



Статья

Влияние высоты здания на передачу звука в Здания из поперечно-клееной древесины — индекс снижения вибрации

Эрик Нильссон ^{1,*} , Сильвен Менар ¹, Дельфин Бард ² и Клас Хагберг ³

¹ Департамент прикладных наук Квебекского университета в Шикутими, Чикутими, QC G7H 2B1, Канада; sylvain_menard@uqac.ca

² Факультет физики и астрономии, Католический университет Левена, 3000 Левен, Бельгия; delphine.bardhagberg@kuleuven.be

³ Факультет гражданского строительства, экологии и природных ресурсов, Технологический университет Лулео, 97187 Лулео, Швеция; klas.hagberg@ltu.se

* Переписка: erik.nilsson1@uqac.ca

Аннотация: Высотные деревянные здания становятся все более популярными, и в их конструкции обычно используется поперечно-клееная древесина. Более высокие здания приводят к более высоким нагрузкам на соединения внизу здания, что, как предполагается в литературе, отрицательно влияет на звукоизоляцию. Это исследование включало измерение индекса снижения вибрации в четырех различных зданиях CLT, различающихся по высоте и деталям соединений. Всего было измерено 12 соединений на верхних и нижних уровнях зданий. Из них 10 стыков имели упругие прослойки различной жесткости в зависимости от расчетной квазипостоянной нагрузки, а 2 стыка не имели упругих прослоек. Результаты показали, что индекс снижения вибрации снижается ниже по зданию, главным образом, на пути Стена-Стена. Результаты были согласованными для всех измеренных переходов выше 400 Гц для трассы Стена-Стена и для большинства измерений в остальном диапазоне частот 400 Гц и ниже. Наблюдаемая разница в показателе снижения вибрации может существенно повлиять на конечный результат, если высотное здание имеет несколько боковых дорожек, влияющих на звукоизоляцию между двумя квартирами, и это необходимо учитывать на этапе проектирования. Аналогичные эффекты были показаны для зданий как с упругими прослойками в местах примыканий, так и без них.



Цитирование: Нильссон, Э.; Менар, С.;

Бард, Д.; Хагберг, К. Влияние высоты здания на звук

Передача в перекрестно-ламинированном

Деревянные здания — индекс

снижения вибрации. Здания 2023, 13, 2943.

<https://doi.org/10.3390/buildings13122943>.

Академические редакторы: Кьяра Скросати и Мария Мачимбаррена

Поступила: 27 октября 2023 г.

Пересмотрено: 22 ноября 2023 г.

Принято: 23 ноября 2023 г.

Опубликовано: 25 ноября 2023 г.



Копирайт: ©2023 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и

условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Ключевые слова: индекс снижения вибрации; высота здания; поперечно-клееная древесина; строительная акустика; звукоизоляция

1. Введение

Деревянные постройки становятся все более популярными и используются для различных построек, включая многоквартирные дома, школы и офисы. Более того, максимальная высота здания постепенно увеличивается с увеличением этажей, что увеличивает нагрузку на нижнюю часть здания. Поперечно-клееный брус (CLT) обычно используется в некоторых частях строительства высотных деревянных зданий. CLT состоит из нескольких слоев деревянных досок, склеенных друг с другом крест-накрест. Обычно поперечный рисунок составляет 90 градусов, используется минимум три склеенных слоя, элементы CLT состоят из нечетного числа слоев. За счет крестообразного рисунка и процесса ламинирования элементам обеспечивается повышенная стабильность размеров, а CLT обладает высокими прочностными и жесткостными свойствами. Хотя существуют различные статьи по ветровым, пожарным и сейсмическим характеристикам высотных деревянных зданий [2–17], лишь немногие исследуют акустические факторы. Предыдущие исследования акустики дерева в основном были сосредоточены на передаче звука через отдельные элементы в лаборатории и передаче звука в готовых небольших зданиях или макетах.

Несколько лабораторий измеряли характеристики CLT-элементов с дополнительными слоями и без них, в том числе работы. [18–25]. Вардакис и др. [26] измеряли различные конфигурации плит CLT, уделяя особое внимание слоям влажного и сухого растворов над CLT. Сабурен и Маккартни [27] измерили звукоизоляционные свойства CLT-элементов для полов.

и стенки разной толщины и дополнительные обшивки. Лориджиола и др. [28] измерили несколько конфигураций стен CLT с рамами и панелями. Хонгисто и др. [29] измеряли многие деревянные и бетонные конструкции, в том числе полы из CLT с дополнительными слоями. Более того, некоторые статьи, в том числе Refs. [30–36], сосредоточенные на теоретических оценках и оценках, основанных на измерениях, для прогнозирования звукоизоляционных свойств CLT-элементов. Лин и др. [37] сравнили несколько методов расчета с результатами измерений CLT-стен в сочетании с рамами и панелями. Бадер Эддин и др. [38] использовали подход искусственной нейронной сети для прогнозирования звукоизоляционных свойств различных легких полов на основе 252 стандартизированных лабораторных измерений с хорошей точностью. Кроме того, в нескольких работах [39–43] для пластин CLT были разработаны модели звукового излучения и методы конечных элементов, которые используются для прогнозирования звукоизоляции.

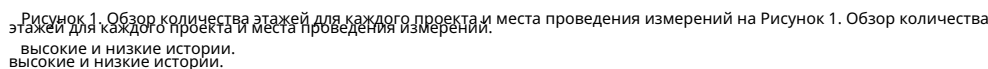
В литературе несколько авторов собрали и измерили показатель снижения вибрации CLT-элементов, в том числе работы. [44–49]. Шенвальд и др. [50] представили измерения показателя снижения вибрации элементов CLT с помощью различных методов соединения, которые используются для прогнозирования передачи бокового звука. Перес и Фуэнте [51] измерили разницу уровней скоростей в макете здания CLT, где, среди других комбинаций, использовались различные упругие материалы. Кроме того, в ADIVBois Acoustic Москур было проведено более обширное макетное испытание нескольких параметров звука, включая индекс снижения вибрации [52].

В описанной выше литературе различными авторами собран большой набор измерений. Более того, некоторые исследователи наблюдали, влияет ли нагрузка на соединения на передачу звука. Ссылка. [50] обнаружили, что нагрузка на перекресток влияла на передачу бокового звука в лаборатории, но только при начальной загрузке первой моделируемой истории; дальнейшая загрузка после этого не имела никакого эффекта. Моранди и др. [53] ожидали увидеть разницу при добавлении нагрузки на плиту CLT во время измерений индекса снижения вибрации в лаборатории. И наоборот, они не обнаружили существенной разницы при добавлении нагрузки, которая, по их мнению, могла быть вызвана процессом строительства. Мекинг и др. [54] обнаружили, что дополнительная нагрузка незначительно снижает индекс снижения вибрации L-образной конструкции. Криспин и др. [55] показали, что увеличение нагрузки приводит к увеличению динамической жесткости соединения и снижению общего показателя снижения вибрации для двух бетонных элементов, соединенных гибкой прослойкой из натурального каучука. Измерения из работ. [50,53,54] касались элементов CLT из лабораторий, где можно было моделировать полевые ситуации. В других работах оценивались полевые измерения в готовых зданиях и предполагалось, что нагрузка влияет на передачу звука между квартирами. Ссылка. [56] обнаружили, что нагрузка может отрицательно влиять на передачу бокового звука в легкой деревянной конструкции. Однако авторы предположили, что это вызвано несоответствием нагрузки и жесткости упругих прослоек. Ссылка. [57] обнаружили, что звукоизоляция от ударного шума была хуже внизу здания, что, по их мнению, связано с меньшей эластичностью нижних стыков из-за применения более высоких ограничений. Хёрнмарк [58] измерил индекс снижения вибрации в готовом здании и обнаружил, что увеличение нагрузки отрицательно влияет на индекс снижения вибрации. Однако измерения проводились переходным методом, при этом уровни вибрации не регистрировались одновременно, что противоречит рекомендациям ISO 10848-1 [59].

В некоторых из ранее упомянутых исследований [50,53–58] индекс снижения вибрации измерялся либо в лаборатории, либо в полевых условиях, и в каждой статье исследовалось несколько соединений и комбинаций. Более того, лишь в нескольких статьях в цифрах или кривых описывалось, насколько существенно влияние высоты здания, тогда как в других в основном комментировалось, оказывает ли она влияние. Необходимо тщательно изучить, влияет ли разница в высоте зданий на передачу звука между этажами в полевых условиях и насколько значителен этот эффект. В недавнем исследовании Nilsson et al. [60] авторы выполнили 58 измерений воздушной звукоизоляции на нескольких этажах в четырех зданиях с разными строительными системами и деталями соединений. Результаты показали, что изоляция воздушного шума снижается ниже в зданиях. Более того, исх. [60] обнаружили, что изоляция воздушного шума снижается в среднем на 0,5 дБ на этаж по частоте

передача инфекции.

сдвиг. Индекс бросения в бради измерен по методу измерения. 2. Индекс

[illegible]

Индекс снижения вибрации K_v измерялся на основе стандарта ISO 10848-1 [59] и рассчитывался по уравнению (1): и рассчитывался по

[illegible]

Действительно, возбуждение стационарным методом (например, вибростендом) более надежно, чем переходным методом (например, молотком), как показано в литературе [61,62]. Более того, измерение с помощью вибросита является предпочтительным методом, но можно использовать ударный молоток, пока предпочтительным методом является сим-шейкер, но ударный молоток можно использовать при условии одновременного измерения. Ультимативные измерения на передающем и приемном элементах выполняются согласно измерениям стравляемых шейкер к полемным измерениям нецелесообразно из-за привлекательности шейкер к полемным измерениям нецелесообразно из-за устройства прибора обращения с ним на объекте без доступа лифтам и лифтам, а также из-за веса временных устройств из-за продолжающихся строительных работ. Кроме того, их [46] не обнаружили существенных различий между двумя методами измерения скорости и времени для элементов.

