 Гц по всем видам вставок положительная разница в среднем достигала 6.0 дБ.

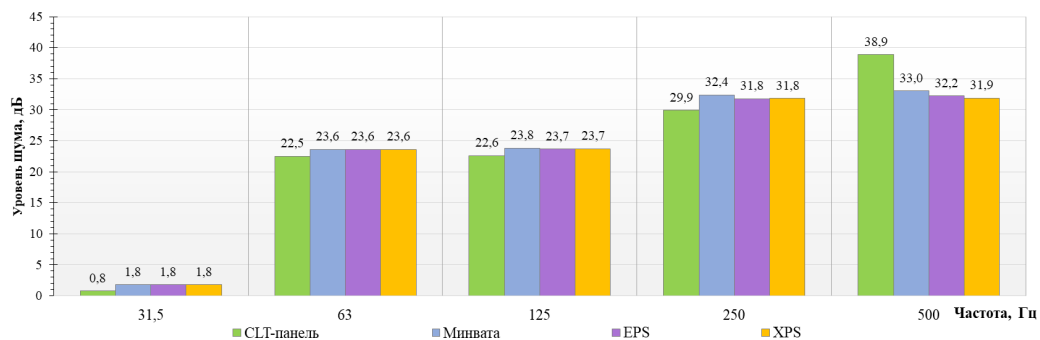
Очевидно, вставки, которые находятся непосредственно в теле панели, часто работают с отрицательным эффектом, снижая акустический комфорт. Проявляется эффект мембраны; вставки внутри панели, вне зависимости от материала, деформируются вместе с панелью, никак не препятствуя прохождению звуковых волн через конструкцию.

Напротив, те вставки, что полностью «рассекают/делят» панель на отдельные части, демонстрируют достаточную эффективность. Такие результаты согласуются с исследованиями [10, 21, 22], в которых отмечается, что для древесины наиболее проблемными с точки зрения звукоизоляции являются низкие частоты в интервале 50-250 Гц.

Особенно это характерно для легких конструкций, которые, по сравнению с массивными (тяжелыми) конструкциями, лучше проводят звук и не обеспечивают требуемых параметров звукоизоляции.



а (а)



б (b)

Рис. 4. Влияние частоты звука и вида материала на уровень шума в четвертом (а) и пятом (б) варианте вставок

Fig. 4. Impact of sound frequency and material type on the noise level in the fourth (a) and fifth (b) variant of inserts

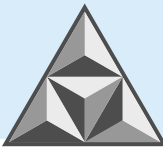
Таким образом, гипотеза о положительном эффекте от использования вставок из сравнительно легких материалов внутри CLT-панели не подтвердилась. Возможно, применение иных материалов с малой плотностью, обладающих хорошими показателями тепло- и звукоизоляции и одновременно более эластичных по сравнению с минеральной ватой, пенопластом или пенополистиролом, обеспечит снижение уровня шума. Для этого требуется проведение дополнительных исследований – как с использованием моделирования, так и в рамках натурных испытаний.

Согласно результатам теплотехнических расчетов, выявлено, что при строительстве зданий из семислойных CLT-панелей толщиной 224 мм достаточно применить утеплитель из минеральной ваты толщиной 100 мм.

Величина приведенного сопротивления теплопередаче $R_{0пр}$ больше требуемого $R_{0норм}$ ($3.28 > 3.18 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$). Следовательно, для Костромской области ограждающая конструкция из CLT-панелей с теплоизоляционным слоем из минеральной ваты, выполненная по традиционной схеме (см. рис. 1), будет обеспечивать требуемый температурный режим внутри помещения.

При строительстве зданий из пятислойных CLT-панелей толщиной 160 мм использование утеплителя из минеральной ваты толщиной 100 мм будет недостаточным.

Величина приведенного сопротивления теплопередаче $R_{0пр}$ меньше требуемого $R_{0норм}$ ($3.00 < 3.18 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$); следовательно, данная ограждающая конструкция не соответствует требованиям по теплопередаче. Для использования таких панелей в реальных условиях необходимо увеличить толщину теплоизоляционного слоя.



