

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

UDC 674.214

Askarbek M.J., Kurmanbekova E.B. Development of an energy-efficient wooden window unit made of three-layer glued laminated timber with an integrated XPS thermal insulation insert

Разработка энергоэффективного деревянного оконного блока из трехслойного клееного бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой XPS

Askarbek Madina Jarkynbekkyzy,

Master's student, International Educational Corporation, Kazakhstan, Almaty

Kurmanbekova Elmira Bazarbaevna,

Associate Professor, International Educational Corporation, Kazakhstan, Almaty

Аскарбек Мадина Жаркынбеккызы,

магистрант, Международная образовательная корпорация, Казахстан, г. Алматы

Курманбекова Эльмира Базарбаевна,

ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация,

Казахстан, г. Алматы

Abstract. *An effective approach to improving the energy efficiency of window units based on laminated timber with an integrated XPS thermal insulation insert and a triple-glazed unit has been developed. The use of laminated timber increases the strength and dimensional stability of the frame, while the integrated thermal insulation insert reduces heat loss by reducing the thermal conductivity of the profile. It is known that the thermal insulation properties of window structures depend not only on the characteristics of the insulating glass unit but also on the material of the frame profiles, their geometry, and the adhesion quality of the layers. In wooden window units, strength and durability are achieved through the use of laminated timber, but the overall energy efficiency of the structure is determined by the interaction between the thermal insulation insert and the frame profile. Research has shown that the use of the XPS insert significantly reduces thermal conductivity and creates additional thermal insulation zones at the joints, improving the thermal insulation of the entire unit. The integration of a triple-glazed unit with an optimized frame system improves thermal resistance and acoustic comfort in the premises. The proposed window unit design combines the high strength of a wooden profile with increased energy efficiency, making the structure suitable for use in low-rise and energy-efficient construction.*

Keywords: *wooden window unit, laminated timber, extruded polystyrene foam, triple-glazed unit, argon filling, heat transfer, thermal insulation, sound insulation.*

Аннотация. *Разработан эффективный подход к повышению энергоэффективности оконных блоков на основе деревянного многослойного клееного бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой XPS и трёхкамерным стеклопакетом. Вследствие использования многослойного бруса обеспечивается повышение прочности и стабильности геометрических размеров рамы, а интегрированная теплоизоляционная вставка снижает теплопотери за счёт уменьшения теплопроводности профиля. Известно, что теплоизоляционные свойства оконных конструкций зависят не только от характеристик стеклопакета, но и от материала рамных профилей, их геометрии и качества сцепления слоёв. В деревянных оконных блоках прочность и долговечность достигаются за счёт многослойного бруса, однако общая энергоэффективность конструкции определяется взаимодействием теплоизоляционной вставки и рамного профиля. В результате исследований установлено, что применение вставки XPS обеспечивает значительное снижение теплопроводности и формирует дополнительные зоны термоизоляции в местах соединений, что улучшает теплоизоляцию всего блока. Интеграция трёхкамерного стеклопакета с оптимизированной рамной системой позволяет повысить сопротивление теплопередаче и*

акустический комфорт помещений. Предложенный способ конструирования оконного блока обеспечивает сочетание высокой прочности деревянного профиля с повышенной энергоэффективностью, что делает конструкцию пригодной для применения в малоэтажном и энергоэффективном строительстве.

Ключевые слова: *деревянный оконный блок, клееный брус, экструзионный пенополистирол, трехкамерный стеклопакет, аргоновое заполнение, теплопередача, теплоизоляция, звукоизоляция.*

Введение

В последние годы в строительной отрасли быстро развивается экологически ориентированная «зеленая» тенденция, обусловленная ограниченной доступностью традиционных энергетических ресурсов и необходимостью повышения энергоэффективности зданий. Поскольку жилые здания потребляют значительное количество энергии, снижение теплотерь через ограждающие конструкции здания является критически важной задачей для обеспечения устойчивого развития и повышения теплового комфорта [1, 10].

Оконные системы существенно влияют на энергоэффективность зданий: они обеспечивают естественное освещение и вентиляцию, но при этом выступают одним из основных источников тепловых потерь [10, 13]. В отличие от непрозрачных элементов конструкции, окна обладают повышенной теплопроводностью вследствие наличия стеклопакета, рамных профилей и монтажных соединений [13]. Даже при применении современных стеклопакетов значительные теплотери наблюдаются в зонах тепловых мостов, особенно в местах угловых соединений рам и в узлах примыкания [2, 14, 15].