Для измерения разницы уровней усреднено по направлению разности уровней скорости. Измеряется разница между элементами i и j (.) и между элементами j и i (.), между элементами i и j (Dv_{ij}) и между элементами j и i (Dv_{ji}). Затем,

Затем рассчитывается по уравнению (2): Dv_{ij} рассчитывается

$$\overline{Dv_{,ij}} = \frac{1}{2} Dv_{,ij} + Dv_{,ji} . \quad (2)$$

Разница уровней скорости измерения с помощью акселерометров, прикрепленных к поверхности. Разница уровней скорости измерялась с помощью акселерометров, прикрепленных к поверхности. Всего использовалось семь-девять акселерометров, в зависимости от размера и всего семь-девять акселерометров, в зависимости от размера СЛТ.

СЛТ-пластины. Измерительное оборудование состояло из акселерометров пластин типа 4507 В 004. Измерительное оборудование состояло из акселерометров типа 4507 В 004 от Brüel & Kjær (Вирум, Дания), два LAN-XI типа 3050-A-060 от Brüel & Kjær, Brüel el & Kjær (Вирум, Дания), два LAN-XI типа 3050-A-060 от Brüel el & Kjær, и ударный молоток типа 8210 также от Brüel el & Kjær. Акселерометры представляли собой ударный молоток типа 8210, также производства Brüel el & Kjær. Акселерометры были откалиброваны калиброван с помощью виброкалibratorа типа VC20 фирмы Metra (ММФ) (Радебойль, Германия) - с виброкалibratorом типа VC20 фирмы Metra (ММФ) (Радебойль, Германия), и

многое), а для записи использовалось программное обеспечение BK Connect (в основном версия 26.0.0.241) от Brüel el & Kjær, а программное обеспечение BK Connect (в основном версия 26.0.0.241) от Brüel el & Kjær, используется для записи, обработки и анализа данных. Ударный молоток является частью переходного процесса и анализирует данные. Ударный молоток является частью переходного метода, и метод, и он показан на рисунке 2а. Разная твердость (мягкая, средняя, жесткая, показана на рисунке 2а). Могут быть разные твердости (мягкая, средняя, жесткая и твердая).

твердый) можно использовать на кончике молотка. Испытания на месте показали, что на кончике молотка имеется небольшой выступ. Тесты на месте показали, что существует небольшая разница в разнице в результатах разных наконечников для элементов СЛТ. Это также было обнаружено ссылкой [46], но с разными наконечниками. Однако сложнее было возбудить конструкции разными наконечниками. Однако возбудить конструкцию самым мягким способом было сложнее.

самый сложный среди Кроме того, разница во времени реверберации тестового элемента была различной и жестким молотком, ударным молотком различной жесткости, как это предположено в разной силой, средним как проверено в Ref. [59] для различных изображений жестких, либо средних, либо жесткий, либо Ref. [59]

При измерении их использовали с двойным наконечником в три положения от ситуации на объекте. При единственном использовании в качестве соединителя, который был связан с кончиком, был выявлен значительный разрыв между соединениями, которые представляют интерес и интерес и поскольку соединения Детали соединяются и соединяются, однако одним из выводов каждого соединения, то есть измерения Ожидается, что процедура измерения будет более значительна, чем в предыдущих тестах.

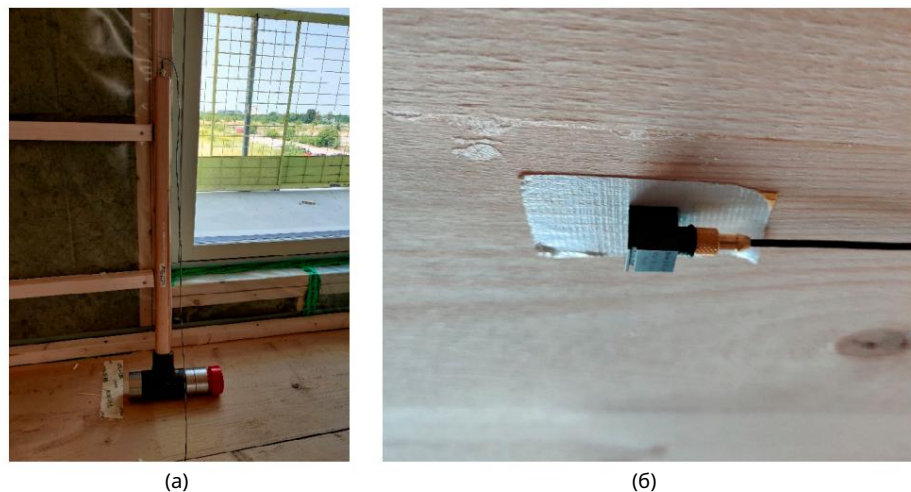


Рис. 2. Фотографии измерений оборудования: (а) — ударный молоток с жестким наконечником; (б) акселерометр, закрепленный на двустороннем скотче, тер крепится на двусторонний скотч.

Для каждого перехода при измерении напряжения использовалось два-три положения возбуждения. разница среднего уровня скорости между измеряемыми элементами (Dv_{ij} и Dv_{ji}).

Стандарт [59] определяет минимум четыре позиции возбуждения для элементов типа А (например, CLT). Однако это не всегда подходит для полевых измерений из-за размеров элементов и отверстий, даже если смутно учитывать минимальные расстояния. В целом в проектах использовались три позиции возбуждения. Однако два соединения в проекте А могли соответствовать только двум позициям, что считалось адекватным, поскольку представляла интерес разница в показателе снижения вибрации и поскольку для каждой пары соединений применялся один и тот же метод измерения. Вдоль двух-трех положений возбуждения использовалось минимум три акселерометра на каждом элементе для каждого положения возбуждения в соответствии с процедурой, описанной в работе. [59]. Акселерометры также перемещались в разные положения на элементе, и применялась процедура измерения минимальных расстояний, основанная на работе. [59]. Позиции возбуждения и измерения всегда находились на той же стороне, что и боковые пути. Например, при измерении бокового пути потолок-стена положения возбуждения и положения измерения потолка/пола выполнялись на потолке, а не на полу. Кроме того, были выполнены одновременные измерения передающих и принимающих элементов, что настоятельно рекомендуется стандартом при использовании переходного метода. Положения измерений записывались с помощью акселерометров, прикрепленных к поверхности двусторонним скотчем (см. рисунок 2б). Стандартом [59] установлено, что крепление акселерометров должно быть жестким в направлении, нормальном к поверхности элементов, что не всегда подходит для измерений на месте, как указано в [5]. [63]. Таким образом, используется двусторонний скотч, который работает аналогично пчелиному воску для частот до 3150 Гц. При частоте 3150 Гц и выше может возникнуть слабая фиксация акселерометров и вызвать ошибки, которые необходимо учитывать [63]. Действительно, во избежание слабой фиксации акселерометры предпочтительнее крепить к CLT с помощью винтов и магнитов, а не использовать пчелиный воск или двусторонний скотч. Однако это было возможно лишь в некоторых проектах.

Время структурной реверберации измерялось по тем же принципам и методике для разницы средних уровней скоростей между элементами. Здесь стандарт определяет минимум три положения возбуждения, что больше соответствует процедуре, применяемой в различных проектах. Времена структурной реверберации $T_{s,j}$ и T_s , i используются для расчета эквивалентных длин поглощения a_j и a_i в соответствии с уравнением (3):

$$a_{дж} = \frac{2,2\pi \cdot c_{дж}}{T_{s,j} \cdot f_{реж}} \quad (3)$$

где S_j — площадь поверхности измеряемого элемента, c_0 — скорость звука в воздухе, f — частота, $f_{ре}$ — опорная частота (равная 1000 Гц [59]). Оценка кривых затухания для определения времени структурной реверберации следовала процедуре, описанной в работах. [59,64]. Диапазон оценки должен находиться в пределах 5–15 дБ, согласно Ref. [59].

Однако в работе Ref. [65], как также отмечено в работе [65]. [59].

Поэтому был использован диапазон оценки 10 дБ, как рекомендовано в Ref. [59].

Воздушный звук, возникающий при ударах молотка, записывался путем отсоединения акселерометров от передающего и приемного элементов, оставляя их висеть в воздухе, а кабели прикреплялись к элементам изолянтной. Рассматриваемые измерения использовались для оценки того, повлиял ли на результат воздушный шум, производимый молотком с разными наконечниками, при измерении индекса снижения вибрации.

В четырех строительных проектах, рассматриваемых в этой статье, CLT используется в качестве несущей конструкции внутренних стен и полов. В некоторых проектах на фасадах также использовался CLT. В этой статье типы соединений (X и T) состояли из двух стен и пола. В X-образных соединениях пол был по обе стороны стен, сплошной или разделенный. Что касается T-образных соединений, пол остановился на одной линии с двумя стенами, без каких-либо других соединений после этого.

Проект А представлял собой 10-этажное здание с вязкоупругой прослойкой толщиной 6 мм между полом и стенами над ним. Элементы CLT соединялись кронштейнами, которые крепились непосредственно на CLT без упругих прокладок (см. рисунок 3а). Измерения для проекта А были выполнены на шести соединениях, в результате чего были получены три пары соединений: две внутренние.

Здания 2023, 13, 2943 г.

Проект А представлял собой 10-этажное здание с вязкоупругой прослойкой толщиной 6 мм между полом и стенами над ним. Элементы CLT соединялись кронштейнами, которые крепились

непосредственно на CLT без упругих прокладок (см. рис. 3а). Измерения для проекта А были

выполнены на шести соединениях, в результате чего были получены три пары соединений: две

Пары X-образных соединений и одна пара фасадных T-образных соединений. Разница в количестве этажей между замерами для проекта А составила четыре этажа для всех трех пар узлов.

Все примыкания в проекте А выполнены из CLT-элементов перекрытия толщиной 180 мм. Все три соединения, измеренные ниже в здании, состояли из стеновых элементов CLT толщиной 160 мм. Для измерения ниже в здании, состоял из стеновых элементов CLT толщиной 160 мм. Для развязок выше в здании проекта А все три состояли из 120-мм стеновых элементов CLT толщиной 140 мм (120 мм для верхних стеновых элементов на всех трех стыках и 140 мм для нижних стеновых элементов на всех трех стыках). Соединения под названием Int.Wall 2 имели сплошные перекрытия, а соединения под названием Int.Wall 1 не имели сплошных перекрытий.