Анализ распределения действительного и максимального парциального давления показал, что для обеих рассмотренных конструкций получены схожие результаты.

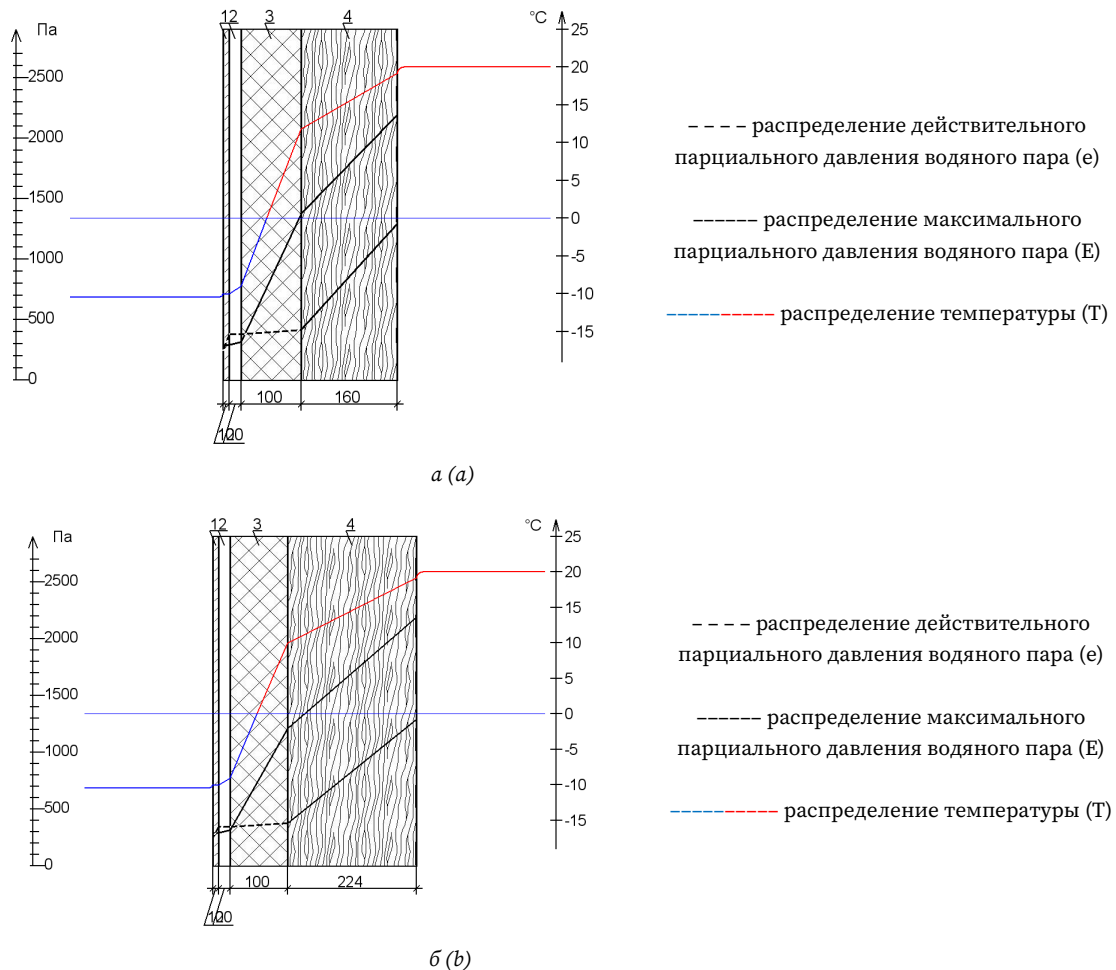


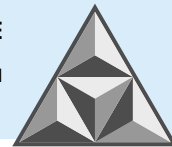
Рис. 5. График распределения давлений и температуры для пятислойной (а) и семислойной (б) CLT-панели
Fig. 5. Pressure and temperature distribution graph of a five-layer (a) and seven-layer (b) CLT-panel