Тепловые характеристики окон в значительной степени зависят от материала и конструкции профиля рамы. Древесина является перспективным материалом благодаря низкой теплопроводности, экологичности и благоприятным механическим свойствам [11, 20]. Теплопроводность древесины варьируется в зависимости от направления волокон и плотности, поэтому это необходимо учитывать при проектировании конструкций [12]. Использование клееного многослойного бруса повышает геометрическую стабильность и долговечность оконных систем за счет снижения внутренних напряжений и деформаций [4, 12].

Исследования последних лет направлены на повышение энергоэффективности окон за счет совершенствования как стеклопакетов, так и рамных конструкций. Экспериментальные работы показывают, что конфигурация стеклопакета и конструкция рамы оказывают существенное влияние на теплопередачу и звукоизоляцию [5, 7]. Одним из перспективных направлений является интеграция теплоизоляционных материалов в структуру рамы, что позволяет снизить теплопередачу за счет разрыва теплового

потока при сохранении прочностных характеристик [6, 8].

Несмотря на значительное количество исследований отдельных элементов оконных систем, большинство из них рассматривает стеклопакеты, материалы рам и теплоизоляцию отдельно [10, 11]. Комплексные решения которые учитывают их совместное влияние, остаются недостаточно изученными. В связи с этим актуальной задачей является разработка деревянных оконных конструкций с повышенными тепло- и звукоизоляционными характеристиками при сохранении конструкционной надежности [3, 18].

Обзор литературы

Оконные конструкции являются одними из наиболее уязвимых элементов ограждающей оболочки здания с точки зрения теплотехнических и акустических характеристик. Согласно исследованию [25], через оконные проемы может теряться до 25 % суммарной тепловой энергии даже при наличии высокоэффективной теплоизоляции стен и кровли. Одновременно с этим, в современных городах с высокой плотностью застройки и интенсивным движением транспорта, остро стоит вопрос эффективной звукоизоляции помещений [7].

Автор [22] указывает, что улучшение тепло- и звукоизоляционных свойств оконных систем достигается за счет использования многослойных стеклопакетов с низкоэмиссионным покрытием (Low-E) и заполнением камер инертными газами (аргон, криптон, ксенон). Исследования [26, 27] показывают, что вакуумное остекление, при малой толщине конструкций, способно обеспечить коэффициент теплопередачи $0,4-0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Однако высокая стоимость производства и технологическая сложность вакуумных стеклопакетов в настоящее время ограничивают их широкое применение в массовом жилищном строительстве.

Помимо систем остекления, ряд исследований подчеркнули важность конструкции оконной рамы для обеспечения высокой теплоизоляции. Согласно исследованиям авторов [21, 3], тепловые характеристики деревянных оконных рам значительно различаются в зависимости от породы древесины, ориентации волокон и конфигурации профиля конструкции.

Исследования, представленные в работах [5, 28], демонстрируют, что использование ламинированного стекла с акустическими полимерными промежуточными прослойками эффективно повышает индекс изоляции воздушного шума, достигая значений в диапазоне 36-40 дБ. В работе [29], общая звукоизоляционная способность оконных блоков зависит не только от характеристик самого стеклопакета (толщины и состава), но и от таких факторов, как жесткость оконной рамы,

герметичностью соединений и качеством монтажа оконного блока.

Согласно исследованию [24], эластичность и воздухо непроницаемость уплотнительных материалов поддерживаются в значительном температурном интервале (обычно от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это обеспечивает компенсацию деформаций древесины и предотвращает нежелательные утечки воздуха. Нарушение целостности или ухудшение свойств уплотнительных элементов может привести к существенному снижению эксплуатационных характеристик даже самых высокоэффективных стекольных систем.

Исследования [21, 24] показывают, что при влажности древесины порядка 12% коэффициент теплопроводности хвойных пород находится в диапазоне $0,10 - 0,17\text{ Вт} \cdot \text{м} - 1 \cdot \text{К} - 1$, а для некоторых лиственных пород он составляет $0,15 - 0,21\text{ Вт} \cdot \text{м} - 1 \cdot \text{К} - 1$. Эти значения существенно уступают показателям теплопроводности металлических материалов, часто используемых в оконных конструкциях.

При изготовлении современных оконных конструкций широко используется клееная древесина, которая формируется из нескольких слоев древесины. Ориентация волокон в этих слоях чередуется, что обеспечивает высокую структурную прочность. Такой подход позволяет значительно улучшить стабильность геометрических размеров изделий, уменьшить остаточные внутренние напряжения и снизить вероятность проявления естественных пороков, присущих цельной древесине [3].