2 имел сплошные перекрытия, а места соединения под названием Int.Wall 1 не имели сплошных перекрытий.



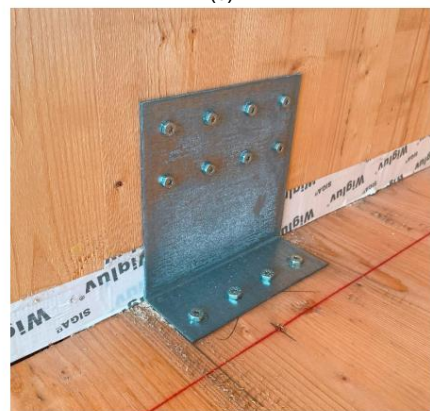
(а)



(б)



(с)



(г)

Рисунок 3. Фотографии измерений различных деталей соединения. (а) Деталь соединения для проекта А с вязкоупругой прослойкой толщиной 6 мм между стеной и полом CLT и отсутствие прослоек между кронштейном и вязкоупругой прослойкой толщиной 6 мм между стеной и полом CLT и отсутствие прослоек между кронштейном и полом CLT-элементы. (б) Деталь соединения для проекта Б с вязкоупругой прослойкой толщиной 25 мм между элементами CLT стеной. (в) Деталь соединения для проекта Б с вязкоупругой прослойкой толщиной 25 мм между элементами CLT стеной и полом и вязкоупругой прослойкой толщиной 12 мм между стеной и полом. (г) Деталь соединения для проекта С с вязкоупругой прослойкой толщиной 12 мм между стеной и полом из CLT и упругой прослойкой толщиной 6 мм между кронштейном и CLT-элементами. (д) Деталь соединения для проекта А без прокладок в вертикальных стыках. прослойка между кронштейном и CLT-элементами. (г) Деталь соединения для проекта А без прослоек в вертикальных стыках.

Измерения для проекта Б проводились в шестизэтажном здании с вязкоупругой прослойкой толщиной 25 мм между полом и стенами над ним. Элементы CLT соединялись кронштейнами и

Измерения по проекту Б проводились в шестизэтажном здании с толщиной 25 мм винтами, а в нижней части кронштейнов у пола располагалась тонкая упругая прослойка (см. рис. 3б). Два X-перехода с непрерывным

соединены скобками и винтами, а на нижней расположена тонкая упругая прослойка.

часть кронштейнов прижата к полу (см. рисунок 3б). Два X-образных соединения со сплошными перекрытиями

(одна пара переходов) были измерены с трехэтажной разницей. Оба узла состояли из элементов пола CLT толщиной 180 мм и стеновых элементов CLT толщиной 120 мм.

Проект С представлял собой пятиэтажное здание (включая чердак) с вискоэластиком толщиной 12 мм.

прослойка между полом и стенами над ним. Элементы CLT были соединены с кронштейны, монтируемые непосредственно на CLT-стену, с упругой прослойкой толщиной 6 мм.

между кронштейном и полом CLT (см. рисунок 3с). Измерения были выполнены

Этажи (одна соединительная пара) замерялись с разницей в три этажа. Оба соединения состояли из элементов пола CLT толщиной 180 мм и стеновых элементов CLT толщиной 120 мм.

Проект С представлял собой пятиэтажное здание (включая чердак) с вязкоупругой прослойкой толщиной 12 мм между полом и стенами над ним. Элементы CLT соединялись кронштейнами, которые монтируются непосредственно на CLT-стену, с упругой прослойкой толщиной 6 мм между кронштейном и полом CLT (см.7 из 19 рисунок 3в). Измерения проводились на двух Т-образных перекрестках, в результате чего была получена одна пара соединений на разнице в два этажа. Оба соединения состояли из элементов пола CLT толщиной 240 мм и стеновых элементов CLT толщиной 120 мм. на двух Т-образных перекрестках, что дает одну пару перекрестков на разнице в два этажа. Оба соединения элементов надрыва проекта С проводились на стеновых элементах без упругой прослойки, состоящего из прослойки в вертикальных стыках (между полом и стенами). Подъем стен CLT были соединены с помощью кронштейнов и шурупов, также без упругой прослойки (см. рисунок 3г). Была измерена одна пара перекрестков, состоящая из двух вертикальных Т-образных перекрестков (разницей в 1-м этаже), при этом перекрытия на перекрестках перекрытия, толщина обоих соединений состояли из элементов древесины CLT толщиной 250 мм, одна пара перекрестков, толщина обоих соединений состояли из элементов древесины CLT толщиной 130 мм, была измерены, и полы в местах соединений не были сплошными. Оба узла состояли из элементов CLT толщиной 250 мм и стеновых элементов CLT толщиной 130 мм.

Описание толщин и статического модуля упругости пружин и прокладок.

которые использовались в измеренных вертикальных переходах CLT, представлены в Таблице A1.

3. Результаты

3.1. Оценка времени структурной реверберации

3.1. Оценка времени структурной реверберации ISO 10848-1 [59] предполагает, что измерения с ударным молотком должны быть оценочными. ISO 10848-1 [59] предполагает, что измерения с ударным молотком должны оцениваться разная сила удара молотка в сочетании с разными материалами. Оценивается разная сила удара молотка в сочетании с разными материалами. Подсказка. Различные материалы обсуждаются в разделе 2. Чтобы оценить прочность хамона на кончике. Различные материалы обсуждаются в разделе 2. Чтобы оценить прочность мер удар, измерения времени реверберации для двух этажей в проекте С приведены удар молотка, измерения времени реверберации для двух этажей в проекте С. Сравнены и отображены на рисунке 4. Молоток был нанесен с обеих сторон потолка, и они сравниваются и показаны на рисунке 4. Молоток был нанесен с обеих сторон потолка. пол. Удары по потолку были менее сильными, чем по полу. Результат в и пол. Удары по потолку были менее сильными, чем по полу. На рисунке 4 показано, что была небольшая разница во времени реверберации между результатами, показанными на рисунке 4. Это указывает на то, что была небольшая разница во времени реверберации между измерениями в целом. Для проверки общих измерений было проведено сравнение линий одного и того же типа. Сравнение проводилось между линиями одного и того же типа, т. рё, сплошной темно-синий по сравнению со сплошным светло-синим. Кроме того, измерения в двух примерах: сплошной темно-синий по сравнению со сплошным светло-голубым. Кроме того, измерения разные этажи в проекте С показали небольшую разницу во времени реверберации по сравнению с разными этажами в проекте С показали небольшую разницу во времени реверберации по сравнению друг друга. друг другу.

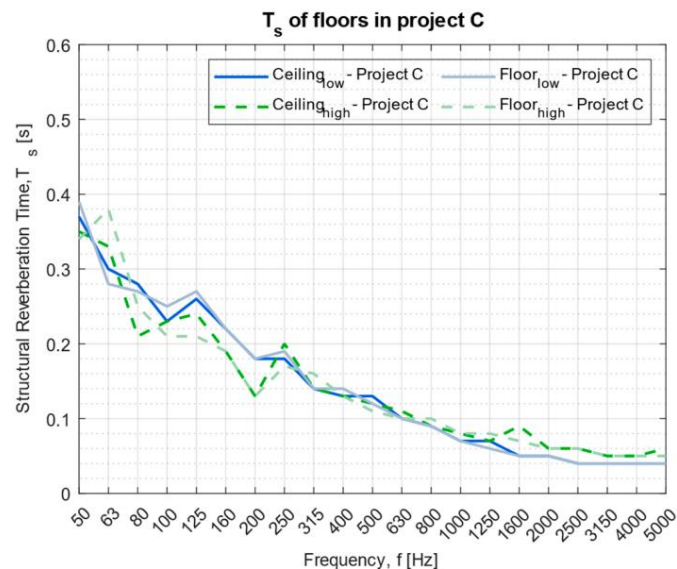


Рисунок 4. Разница во времени структурной реверберации полов в проекте С при ударном молотке

3.2. Измерения индекса снижения вибрации

На основе измерений индекса снижения вибрации по четырем проектам CLT с общей из 12 перекрестков, состоящих из 36 фланкирующих путей, результаты показали, что существует разница в индексе снижения вибрации между квартирами, расположенными на верхних этажах, по сравнению с теми, что расположены на низких этажах. На рисунке 5 разница в показателе снижения вибрации для стены – путь к стене отображается для всех проектов. Показаны T-образные соединения (фасады) пунктирными линиями, а X-образные соединения (внутренние стены) показаны сплошными линиями. А положительная разница на рисунке 5 свидетельствует о том, что показатель снижения вибрации снижается

Рисунок 5. Разница в показателе снижения вибрации на пути Стена-Стена между расположенными квартирами Рисунок 5. Разница в показателе снижения вибрации на пути Стена-Стена между расположенными квартирами

на верхних и нижних этажах для четырех разных проектов. Пунктирные кривые представляют Т-образные соединения (фасады) на верхних и нижних этажах для четырех разных проектов. Штриховые кривые представляют собой Т-образные соединения (фасады), а сплошные линии обозначают Х-образные соединения (внутренние стены). Сплошные линии представляют Х-образные соединения (внутренние стены).

Здания 2023, 13, х НА ЭКСПЕРТНУЮ были более согласованы друг с другом, и более очевидная корреляция наблюдалась без рекламы. Однако обоснование. Результаты выше 3150 Гн/мелли более высокую неопределенность нескольких акселерометр был виден без коррективов. Результаты выше 3150 Гн/мелли более высокую неопределенность нескольких акселерометра.

Рисунок 6. Разница в показателе снижения вибрации на пути Стена-потолок между квартирами

Наконец, отображается разница в индексе снижения вибрации для пути Стена-Пол. для всех проектов на рисунке 7. Здесь такого же результата по сравнению с кривыми не обнаружено показано на рисунках 5 и 6. Несколько кривых на рисунке 7 варьируются в пределах 0 дБ. В целом, среднее значение все еще было положительным (что указывает на то, что индекс снижения вибрации снижается Рисунок 6. Разница в индексе снижения вибрации на пути стена-потолок между квартирами, расположенными ниже, но не так очевидна. Более того, кривые не были последовательными. рассчитаны на высокие и низкие уровни для четырех разных проектов. Пунктирные кривые представляют Т-образные соединения (фа- друг с другом, без корректировок корреляция не обнаружена. Опять же, результаты выше кад), а сплошные линии обозначают Х-образные соединения (внутренние стены). Частота 3150 Гц имела более высокую неопределенность из-за метода установки акселерометра.