Как видно из рис. 5, точка росы и в первом (рис 5, а), и во втором случае (рис. 5, б) приходится на наружную поверхность утеплителя.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований выявлена проблема несоответствия используемых теплоизоляционных материалов требованиям звукоизоляции и звукоподавления. Для обеспечения в зданиях из CLT-панелей комфортных условий для проживания, с учетом требований температурного режима и акустических условий, необходимо использовать материал, обладающий одновременно коэффициентом теплопроводности $\lambda \leq 0.04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ и высокими показателями звукоизоляции. Для межквартирных ограждающих конструкций жилых зданий в качестве звукоизолирующего материала необходимо применять таковой с индексом изоляции воздушного шума не ниже $Rw_{\text{треб}} = 52 \text{ дБ}$, для межкомнатных конструкций $Rw_{\text{треб}} = 43 \text{ дБ}$.

Расчет теплоизоляции рассмотренных ограждающих наружных конструкций зданий показал преимущества использования семислойных CLT-панелей по сравнению с пятислойными CLT-панелями.



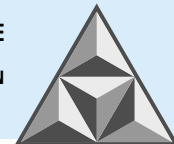
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.: Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р // Правительство Российской Федерации. 2022. № 1. – Ст. 3268-р.
2. **Арзиманов Д.И., Гаевская З.А.** Сравнительный анализ энергоэффективности CLT панелей для жилой многоэтажной застройки Санкт-Петербурга // *Инженерные исследования*. 2023. № 2 (12). С. 11-18.
3. **Jones K., Stegemann J., Sykes J., Winslow P.** Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber // *Construction and Building Materials*. 2016. 125. P. 690-702.
4. **Булгакова И.А.** Повышение энергоэффективности в сфере жилищно-коммунального комплекса как путь снижения углеродного следа // *Энергосбережение*. 2022. № 7. С. 1-13.
5. **Есауленко И.В.** Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021. № 4. С. 17-25. DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25.
6. РИА Новости: сайт. // Новый взгляд на дом из дерева. Деревянное домостроение в России – URL: <https://ria.ru/20180907/1510231385.html> (дата обращения: 12.01.2025).
7. CLT RUS: сайт. – URL: <https://clt-rus.ru/> (дата обращения: 12.01.2025).
8. **Титунин А.А.** Определение коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций с учетом макроструктуры и плотности древесины // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 8-18.
9. **Боровиков А.М., Углев Б.Н.** Справочник по древесине: справочник. М.: Лесная пром-сть, 1989. 296 с.
10. **Santos P., Sousa L., Godinho L., Correia J.R., Dias A.M.P.G.** Acoustic and thermal behavior of cross-insulated timber panels // *Journal of Building Engineering*. 2021, 44, 103309.
11. **Овсянников С.Н.** Проблемы обеспечения теплозащиты и звукоизоляции в зданиях из древесины // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: мат. XIII Межд. науч.-практ. конф., Томск, 28 февраля – 02 марта 2023 года. Ч. 1. Томск: Томский гос. арх.-строит. ун-т, 2023. С. 15-24.
12. **Caniatoa M., Bettarello F., Ferlugaa A., Marsicha L., Schmida C., Faustic P.** Acoustics of lightweight timber buildings: A rev. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 80. P. 585-596.
13. **Рытов А.Д., Титунин А.А.** Анализ влияния толщины CLT-панелей на изоляцию воздушного шума в жилых зданиях // *Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2024. № 1. С. 410-411.
14. COMSOL Multiphysics — это программное обеспечение для мультифизического моделирования, разработанное компанией COMSOL. // COMSOL Multiphysics URL: <https://www.comsol.ru>.
15. ГОСТ 12090-80 Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды : дата введения 1981-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 2 с.
16. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с изменениями № 1, 2, 3): дата введения 2011-05-20. М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 40 с.
17. **Виноградов Д.В., Пресс М.Р.** Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций, выполненных из стеновых бетонных камней «Besser» // *Вестник МГСУ*. 2010. № 1. С. 304-311.
18. Свод правил СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: дата введения 2013-07-01. М.: Росстандарт, 2012. 95 с.
19. Свод правил СП 131.13330.2020 Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99: дата введения 2020-12-24. М.: Росстандарт, 2020. 146 с.
20. Свод правил СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий: дата введения 2004-06-01. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 139 с.