Важной характеристикой древесины является ее относительно низкий линейный коэффициент теплового расширения. Этот показатель составляет порядка $\alpha \approx (5 - 6) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Для сравнения, аналогичные полимерные материалы, такие как ПВХ, обладают значительно более высоким коэффициентом теплового расширения, достигающим $\alpha \approx 70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [23]. Это делает деревянные рамы более устойчивыми к температурным колебаниям.

С точки зрения конструктивных особенностей, деревянные оконные рамы обладают достаточной прочностью, чтобы выдерживать установку двойных стеклопакетов малого и среднего размера без использования дополнительного металлического усиления. В работе [21], установлено, что пластиковые оконные конструкции нуждаются в стальных вкладышах, которые, в свою очередь, могут создавать участки с повышенной теплопроводностью, негативно сказываясь на общих теплоизоляционных свойствах всей конструкции.

Анализ устойчивости деревянных окон, представленный в источнике [22], свидетельствует об их положительном влиянии на окружающую среду, при условии правильной обработки и эксплуатации. Для обеспечения долговечности и защиты от неблагоприятных факторов, таких как влага, биологическое поражение и

климатические воздействия, требуется качественная обработка поверхности защитными составами, такими как краски и лаки.

Несмотря на значительный прогресс в области оконных технологий, анализ литературы выявляет ряд сохраняющихся проблем. В регионах с континентальным климатом и резкими сезонными колебаниями температуры особое значение приобретает правильный выбор пород древесины, клеевых составов, защитных покрытий и уплотнительных материалов. В целом проведенный анализ показывает, что требуется дальнейшая оптимизация конструкций деревянных оконных систем для достижения баланса между тепловыми и акустическими характеристиками, долговечностью и экономической эффективностью в условиях конкретных климатических регионов.

Все это позволяет утверждать о необходимости разработки энергоэффективного деревянного оконного блока из трехслойного клееного бруса с целью улучшения тепло- и шумоизоляционных характеристик.

Материалы и методы

Клееный брус представляет собой конструкционный материал, получаемый путем склеивания отдельных ламелей древесины под давлением. В настоящем исследовании использовался трехслойный клееный брус из хвойных пород древесины (сосна) с чередующейся ориентацией волокон. Общая толщина рамного профиля составляла 92 мм. Многослойная структура обеспечивает высокую геометрическую стабильность, снижает вероятность коробления и растрескивания при изменении температурно-влажностных условий эксплуатации, а также повышает долговечность конструкции [4, 12].

В качестве теплоизоляционного материала применялся экструдированный пенополистирол (XPS) с закрытой ячеистой структурой. Материал характеризуется низкой теплопроводностью ($\lambda = 0,030-0,035$ Вт/(м·К)), высокой влагостойкостью и стабильностью теплоизоляционных свойств при длительной эксплуатации. В исследуемых оконных блоках XPS использовался в виде вставки толщиной 30 мм, размещенной в фрезерованной полости центральной части рамного профиля, что обеспечивало разрыв теплового потока через конструкцию [8] (рисунок 4).



Рисунок 4 – Экструдированный пенополистирол (XPS), используемый в качестве теплоизоляционной вставки в конструкции оконного блока

Светопрозрачная часть окон выполнялась в виде стеклопакета, состоящего из четырех стекол и трех межстекольных камер, заполненных аргоном. Общая толщина стеклопакета составляла 44 мм. Применение многокамерной конструкции и инертного газа позволяет снизить коэффициент теплопередачи и повысить звукоизоляционные характеристики оконной системы [5, 10].

Гипотеза исследования заключалась в том, что интеграция теплоизоляционной вставки непосредственно в центральную часть многослойного клееного бруса позволит снизить теплопередачу через рамный профиль за счет разрыва теплового потока при сохранении несущей способности конструкции. Одновременно предполагалось, что оптимизация геометрии профиля, а также выбор материалов и конструктивных решений будет способствовать улучшению акустических характеристик оконной системы.

В рамках настоящего исследования были разработаны и проанализированы три конструкции деревянных оконных блоков:

1. Оконный блок из цельной древесины.
2. Оконный блок из трехслойного клееного бруса с двухкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном.
3. Оконный блок из трехслойного клееного бруса с теплоизоляционной вставкой из экструдированного пенополистирола (XPS) и трехкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном.

Основной целью разработки данных конструкций являлось определение влияния

материала рамного профиля и типа стеклопакета на звукоизоляционные и теплотехнические характеристики оконного блока.