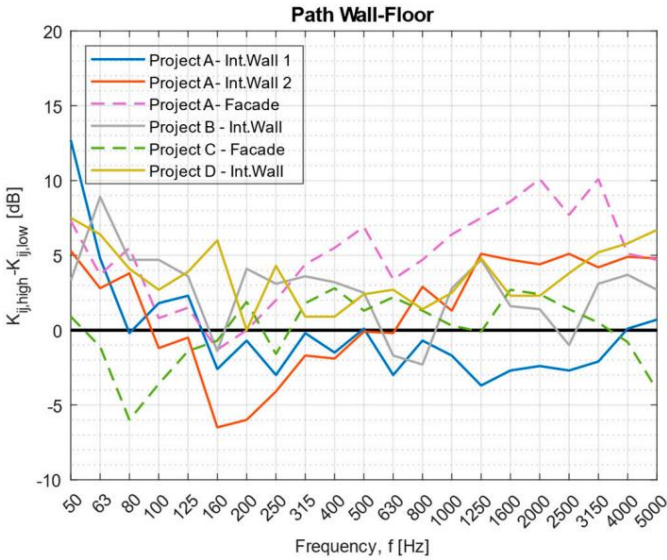


Рисунок 7. Разница в показателе снижения вибрации для пути Стена-Пол между расположенными квартирами. Рисунок 7. Разница в показателе снижения вибрации для пути Стена-Пол между расположенными квартирами. оценивались на высоких и низких этажах для четырех разных проектов. Пунктирные кривые представляют собой Т-образные соединения (на высоких и низких этажах для четырех различных проектов). Пунктирные кривые представляют собой Т-образные соединения (фасады), а кад), а сплошные линии обозначают Х-образные соединения (внутренние стены). сплошные линии представляют Х-образные соединения (внутренние стены).

4. Дискуссия

Параметры, которые используются для измерения качества строительства, являются Пары корреляции между различными нагрузками, которые используются для измерения качества строительства. Факторы, которые используются для измерения качества строительства, являются Пары корреляции между различными нагрузками, которые используются для измерения качества строительства.

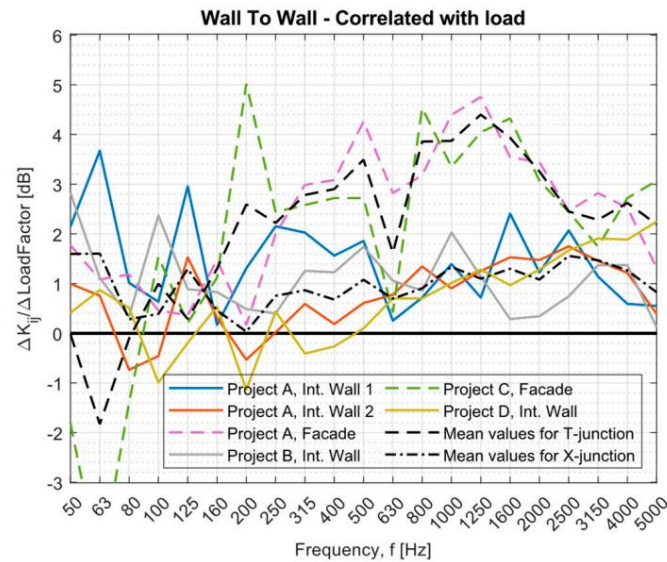
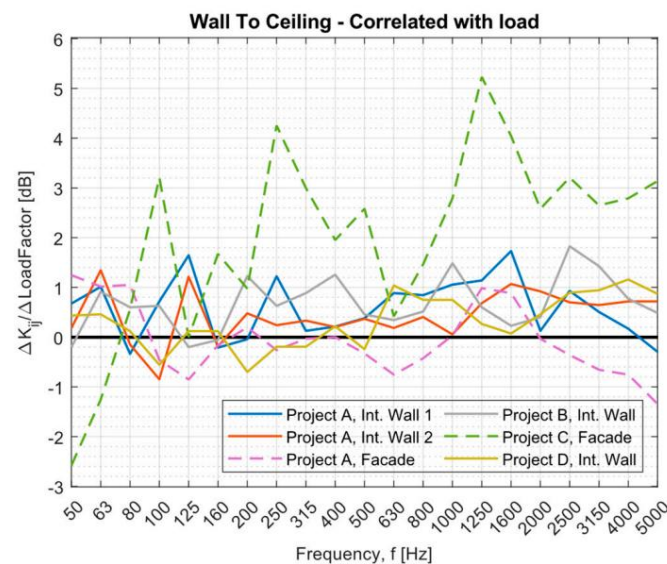
4.1. Измерения, коррелирующие с нагрузкой

Во-первых, для сравнения результатов использовался коэффициент корреляции, включающий нагрузку. Другой Во-первых, для сравнения результатов использовался коэффициент корреляции, включающий нагрузку. для нахождения подходящего коэффициента корреляции, можно использовать комбинацию нагрузок, в том числе комбинация комбинации нагрузок, которые используются для измерения качества строительства. Однако получить сочетание нагрузок удалось только для готовых зданий. Для целесообразно использовать квазипостоянную нагрузку, поскольку она непосредственно напрямую влияла на выбор жесткости упругих прослоек в местах стыков на различных истории для трех проектов из четырех (в одном проекте не было устойчивых прокладок на стыках).

Используется коэффициент корреляции нагрузки согласно уравнению (4):

$$K_{ij}/0,08 \cdot \log_{10} (1,2\pi)^{(\text{Нагрузка}+14)} , \tag{4}$$

где Load — квазипостоянная нагрузка в кН/м, результат показан на рисунках 8–10. для различных путей. Оси Y на рисунках 8–10 основаны на ссылочном номере, разделенном на знаменатель в уравнении (4), называемый коэффициентом корреляции средней нагрузки. Этот фактор использовал среднее значение Load по всем измерениям в этой статье. Коэффициент корреляции в Уравнение (4) было впервые разработано на основе итерационного процесса. Позже это было скорректировано так, что ось Y для обоих методов корреляции совпала (корреляция с количеством историй и корреляция с нагрузкой).

[illegible]

Визуально различия показателей снижения вибрации для пути Стена-Потолок, коррелирующая с нагрузкой Рисунок 9. Разница в показателях снижения
Рисунок 9. Разница в показателе снижения вибрации для пути Стена-Потолок, коррелирующей с нагрузкой

этажах для четырех разных согласно уравнению (4), между квартирами, расположенными на верхних и нижних этажах для четырех разных
согласно уравнению (4), между квартирами, расположенными на верхних и нижних этажах четырех разных проектов.

Пунктирные кривые обозначают Т-образные соединения (фасады), а сплошные линии — Х-образные соединения (внутренние стены).

Для пути Стена-Стена отображаются кривые средних значений для X- и T-образных соединений, поскольку обнаруживается корреляция между парами соединений и разницей между X-образными и T-образными соединениями. Корреляция точна для T-образных переходов выше 200 Гц, где кривые следуют друг за другом. Однако для частоты 200 Гц и ниже кривые не коррелируют с коэффициентом нагрузки, предложенным в уравнении (4). Для X-переходов хорошая корреляция встречается для частот выше 500 Гц. Корреляция также довольно хороша для частот. 500 Гц и ниже, но с несколько большими отклонениями. В целом коэффициент корреляции в Уравнение (4) приводит к лучшей корреляции между кривыми на рисунке 8 по сравнению с результаты на рисунке 5.

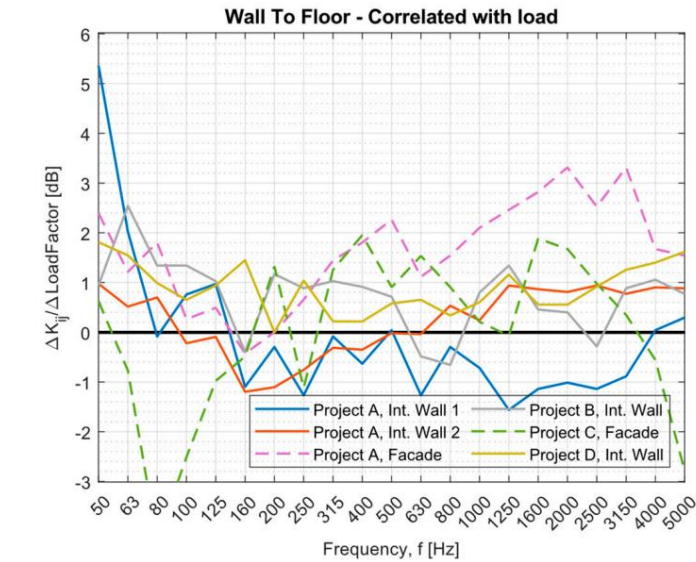


Рисунок 10. Разница в индексе снижения вибрации для пути Стена-Пол, коррелирующая с нагрузкой согласно уравнению (4), между квартирами, расположенными на верхних и нижних этажах для четырех разных проектов. Согласно уравнению (4), между квартирами, расположенными на верхних и нижних этажах четырех разных проектов. Пунктирные кривые обозначают Т-образные соединения (фасады), а сплошные линии — Х-образные соединения (внутренние стены). Пунктирные кривые обозначают Т-образные соединения (фасады), а сплошные линии — Х-образные соединения (внутренние стены).

Для пути « Стена-Стена» отображаются кривые средних значений для Х-образных и Т-образных соединениях. Для пути передачи « Стена-Потолок» коэффициент корреляции согласно уравнению (4) Это означает, что между парами соединений обнаружена корреляция, а разница между ними не показывает хорошей корреляции между кривыми на рисунке 9. Таким образом, черное среднее Х-образные и Т-образные соединения. Корреляция точна для Т-образных соединений выше 200, Гц, где кривые следуют друг за другом. Однако для частоты 200 Гц и ниже кривые не коррелируют с. Для пути передачи « Стена – пол» коэффициент корреляции согласно уравнению (4) снова не показывает хорошей корреляции между кривыми на рисунке 10. В результате обнаружена для частот выше 500 Гц. Корреляция также неплохая для частот 500 Гц и ниже, но с несколькими исключениями. В целом коэффициент корреляции в уравнении (4) привносит кривые.