Поступила в редакцию 22.01.2025

Одобрена после рецензирования 29.04.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025



REFERENCES

1. Government of the Russian Federation. (2022), On approval of the Strategy for the Development of the Construction industry and Housing and Communal Services of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035: Decree of the Government of the Russian Federation dated October 31, 2022, no. 3268-r (in Russian).
2. **Arzimanov, D.I. and Gaevskaya, Z.A.** (2023), "Comparative analysis of energy efficiency of CLT panels for residential multi-storey buildings in St. Petersburg", *Inzhenernye issledovaniya*, vol. 2, no. 12, pp. 11-18 (in Russian).
3. **Jones, K., Stegemann, J., Sykes, J. and Winslow, P.** (2016), "Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber", *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 690-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088>
4. **Bulgakova, I.A.** (2022), "Improving energy efficiency in the housing and communal complex as a way to reduce the carbon footprint", *Energobezhazhenie*, no. 7, pp. 1-13 (in Russian).
5. **Esaulenko, I.V.** (2021), "Prospects for the development of high-rise wooden housing construction in Russia on the example of foreign experience", *Arkhitktura, stroitel'stvo, transport*, no. 4, pp. 17-25, DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25 (in Russian).
6. RIA Novosti. (2018), A new look at a house made of wood. Wooden house construction in Russia [online]. Available at: <https://ria.ru/20180907/1510231385.html> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
7. CLT RUS. (2024) Available at: <https://clt-rus.ru> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
8. **Titunin, A.A.** (2024), "Determination of the coefficient of thermal conductivity of wooden glued structures, taking into account the macrostructure and density of wood", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 8-18 (in Russian).
9. **Borovikov, A.M. and Uglev, B.N.** (1989), Handbook of Antiquitie. Moscow: Forest Industry (in Russian).
10. **Santos, P., Sousa, L., Godinho, L., Correia, J.R. and Dias, A.** (2021), "Acoustic and thermal behaviour of cross-insulated timber panels", *Journal of Building Engineering*, vol. 44, 103309. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103309>
11. **Ovsyannikov, S.N.** (2023), "Problems of providing thermal protection and sound insulation in buildings made of wood", Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, Tomsk, Russia, pp. 15-24 (in Russian).
12. **Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C. and Fausti, P.** (2017), "Acoustic of lightweight timber buildings: A rev", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 585-596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>
13. **Rytov, A.D. and Titunin, A.A.** (2024), "Analysis of the effect of the thickness of CLT panels on the insulation of air noise in residential buildings", *Young Scientists for the Development of the National Technological Initiative (POISK)*, no. 1, pp. 410-411 (in Russian).
14. COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics is a multiphysical modeling software developed by COMSOL [online]. Available at: <https://www.comsol.com> (accessed 03.01.2025).
15. State Standard 12090-80 Frequencies for acoustic measurements. Preferred series. Moscow, Publishing House of Standards, 1980. 2 p. (in Russian)
16. Code of Rules 51.13330.2011 Noise protection. Updated version of SNiP 23-03-2003 (with Amendments no. 1, 2, 3). Moscow, JSC «TSPP», 2010. 40 p. (in Russian).
17. **Vinogradov, D.V. and Press, M.R.** (2010), "Study of sound insulation of enclosing structures made of concrete wall stones «Besser»", *Vestnik MGSU*, 1, pp. 304-311 (in Russian).
18. Code of Rules 50.13330.2012 Thermal protection of buildings Updated edition of SNiP 23-02-2003. Moscow, Rosstandart, 2012. 95 p. (in Russian).
19. Code of Rules 131.13330.2020 Building climatology Updated edition of SNiP 23-01-99. Moscow, Rosstandart, 2020. 146 p. (in Russian).
20. Code of Rules 23-101-2004 Design of thermal protection of buildings. Moscow, FSUE CCP, 2004. 139 p. (in Russian).

Received 22.01.2025

Approved 29.04.2025

Accepted 15.05.2025