Первая исследуемая конструкция представляет собой традиционный оконный блок из цельной древесины (рисунок 1). Рамный профиль изготовлен из массива сосны. Данный тип конструкции широко применяется в деревянном домостроении благодаря высокой прочности и экологичности материала. Однако цельная древесина обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с многослойными конструкциями и может создавать тепловые мостики в зоне оконного профиля [2].

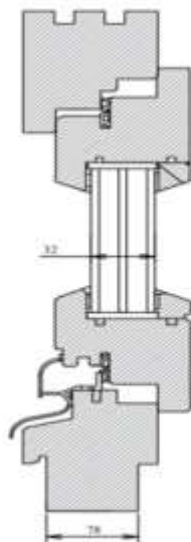


Рисунок 1 - Конструкция оконного блока из цельной древесины

Вторая конструкция представляет собой оконный блок из трехслойного клееного бруса (рисунок 2). Клееная древесина обладает высокой геометрической стабильностью, устойчивостью к деформациям и меньшей вероятностью образования трещин по сравнению с цельной древесиной. Многослойная структура клееного бруса позволяет равномерно распределять внутренние напряжения и повышает долговечность оконной конструкции [4], [12].

В данной конструкции используется двухкамерный стеклопакет, заполненный аргоном. Применение инертного газа в межстекольных камерах уменьшает теплопередачу за счет снижения конвективных потоков внутри стеклопакета [10].

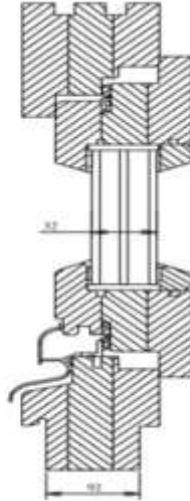


Рисунок 2 - Конструкция оконного блока из трехслойного клееного бруса

Третья конструкция представляет собой усовершенствованный оконный блок, в котором используется трехслойный клееный брус с дополнительной теплоизоляционной вставкой из XPS внутри рамного профиля (рисунок 3). Экструдированный пенополистирол обладает низкой теплопроводностью ($0,029-0,034 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), что позволяет значительно уменьшить тепловой поток через рамный профиль [8].

Кроме того, в данной конструкции применяется трехкамерный стеклопакет, состоящий из четырех стекол и трех межстекольных камер, заполненных аргоном. Увеличение количества стекол и камер стеклопакета приводит к снижению теплопередачи и повышению звукоизоляционных характеристик оконной системы [5].

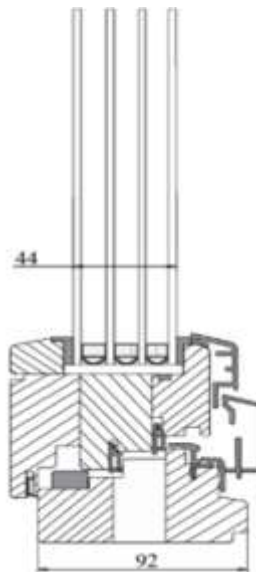


Рисунок 3 - Конструкция оконного блока из клееного бруса с теплоизоляционной вставкой XPS и трехкамерным стеклопакетом

Основные параметры исследуемых конструкций представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых оконных блоков

№ образца	Тип оконного блока	Материал рамы	Тип стеклопакета	Газ в камерах	Толщина профиля, мм
W1	Окно из цельной древесины	Массив сосны	Двухкамерный	Воздух	78
W2	Окно из клееного бруса	Трехслойный клееный брус	Двухкамерный	Аргон	92
W3	Окно из клееного бруса с XPS	Трехслойный клееный брус + XPS	Трехкамерный	Аргон	92

Акустические измерения проводились с использованием генератора широкополосного шума, акустических колонок (50–5000 Гц), измерительных микрофонов первого класса точности, третьоктавных фильтров и шумомера Venetech GM1358. Калибровка оборудования выполнялась в соответствии со стандартами IEC 61672-1:2014, IEC 60942:2003 и ISO 3382-2:2008.

Лабораторные испытания проводились в двух смежных помещениях, между которыми устанавливался исследуемый оконный блок. В одном помещении формировалось звуковое поле, в другом регистрировались уровни звукового давления. Измерения выполнялись в диапазоне частот 100–3150 Гц с использованием различных схем размещения микрофонов и последующим усреднением результатов. Учитывались параметры окружающей среды и уровень фонового шума.