Общим знаменателем между путями Стена-Пол и Стена-Потолок является пол. корреляции себе, а не кривые на рисунке 9. Пол является результатом стенового соединения. Следовательно, этот фактор может можно объяснить отсутствием многообещающих результатов в корреляции с нагрузкой по вибрации.

Два пути передачи, Стена-Потолок и Потолок-Потолок, являются факторами корреляции. В результате корреляция (4) не показывает хорошей корреляции между кривыми на рисунке 9. Таким образом, среднее кривые значений на рисунке 9. Результат с сочетанием нагрузок, когда уравнение (4) передает среднее значение. Однако коэффициент корреляции, основанный на измерениях по среднему значению, когда измерения проводятся между кривыми на рисунке 10. В результате это влияет на кривые значений, представленные на рисунке 9. Результаты на рисунке 9. Результаты на рисунке 9. Результаты на рисунке 9.

Коэффициент корреляции между количеством этажей. Это может быть связано с тем, что количество этажей, сам по себе, не является вертикальным элементом в отличие от стен. Следовательно, этот фактор можно объяснить отсутствием многообещающих результатов в корреляции с нагрузкой для путей снижения показателя вибрации, включающих с количеством этажей.

Как альтернатива соотношению результатов с нагрузкой, разница в числе историй в каждой истории приводит к результату, который совпадает с коэффициентом корреляции в уравнении (5) в произошли уретры. Однако одни и те же основные нагрузки на этаж в той или иной степени влияют на соединения, когда измерения происходят между разными проектами (5), поскольку измерения производятся сразу после установки элементов CLT для каждого проекта. Таким образом, коэффициент корреляции с количеством историй может показать аналогичные результаты, если предположить линейную

ссылочное число, которое делится на знаменатель в уравнении (5), называемое средним значением корреляции между историями. Этот коэффициент использует среднее значение. Количества историй из все измерения в этой статье. Тот же номер ссылки используется для корреляций.

с нагрузкой и количеством этажей. Несколько лучше корреляция наблюдается с количеством этажей на рисунке 11 по сравнению с нагрузкой на рисунке 8 для стены-стены путь как для Т-образных, так и для Х-пересечений. Статистически это оценивается для всего диапазон частот до 3150 Гц, как со среднеквадратической ошибкой (RMSE), так и с средняя абсолютная ошибка (MAE). Оба оцениваются, поскольку RMSE более чувствителен, чем MAE к выбросам [66]. Однако при оценке RMSE и

нагрузкой и количеством этажей. Несколько лучшая корреляция наблюдается с количеством этажей на рисунке 11 по сравнению с нагрузкой на рисунке 8 для пути стена-стена как для Т-образных, так и для Х-образных соединений. Это статистически оценивается для всего диапазона частот до 3150 Гц с использованием как среднеквадратической ошибки (RMSE), так и среднего значения, абсолютная ошибка (MAE). Оцениваются оба, поскольку RMSE более чувствителен к выбросам, чем

MAE [66]. Однако разные результаты получаются при оценке RMSE и MAE для разных частотных диапазонов (низких (50–200 Гц), средних (250–1000 Гц) и высоких MAE для разных частотных диапазонов (1250–5000 Гц) по Холкинсу [67]. Высокая частотная область в этой статье составляла (1250–5000 Гц) вместо (250–1000 Гц) из-за большей неопределенности в выбранном методе измерения для частот выше 3150 Гц. Корреляция с нагрузкой была методом измерения для частот выше 3150 Гц. Корреляция с нагрузкой была лучшей для Х-переходов на более высоких частотах, тогда как корреляция с количеством историй оказалась лучшим при более низких частотах как для Х-, так и для Т-переходов. Было обнаружено, что корреляция с нагрузкой на более высоких частотах выполняет в основном как корреляция с количеством этажей Т-образных перекрестков. Обе корреляции выполнялись аналогично для среднечастотной области, хотя количество сто-методов Райс выступил немного лучше. Общие средние значения прогнозов на историю были рассчитаны как 1,0 дБ для Х-переходов и 1,6 дБ для Т-переходов. Детальный прогноз 1,0 дБ для Х-переходов и 1,6 дБ для Т-переходов. Значения подробного прогноза: значения показаны на рисунке А1, а статистические результаты показаны на рисунке А2. показано на рисунке А1, а статистические результаты показаны на рисунке А2.

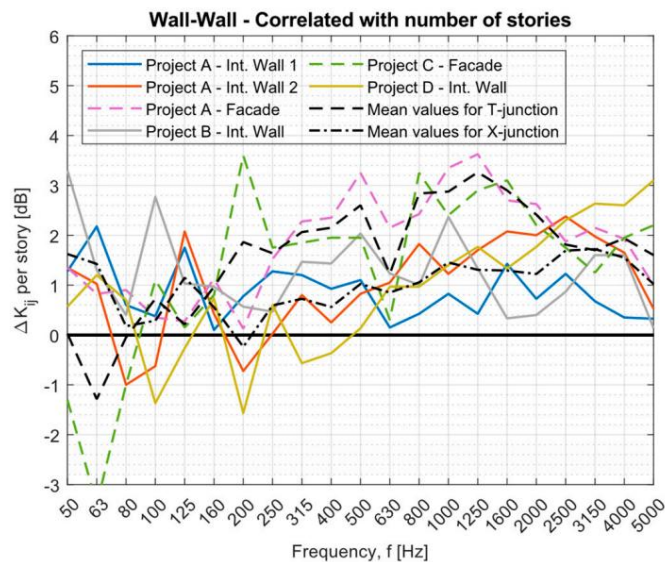
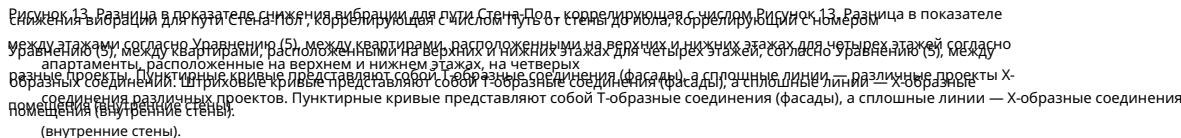
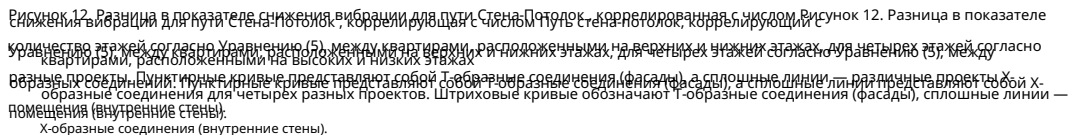


Рисунок 11. Разница в показателе снижения вибрации для пути Стена-Стенка, коррелирующая с номером этажей согласно уравнению (5), между квартирами, расположенными на верхних и нижних этажах для четырех этажей, согласно уравнению (5), между разными проектами. Штриховые кривые представляют собой Т-образные соединения (фасады), а сплошные линии — Х-образные соединения различных помещений (внутренние стены). Черные кривые представляют собой кривые прогнозирования среднего значения. (внутренние стены). Черные кривые представляют собой кривые прогнозирования среднего значения.

Для пути передачи « стена-потолок» коэффициент корреляции согласно уравнению (5) не показывает хорошей корреляции между кривыми на рисунке 12. Однако корреляция коэффициент согласно уравнению (5) на рисунке 12 работает лучше, чем коэффициент корреляции согласно уравнению (4) на рисунке 9.

Для пути передачи « Стена – пол» тот же результат, что и для пути « Стена – потолок» , как показано на рисунке. выше, находится на рисунке 13. Коэффициент корреляции согласно уравнению (5) выполняет лучше на рисунке 13, чем коэффициент корреляции согласно уравнению (4) на рисунке 10, и корреляция между кривыми на рисунке 13 не очень хорошая.

Коэффициенты корреляции в уравнениях (4) и (5) в основном зависят от разницы нагрузка или количество этажей. Их можно улучшить, включив частотно-зависимые корреляции, поскольку может быть различное поведение, например, вокруг различных критические частоты систем. Включив другие параметры в уравнения (4) и (5), можно было бы достичь лучшей корреляции, особенно в средне- и низкочастотных областях ниже 400 Гц, где наблюдается более низкая корреляция по сравнению с более высокими частотами выше 400 Гц. Тем не менее, дополнительные измерения коэффициента снижения вибрации различных деталей соединения в CLT необходимы в полевых условиях, чтобы включить больше параметров в корреляции.



Для траекта перелачи стана на потлоку коз корфациент корелляцийи согласна уравнению (3). Для углубленного анализ комбинация квази постоянных нагрузок в качестве входных данных для корреляции нагрузки (рисунке 8) используется уравнение (9) на рисунке (7) и наоборот, чтобы более точно определить корреляцию (уравнение (4)), поскольку эта комбинация нагрузок используется, когда упругие промежуточные слои борозды имеют состояние равновесия (рисунке 9, определены размеры. Несколько худшая корреляция наблюдается с нагрузкой по сравнению с неравновесным состоянием), что не приводит к разрыву для пути и состояния толстого по выде количества этапов для частот в средних и низких областях. Одно из возможных объяснений коэффициент корреляции согласно уравнению (3) для этого разрыва на модели представлении 13-ой выбор упругих промежуточных слоев, по сравнению с реальной нагрузкой. Формируется также на рисунке 6, тем коэффициент корреляции согласно уравнению (4) на рисунке 10. Даже если упругие прослойки рассчитаны на правильную нагрузку, они выбираются исходя из корреляции между кривыми на поверхности термодинамики корреляции.

Корреляция при проведении измерений является от некоторых производителей. Более того, может охватывать широкий диапазон нагрузок от некоторых производителей. Более того, CLT, когда они видны, задолго до того, как здание разрушится или количество отказов становится слишком большим, включая частоты зависимость от времени.

Таким образом, нагрузка при проведении измерений отличается от корреляции, поскольку может быть определенное поведение, которое имеет набор различных корреляций,

расчетные значения нагрузки в готовом здании, включая большие статические и временные нагрузки. При таком аргументе вместо расчетной нагрузки в готовом здании следует использовать нагрузку при проведении измерений. Однако нагрузка при проведении измерений не является репрезентативной для выбранной жесткости упругих прослоек готового здания. Ожидается, что связь между нагрузкой и жесткостью будет более актуальной, поскольку жесткость упругих прослоек может напрямую влиять на индекс снижения вибрации, как показано для некоторых материалов в работах. [45,53]. Более того, только для некоторых проектов можно получить комбинации нагрузок только с использованием только CLT. Кроме того, как утверждается в конце раздела 4.1, комбинации нагрузок только с одним CLT могут иметь примерно такую же корреляцию, как и количество этажей, если предположить линейную корреляцию между различными этажами.

Различные жесткости упругих прослоек выбираются исходя из квазипостоянной нагрузки, как описано ранее. Таким образом, внизу здания выбираются более жесткие упругие прослойки по сравнению с верхними уровнями. Как показывает литература [45,53], более жесткие упругие прослойки способствуют более высокой передаче вибрации через соединение. Поэтому можно утверждать, что результат, полученный в данном исследовании, связан с разницей жесткости упругих прослоек по количеству этажей. Однако, как показано в проекте D, соединения без упругих прослоек показывают аналогичные результаты, что и соединения с упругими прослойками. Более того, в предыдущей статье [60], в которой измерялась передача воздушного звука в аналогичных зданиях, было обнаружено то же сходство, что и в этой статье. Хотя разница в жесткости упругих прослоек в зависимости от количества этажей может иметь влияние, она не объясняет только результат, полученный в этом исследовании. Таким образом, установлено, что возрастающая нагрузка отрицательно влияет на показатель снижения вибрации при наличии или отсутствии упругих прокладок в стыках, а также ожидается более высокая передача бокового звука на нижних уровнях зданий. Объяснение, как предлагалось в предыдущей литературе [55], заключается в том, что увеличение нагрузки приводит к более жестким соединениям, что приводит к более низкому показателю снижения вибрации.

Следовательно, нагрузку на соединения необходимо учитывать при увеличении этажей высотных зданий.

Результаты измерений для путей, включая пол/потолок, показывают в целом небольшую положительную разницу между K_{ij} на верхних и нижних этажах, с меньшим значением K_{ij} внизу здания. Более того, анализ показывает, что путь Стена-Стена дает лучший результат с коэффициентами корреляции, чем пути, включающие пол, по сравнению с маршрутом без корреляций. Разница в эффективности корреляции может быть вызвана тем фактом, что на пол нагрузка не воздействует в такой степени, как на вертикальный элемент, например стену. Однако следует воздействовать на сам переход и иметь результат по показателю снижения вибрации. Кроме того, измерения разницы уровней средней скорости по направлению показывают, что разница уровней скорости больше варьируется в зависимости от направления, когда включен пол/потолок, по сравнению с траекторией стена-стена. Для траектории Стена-Стенка разница уровней скоростей практически одинакова в обоих направлениях. Связано ли это с процедурой измерения или другими физическими параметрами, на данный момент неизвестно и требует дальнейшего исследования.

Измерения в Ref. [50] показали, что нагрузка в первую очередь влияет на показатель снижения вибрации вплоть до начальной нагрузки первого этажа и что дополнительная повышенная нагрузка не меняет свойства распространения звука. Размеры развязок в этой статье, описанных как высокие, относятся к развязкам, расположенным на верхних этажах. Измерения также проводятся, когда элементы CLT видны. Таким образом, нагрузка при измерениях меньше по сравнению с готовым зданием. Таким образом, результат, показанный в этой статье, может быть связан с теми же результатами, что и в работе. [50]. Однако измерения в работе [60] не находились на самых высоких этажах, а изоляция воздушного шума измерялась в готовых зданиях с правильной нагрузкой, где была обнаружена разница на каждый этаж. Кроме того, корреляция между количеством этажей и нагрузкой дает хороший результат в этой статье в диапазоне частот для пути Стена-Стена и, в частности, для T-образных соединений с частотой выше 200 Гц. Напротив, такая же точность корреляции не обнаружена для двух других путей, что может быть больше связано с результатами в работе. [50]. Следовательно, кривые средних значений, представленные на рисунке A1, можно использовать при оценке снижения звукоизоляции и необходимости дополнительной обработки нижних этажей здания.

Однако их следует использовать с некоторой осторожностью, поскольку они представляют собой полевые измерения и были проверены только одним оператором в четырех зданиях. Дополнительные измерения соединения в готовых зданиях для каждого этажа необходимы для получения более точных оценок. Сюда входят измерения, в которых разница в количестве историй превышает в-четвертых, чтобы увидеть, аналогичен ли эффект для еще более высоких высотных зданий, чем те, которые были измерены. В этой статье.

5. Выводы

Целью данного исследования было оценить индекс снижения вибрации нескольких CLT. Здания с различными деталями соединений на разных этажах, основанные на измерениях на месте. Измерения в этом исследовании показывают, что количество этажей или нагрузка имеют негативное влияние на показатель снижения вибрации стыков в зданиях CLT. более высокий. Ниже ожидается боковая звукопередача и снижение звукоизоляции. здание. Это утверждение подтверждается измерениями нескольких зданий с различными типы соединений, как показано на рисунке 3. Также та же тенденция наблюдается для соединений без упругие прослойки. Таким образом, количество этажей или нагрузка является основным фактором для эффект высоты здания, а не разница в жесткости упругих прослоек. Измерения оценивались между двух- и четырехэтажными перепадами, где отдельные пары переходов для тракта Стена-Стена могут отличаться более чем на 10 дБ в индекс снижения вибрации для определенных частот третьей октавной полосы. Кроме того, среднее разница на этаж для пути Стена-Стена была рассчитана как 1,0 дБ для Х-переходов. и 1,6 дБ для Т-образных соединений, при этом ниже снижается показатель снижения вибрации. в здании. Если несколько боковых путей влияют на звукоизоляцию и если здание имеет несколько историй, эти факторы могут существенно повлиять на конечный результат. Следовательно, количество этажей или нагрузку необходимо учитывать на этапе проектирования для акустические процедуры.

Вклад авторов: Методология, ЕН; формальный анализ, ЭН; расследование, ЕН; письмо — оригинал подготовка проекта, ЕН; написание — обзор и редактирование, ЕН; визуализация, АН; обзор, СМ, БД и КХ; супервизия, СМ и БД. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукопись.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: различия в индексе снижения вибрации, представленные в этом исследовании. доступны по запросу у соответствующего автора. Данные не являются общедоступными из-за конфиденциальности.

Благодарности: Авторы благодарны за доступ к строительным площадкам и данным о нагрузках.

предоставлены различными строительными компаниями, в том числе Timrates. различными строительными компаниями, включая Timrates. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Конфликты интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Приложение

Frequency Hz	T-junction dB	X-junction dB	Frequency Hz	T-junction dB	X-junction dB
50	-0.0	1.6	50	0.0	1.6
63	-1.8	1.6	63	-1.3	1.4
80	-0.1	0.3	80	-0.0	0.2
100	1.0	0.4	100	0.7	0.3
125	0.3	1.3	125	0.2	1.1
160	1.3	0.5	160	1.0	0.6
200	2.6	0.0	200	1.9	-0.2
250	2.2	0.8	250	1.6	0.6
315	2.8	0.9	315	2.1	0.7
400	2.9	0.7	400	2.1	0.6
500	3.5	1.1	500	2.6	1.0
630	1.6	0.7	630	1.2	0.8
800	3.9	0.9	800	2.8	1.1
1000	3.9	1.3	1000	2.9	1.5
1250	4.4	1.1	1250	3.3	1.3
1600	3.9	1.3	1600	2.9	1.3
2000	3.3	1.1	2000	2.4	1.2
2500	2.5	1.6	2500	1.8	1.7
3150	2.3	1.5	3150	1.7	1.7
4000	2.6	1.3	4000	1.9	1.5
5000	2.2	0.8	5000	1.6	1.0

(a)

(b)

Рисунок A1. Подробные данные для средних прогнозируемых значений. (а) Данные для черных кривых, показанных на рисунке 8, для корреляции с нагрузкой; (б) данные для черных кривых, показанных на рисунке 11, для корреляции с количеством этажей. Рисунок A1. Подробные данные для средних прогнозируемых значений. (а) Данные для черных кривых, показанных на рисунке 8, для корреляции с нагрузкой; (б) данные для черных кривых, показанных на рисунке 11, для корреляции с количеством историй.

Рисунок A1. Подробные данные для средних прогнозируемых значений. (а) Данные для черных кривых, показанных на рисунке 8, для корреляции с нагрузкой; (б) данные для черных кривых, показанных на рисунке 11, для корреляции с количеством этажей.

Приложение Б
Приложение Б

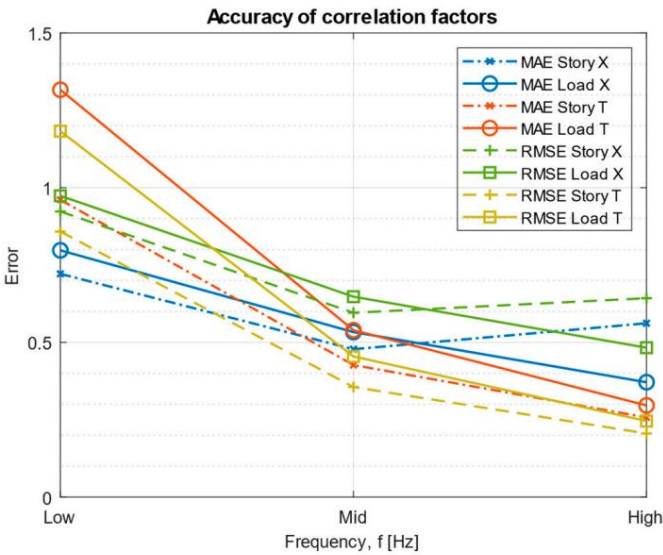


Рисунок A2. Статистический анализ различных факторов корреляции с RMSE и MAE как для X, так и для T-переходов пути Стена-Стена. X-образные и T-образные соединения пути Стена-Стена.