Натурные испытания проводились в условиях реальной эксплуатации. Оконные блоки монтировались в проёмы здания с технологическим зазором около 10 мм, заполненным герметиком. Измерения выполнялись с наружной и внутренней сторон здания в контрольных точках на высоте 1,5 м.

Звукоизоляционные характеристики определялись по разности уровней звукового давления:

$$R = L_1 - L_2,$$

где L_1 — уровень звукового давления в источнике шума, дБ; L_2 — уровень в приёмном помещении, дБ.

Теплотехническая эффективность оценивалась по приведённому коэффициенту теплопередачи окна U_w , рассчитываемому с учётом вклада остекления, рамного профиля и линейных тепловых мостов:

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \psi \cdot L}{A_g + A_f}$$

где:

A_g — площадь остекления, м²;

A_f — площадь рамного профиля, м²;

U_g — коэффициент теплопередачи стеклопакета, Вт/(м²·К);

U_f — коэффициент теплопередачи рамного профиля, Вт/(м²·К);

L — длина линии контакта стеклопакета и рамного профиля, м;

ψ — линейный коэффициент теплопередачи в зоне примыкания стеклопакета к раме, Вт/(м·К).

Расчёт выполнялся в соответствии со стандартом EN ISO 10077-1 [2, 10] с последующим сравнительным анализом полученных результатов для исследуемых конструкций.

Результаты и обсуждения

Результаты лабораторных измерений звукоизоляции исследуемых оконных блоков со стороны приемного помещения (комната высокого уровня) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Лабораторные измерения (комната высокого уровня): уровни в приемном помещении

№ образца	Исходный уровень, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1 (цельная древесина + 2-камерный СП, Ar)	77	62,8	62,4	62,6	14,4
W2 (3-сл. клееный брус + 2-камерный СП, Ar)	77	58,6	58,1	58,4	18,3
W3 (3-сл. клееный брус + XPS 20 мм + 3-камерный СП, Ar)	77	53,5	53,0	53,3	23,6

Анализ данных из Таблицы 2 демонстрирует, что замена стандартного окна из массива дерева (W1) на конструкцию из трехслойного клееного бруса (W2) приводит к увеличению среднего показателя шумоподавления примерно на 3.9 дБ, поднимая его с 14.4 до 18.3 дБ. Этот результат подтверждает общепринятое мнение о первостепенной важности сохранения формы профиля и качества уплотнительных элементов в деревянных окнах для эффективности воздушной звукоизоляции. Причина кроется в том, что потери звука через щели сравнялись по величине с потерями, обусловленными стеклопакетом [7], а клееный брус, как материал, гарантирует повышенную структурную стабильность [12].

Наилучшие акустические характеристики, выраженные в показателе ΔL , были достигнуты для образца W3 (23.6 дБ). Этот результат обусловлен комплексным воздействием нескольких факторов: во-первых, использовалось более массивное многослойное остекление (трехкамерный стеклопакет); во-вторых, удалось уменьшить передачу вибраций через каркас профиля благодаря целенаправленным изменениям в акустической жесткости, массе и демпфировании; в-третьих, снизилась подверженность конструкции влиянию температурных мостов и деформаций в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, позитивно сказалось на герметичности притворов [2, 5, 6].

Результаты повторных лабораторных измерений со стороны приемного помещения (комната низкого уровня) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Лабораторные измерения (комната низкого уровня): уровни в приемном помещении

№ образца	Исходный уровень, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1	77	63,2	63,0	62,8	14,0
W2	77	58,9	58,6	58,7	18,2
W3	77	53,9	53,4	53,6	23,4

Сравнительный анализ данных, представленных в Таблицах 2-3, демонстрирует высокую степень воспроизводимости результатов для образцов W1-W3. Отмечается, что максимальное отклонение средних значений ΔL между различными сериями измерений не выходит за пределы 0,4 дБ. Этот факт свидетельствует о стабильности получаемых данных при изменении порядка сборки или перекомпоновке измерительной установки. Таким образом, подтверждается, что основополагающее влияние на наблюдаемые различия оказывают именно конструктивные особенности оконных блоков. Примечательно, что для образцов W1 и W2 зафиксировано несколько большее расхождение между сериями по сравнению с W3. Это явление является ожидаемым для конструкций с менее выраженным акустическим резервом, поскольку в таких случаях даже незначительные неплотности в месте притвора или вариации условий монтажа могут существенно повлиять на конечный результат [7].

Результаты натурных измерений звукоизоляции в условиях внешнего городского шума приведены в таблице 4.