Таблица A1. Данные по упругим прослойкам, использованным в измеренных вертикальных стыках для различных проектов между элементами CLT. В проекте А используется смешанный ячеистый полиэфируретан; проекты Б и С используют смешанный пористый полиуретан.

Проект и стена Тип	Толщина историй		Статический модуль упругости		Динамический модуль упругости
проекта А, межд. стена	5–6	6 мм	1,64 Н/мм2 (1)		3,63 Н/мм2 (1)
1 Проект А, внутр. стена	9–10	6 мм	0,453 Н/мм2 (1)		1,06 Н/мм2 (1)
1 Проект А, внутр. стена	5–6	6 мм	8,16 Н/мм2 (1)		21,5 Н/мм2 (1)
2 Проект А, внутр. стена	9–10	6 мм	0,931 Н/мм2 (1)		2,27 Н/мм2 (1)
2 Проект А, фасад	5–6	6 мм	4,57 Н/мм2 (1)		10,4 Н/мм2 (1)
Проект А, фасад	9–10	мм 25	0,861 Н/мм2 (1) 6		1,86 Н/мм2 (1)
Проект Б, межд. стена	2–3	мм 7,23 Н/мм2 (2) 25 мм	0,83 Н/мм2		11,08 Н/мм2 (1)
Проект Б, межд. стена	5–6	(2) 12 мм	3,36 Н/мм2 (2) 12 мм	0,83	1,52 Н/мм2 (1)
Проект С, фасад	1–2	Н/мм2 (2) - (3)			5,42 Н/мм2 (1)
Проект С, фасад	3–4				1,52 Н/мм2 (1)
Проект Д, внутр. стена	2–3	- (3)			- (3)
Проект Д, межд. стена	5–6	- (3)	- (3)		- (3)

(1) Метод испытаний согласно DIN 53513. (2) Рассчитывается производителем как первая производная статической нагрузки. кривая отклонения. (3) В вертикальных стыках не использовались упругие прокладки.

Рекомендации

1. ФПИновации. Канадский справочник CLT; Караджабейли Э., Ганьон С., ред.; FPInnovations: Пуэнт-Клер, королевский адвокат, Канада, 2019 г.; Том 1.

2. Барбер, Д. Пожарная безопасность массивных деревянных зданий с CLT в США. Наука о древесном волокне. 2018, 50, 83–95. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

3. Барбер, Д. Высотные деревянные здания: что дальше в области пожарной безопасности? Пожарная Технол. 2015, 51, 1279–1284. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

4. Барбер, Д.; Раккаускайте, Э.; Кристенсен, Э.; Шульц, Дж. Открытая массивная древесина в высотных конструкциях: практическое обсуждение Сложная проблема пожара. СТВУН J. 2022, 1, 32–39.

5. Герней, Т.; Ни, С. Деревянные высотные здания и пожарная безопасность; Всемирная ассоциация производителей стали: Брюссель, Бельгия, 2020 г.; п. 119.

6. Горская, К.; Идальго, JP; Тореро, Дж. Л. Динамика пожара в массивных деревянных отсеках. Огонь Саф. J. 2021, 120, 103098. [\[CrossRef\]](#)

7. Хаяжне, С.М.; Насер, Дж. Распространение пожара в многоэтажном деревянном здании, исследование CFD. Жидкости 2023, 8, 140. [\[CrossRef\]](#)

8. Лазарини, Э.; Фрисон, Г.; Труталли, Д.; Марчи, Л.; Скотта, Р. Оценка комфорта высотных деревянных зданий, подвергающихся воздействию вибрации, вызванные ветром. Структура. Дес. Высокая спец. Строить. 2021, 30, 1882. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

9. Ли, З.; Цавдаридис, К.Д. Проектирование сейсмостойких конструкций из поперечно-клееной древесины (CLT): обзор исследований, роман Связи, вызовы и возможности. Здания 2023, 13, 505. [\[CrossRef\]](#)

10. Син, З.; Ван, Ю.; Чжан, Дж.; Ма, Х. Сравнительное исследование огнестойкости и толщины слоя нулевой прочности CLT-пола при естественном и стандартном пожаре. Констр. Строить. Матер. 2021, 302, 124368. [\[CrossRef\]](#)
11. Пан Ю.; Таннерт, Т.; Кошик, К.; Сюн, Х.; Вентура, СЕ Сейсмические характеристики предлагаемой гибридной дерево-бетонной системы для высотных зданий. англ. Структура. 2021, 238, 112194. [\[CrossRef\]](#)
12. Потеря, К.; Паччиоли, С.; Поластри, А.; Касагранде, Д.; Поцца, Л.; Смит, И. Численное исследование альтернативных сейсмостойких систем для зданий CLT. Здания 2018, 8, 162. [\[CrossRef\]](#)
13. Вс, Х.; Ли, З.; Он, М. Оценка сейсмической надежности средне- и высотных стеновых конструкций CLT, подвергающихся сдвигу, после натяжения. Межд. J. Высотное здание. 2020, 9, 175–185. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Тевелдебранн, БТ; Тесфамариам, С. Сейсмический расчет сочлененной рамной конструкции из CLT-стены, устойчивой к сдвигу, и клееного бруса. Дж. Структ. англ. 2023, 149, 04023169. [\[CrossRef\]](#)
15. Хонг, Х.П.; Ян С.С. Оценка надежности и хрупкости средне- и высотных деревянных зданий, подвергающихся двуправленному сейсмическому воздействию. англ. Структура. 2019, 201, 109734. [\[CrossRef\]](#)
16. Дернаяк С.; Ахмед, Д.; Асиз, А.; Аядат, Т.; Аджмал, М.; Холшемахер, К.; Куапп, Ю.; Сингх, А.; Яздани, С. Сравнение реакции высотных зданий на ветер с железобетоном и поперечно-клееной древесиной. Учеб. Межд. Структура. англ. Констр. 2022, 9, 21. [\[CrossRef\]](#)
17. Хаджадж, Р.; Альхимейди, А.; Саббах, М.; Алаталлах, А.; Ахмед, Д.; Асиз, А.; Аядат, Т.; Салман, А.; Оуда, ОКМ Структурное проектирование и анализ высотного здания с использованием сверхлегкой системы перекрытий. В материалах Международного структурного проектирования и строительства, Валенсия, Испания, 24–29 июля 2017 г. [\[CrossRef\]](#)
18. Байрик, В. Лабораторные данные по изучению воздействия и ослабления воздушного шума при строительстве панелей из поперечно-клееной древесины. В материалах InterNoise 2015, Сан-Франциско, Калифорния, США, 9–12 августа 2015 г.
19. Голден, М.; Байрик, В. Лабораторные данные по изучению воздействия и ослабления воздушного шума в поперечно-клееных деревянных панелях Строительство. Часть 2. В материалах выставки InterNoise 2016, Гамбург, Германия, 21–24 августа 2016 г.
20. Байрик, В. Лабораторное воздействие и ослабление воздушного шума в конструкциях из клееной древесины с использованием упруго закрепленных потолков и покрытий из заливного бетона. В материалах Недели акустики в Канаде, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, 21–23 сентября 2016 г.
21. Юнгрен Ф. Инновационные решения по улучшению звукоизоляции CLT-полов. Дев. Построен Энвайрон. 2023, 13, 100117. [\[CrossRef\]](#)
22. Хиндман, Д. П.; Голден, М.В. Акустические свойства панелей из поперечно-клееной древесины южной сосны. Дж. Архит. англ. 2020, 26, 05020004. [\[CrossRef\]](#)
23. Ферк, Х.; Лех, К.; Мосинг, М.; Касим, Дж.; Ваврик-Кирхштайгер, С.; Нуссер, Б. Sound.Wood.Austria — Избранные результаты измерений строительных компонентов многоэтажного деревянного строительства в Австрии. В материалах InterNoise 2022, Глазго, Великобритания, 21–24 августа 2022 г.
24. Бересфорд, Т.; Чен, Дж. Характеристики изоляции воздушного и ударного шума пола поперечно-клееной древесины по сравнению с деревянными балками и бетонными системами. В материалах конференции HEAR TO LISTEN — Acoustics Adelaide, Аделаида, Австралия, 6–9 ноября 2018 г.
25. Хеллер, К.; Ман, Дж.; Кирт, Д.; Шенвальд, С.; Цейтлер, Б. RR-335 Видимая звукоизоляция в зданиях из поперечно-клееной древесины; Национальный исследовательский совет Канады: Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, 2017 г.
26. Вардакис, Н.-Г.; Бард Хагберг, Д.; Дальстрем, Дж. Оценка лабораторных измерений звукоизоляции поперечно-ламинированных материалов Деревянные полы (CLT): конфигурации в легких зданиях. Прил. наук. 2022, 12, 7642. [\[CrossRef\]](#)
27. Сабурен И.; Маккартни, К. Измерение изоляции воздушного шума 8 стеновых конструкций; Измерение изоляции воздушного и ударного шума 29 перекрытий; Отчет № A1-006070.10; Национальный исследовательский совет Канады: Оттава, Онтарио, Канада, 2015 г.
28. Лориджиола, Ф.; Далл'Аква д'Индустрия, Л.; Гранзотто, Н.; Ди Белла, А. Акустическое поведение конструкции CLT: потери при передаче, изоляция от ударного шума и оценка боковых передач. In Proceedings of the Acoustics 2019, Кейп-Шанк, Виктория, Австралия, 10–13 ноября 2019 г.
29. Хонгисто, В.; Алакойву, Р.; Виртанен Дж.; Хакала, Дж.; Сааринен, П.; Лаукка, Дж.; Линдерхольт, А.; Олссон, Дж.; Ярнеро, К.; Керанен, Дж. Набор данных по звукоизоляции 30 деревянных и 8 бетонных полов, протестированных в лабораторных условиях. Краткий обзор данных 2023, 49, 109393. [\[CrossRef\]](#)
30. Юнгрен, Ф. Прогноз звукоизоляции одинарных и двойных CLT-панелей. В материалах 23-го Международного конгресса по Acoustics, Аахен, Германия, 9–13 сентября 2019 г.
31. Крайчи, Л.; Хопкинс, К.; Дэви, Дж.Л.; Трёбс, Х.-М. Передача воздушного звука поперечно-клееной деревянной плитой с ортотропной жесткостью. В материалах Euronoise, Прага, Чехия, 10–13 июня 2012 г.
32. Фенемор, К.; Кинган, М.; Мейс, Б.Р. Применение волнового метода и метода конечных элементов для прогнозирования акустических характеристик двухстворчатые панели из кросс-ламинированной древесины. Строить. Акуст. 2023, 30, 203–225. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Долезал Ф.; Кумер Н. Упрощенная модель звукоизоляции стен из поперечно-клееной древесины с внешней теплоизоляцией композитные системы. В материалах InterNoise 2019, Мадрид, Испания, 16–19 июня 2019 г.
34. Симмонс, К. Систематическое сравнение расчетов CLT-полов по EN ISO 12354 с большим набором лабораторных и полевых измерений. В материалах EuroNoise 2021, Мадейра, Португалия, 25–27 октября 2021 г.
35. Хагберг, К.; Торссон, П.; Голджер, А.; Бард, Д. SEAP — Инструмент акустического проектирования для Stora Enso Building Solutions. В материалах 22-го Международного конгресса по акустике, Буэнос-Айрес, Аргентина, 5–9 сентября 2016 г.
36. Ди Белла, А.; Гранзотто, Н.; Куартаруоло, Дж.; Сперанца, А.; Моранди, Ф. Анализ индекса снижения воздушного шума голых CLT стены. В материалах WCTE 2018, Сеул, Республика Корея, 20–23 августа 2018 г.
37. Лин, Дж. Я.; Ян, Коннектикут; Цай Ю.С. Исследование звукоизоляционных свойств поперечно-клееной древесины. Материалы 2021, 14, 4144.

[\[Перекрестная ссылка\]](#)

38. Бадер Эддин, М.; Менар, С.; Бард Хагберг, Д.; Куюмджи, Ж.-Л.; Вардакис, Н.-Г. Прогнозирование звукоизоляции с использованием искусственного Нейронные сети. Часть I: Легкие деревянные конструкции пола. *Акустика* 2022, 4, 203–226. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
39. Сантони, А.; Шенвальд, С.; Ван Дамм, Б.; Трёбс, Х.-М.; Фаusti, П. Модель среднего звукового излучения для ортотропного креста Плиты из ламинированной древесины. В материалах EuroRegio 2016, Порту, Португалия, 13–15 июня 2016 г.
40. Сантони, А.; Шенвальд, С.; Фаusti, П.; Трёбс, Х.-М. Моделирование радиационной эффективности ортотропной клееной древесины пластины с свободно опертыми границами. *Прил. Акуст.* 2019, 143, 112–124. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
41. Сантони, А. Звуковое излучение и передача звука в строительных конструкциях: численное моделирование и экспериментальная проверка. Кандидат наук. Диссертация, Феррарский университет, Феррара, Италия, 2016 г.
42. Сантони, А.; Бонфиглио, П.; Фаusti, П.; Шенвальд, С. Прогнозирование эффективности звукового излучения и потерь звукопередачи в ортотропных поперечно-ламинированных деревянных панелях. В материалах 173-го собрания Акустического общества Америки и 8-го Forum Acusticum, Бостон, Массачусетс, США, 25–29 июня 2017 г. [\[CrossRef\]](#)
43. Ян, Ю.; Фенемор, К.; Кинган, М.; Мейс, Б.Р. Анализ виброакустических характеристик поперечно-клееных деревянных панелей с использованием волнового метода и метода конечных элементов. *Дж. Звук Виб.* 2021, 494, 115842. [\[CrossRef\]](#)
44. Рабольд А.; Шатовье-Хельвиг, К.; Мекинг, С.; Шрамм, М. Фланговая передача элементов из цельной древесины в многоэтажных деревянных зданиях - входные данные и модели прогнозирования воздушного и ударного звукового возбуждения. В материалах InterNoise 2019, Мадрид, Испания, 16–19 июня 2019 г.
45. Нойссер, М.; Беднар, Т. Детали конструкции, влияющие на боковую передачу в конструкциях из поперечно-клееной древесины для многоэтажных домов. В материалах InterNoise 2022, Глазго, Великобритания, 21–24 августа 2022 г. [\[CrossRef\]](#)
46. Сперанца, А.; Барбарези, Л.; Моранди, Ф. Экспериментальный анализ фланкирующей передачи различных систем соединения для CLT панели. В материалах WCTE 2016, Вена, Австрия, 22–25 августа 2016 г.
47. Шенвальд, С.; Цейтлер, Б.; Сабурен И. Анализ передачи структурного звука в местах соединения двойных стен из массива дерева со сплошными перекрытиями. В материалах Forum Acusticum, Краков, Польша, 7–12 сентября 2014 г.
48. Шенвальд, С.; Кумер, Н.; Видерин, С.; Блейхер, Н.; Фуррер, Б. Применение эластичных прокладок на стыках массивных деревянных зданий. В материалах 23-го Международного конгресса по акустике, Аахен, Германия, 9–13 сентября 2019 г.
49. Ди Белла, А.; Далл'Аква д'Индустрия, Л.; Валлуцци, МР; Пенго, А.; Барбарези, Л.; Ди Нокко, Ф.; Моранди, Ф. Фланговая передача в зданиях CLT: сравнение измерений индекса снижения вибрации для различных условий монтажа. В материалах InterNoise 2019, Мадрид, Испания, 16–19 июня 2019 г.
50. Шенвальд, С.; Цейтлер, Б.; Сабурен, И.; Кинг, Ф. Звукоизоляционные характеристики строительных систем из поперечно-клееного бруса. В материалах InterNoise 2013, Инсбрук, Австрия, 15–18 сентября 2013 г.
51. Перес, М.; Фуэнте, М. Акустический расчет с помощью методов прогнозирования в панельных конструкциях из поперечно-клееной древесины (CLT) для зданий. В материалах InterNoise 2013, Инсбрук, Австрия, 15–18 сентября 2013 г.
52. Гигу Картер, К.; Баланант, Н.; Куюмджи, Ж.-Л. Исследование акустических характеристик трехэтажного здания на основе CLT. *Дома* 2023, 13, 213–222. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
53. Моранди, Ф.; Де Сезарис, С.; Гарай, М.; Барбарези, Л. Измерение боковой передачи для характеристики и классификации соединений поперечно-клееной древесины. *Прил. Акуст.* 2018, 141, 213–222. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
54. Мекинг, С.; Крузе, Т.; Шанда, У. Измерение и расчет передачи звука через стыки элементов здания из цельной древесины. В материалах 10-го Европейского конгресса и выставки по технике контроля шума (EuroNoise), Маастрихт, Нидерланды, 1–3 июня 2015 г.
55. Криспин, К.; Ингеларе, Б.; Ван Дамм, М.; Вуйтс, Д. Индекс снижения вибрации Kij: лабораторные измерения для жестких соединений и соединений с гибкими прослойками. *Строить. Акуст.* 2006, 13, 99–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#) 56. Эквист Р.; Юнггрен, Ф.; Огрен, А. Изменения в звукоизоляции в номинально идентичных сборных легких деревянных конструкциях. *Строить. Акуст.* 2010, 17, 91–103. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
57. Бард, Д.; Дэвидссон, П.; Вернберг, П.-А. Исследование шума и вибрации в многоквартирном деревянном каркасном доме. В Про-материалы 20-го Международного конгресса по акустике, Сидней, Австралия, 23–27 августа 2010 г.
58. Хёрнмарк, Дж. Акустические характеристики стыков в конструкциях из поперечно-клееной древесины. Магистерская диссертация, Университет Чалмерса технологий, Гетеборг, Швеция, 2019.
59. ИСО 10848-1; Акустика — лабораторное и полевое измерение фланговой передачи звука воздушного, ударного и строительного оборудования между соседними помещениями. Часть 1: Рамочный документ. Международная организация по стандартизации: Женева, Швейцария, 2019 г.
60. Нильссон Э.; Менар, С.; Бард, Д.; Хагберг, К. Влияние высоты здания на передачу звука в зданиях из поперечно-клееной древесины — изоляция воздушного шума. *Строить. Окружающая среда.* 2023, 229, 109985. [\[CrossRef\]](#)
61. Мурта, Б.; Хеллер, К.; Сабурен, И.; Зейтлер, Б. Измерение времени структурной реверберации для расчета ASTC в предстоящем NBCC. В материалах Акустической недели в Канаде 2014 г., Виннипег, МБ, Канада, 8–10 октября 2014 г. [\[CrossRef\]](#)
62. Битц, Х.; Виттсток, В. Сравнение различных методов определения времени реверберации структурного шума. В материалах CFA-DAGA'04, Страсбург, Франция, 22–25 марта 2004 г.
63. Нильссон Э.; Менар, С.; Хагберг, Д.Б.; Хагберг, К. Влияние направления подшивника и методов монтажа на элементы из поперечно-ламинированной древесины в полевых условиях. В материалах InterNoise 2022, Глазго, Великобритания, 21–24 августа 2022 г. [\[CrossRef\]](#)
64. ИСО 3382-2; Акустика — измерение акустических параметров помещения. Часть 2: Время реверберации в обычных помещениях. Международная организация по стандартизации: Женева, Швейцария, 2008 г.

65. Хопкинс, К.; Робинсон, М. Об оценке кривых затухания для определения времени структурной реверберации для элементов здания.

Акта Акуст. Юнайтед Акуст. 2013, 99, 226–244. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

66. Понтий, Р.Г.; Тонттех, О.; Чен, Х. Компоненты информации для сравнения нескольких разрешений между общими картами.

реальная переменная. Окружающая среда. Экол. Стат. 2007, 15, 111–142. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

67. Хопкинс, К. Звукоизоляция, 1-е изд.; Рутледж: Лондон, Великобритания, 2007 г.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и участникам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.