Таблица 4

Натурные измерения: уровни в помещении при воздействии внешнего шума

№ образца	Внешний уровень у фасада, дБ	Точка 1, дБ	Точка 2, дБ	Точка 3, дБ	ΔL (среднее), дБ
W1	74	61,7	62,1	61,9	12,1
W2	74	57,4	57,9	57,6	16,4
W3	74	51,9	52,3	52,1	21,9

Анализ данных, представленных в Таблице 4, демонстрирует, что переход от контролируемой лабораторной среды к реальным условиям эксплуатации приводит к уменьшению средней величины снижения звуковой мощности ΔL . Данное сокращение составляет приблизительно 2-2.5 дБ для всех исследуемых образцов. Такое изменение закономерно, поскольку в натуральных условиях возникают дополнительные, неуправляемые факторы, такие как низкочастотные шумы от транспорта, боковое распространение звука через элементы ограждающих конструкций, а также изменения в спектре излучения источника звука. Кроме того, усиливается влияние стыковых соединений и примыканий [7]. Несмотря на эти факторы, относительная эффективность конструкций остается неизменной: вариант W3 показывает наиболее выраженный акустический эффект, за ним следуют W2 и W1 соответственно.

Сводное сопоставление результатов трех серий измерений приведено в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительный анализ по итогам измерений звукоизоляции

№ образца	Лабораторные испытания (комната высокого уровня), $\Delta L_{ср}$, дБ	Лабораторные испытания (комната низкого уровня), $\Delta L_{ср}$, дБ	Натурные испытания, $\Delta L_{ср}$, дБ	Итоговое $\Delta L_{ср}$, дБ
W1	14,4	14,0	12,1	13,5
W2	18,3	18,2	16,4	17,6
W3	23,6	23,4	21,9	23,0

Таблица 5 наглядно демонстрирует четкую закономерность: усовершенствование оконной конструкции, начиная с использования клееного бруса, последующего включения XPS-вставки и завершая применением трехкамерного стеклопакета, ведет к повышению звукоизоляционных характеристик. Обращает на себя внимание тот факт, что разница в звукоизоляции между конфигурациями W3 и W2 достигает в среднем 5.4 дБ. Это значение уже достаточно существенно, чтобы восприниматься как заметное уменьшение уровня внешнего шума, проникающего в помещение (при прочих равных условиях). Данные результаты также хорошо коррелируют с ранее сделанными выводами относительно существенного влияния конфигурации остекления и условий монтажа на акустические свойства окон [5, 7].

Для более полного представления полученных данных в общепринятой акустической терминологии, согласно действующим стандартам, были дополнительно вычислены: индекс звукоизоляции воздушного шума R_w , а также спектральные коррекции C и C_{tr} . Эти расчеты проводились на основе измерений в третьоктавных полосах частот в диапазоне от 100 до 3150 Гц. Окончательные результаты представлены

в таблице 6.

Таблица 6

Интегральные акустические показатели оконных блоков

№ образца	R_w , дБ	C , дБ	C_{tr} , дБ
W1	31	-1	-4
W2	34	-1	-5
W3	39	-2	-6

Увеличение значения R_w с W1 до W3 на уровне ≈ 8 дБ является характерным для перехода от стандартной деревянной конструкции к модифицированному варианту, который включает в себя улучшенное остекление и усовершенствованную конструкцию рамы. Этот результат качественно соответствует данным, полученным в научной работе [5] относительно деревянных окон с тройным остеклением. Отрицательные показатели C и C_{tr} подтверждают прогнозируемое снижение звукоизоляционной способности на низких частотах, связанных с шумом от транспорта. Это явление также укладывается в рамки наблюдений, где низкочастотный спектр шума более выражен в реальных условиях и чаще всего определяет финальную оценку звукоизоляции [7].

Частотная зависимость звукоизоляции приведена в таблице 7 (третьоктавные полосы).

Таблица 7

Частотная характеристика звукоизоляции $R(f)$, дБ

$R(f)$, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
W1	18	19	20	21	23	24	26	27	29	30	31	32	33	34	35	35
W2	21	22	23	24	26	27	29	30	32	33	34	35	36	37	38	38
W3	26	27	28	29	31	33	35	36	38	39	40	41	42	43	44	44

Согласно данным, представленным в таблице 7, наиболее существенное улучшение звукоизоляционных характеристик наблюдается в диапазоне средних и высоких частот (от 400 Гц и выше). Именно здесь применение многослойного остекления в сочетании с усиленной конструкцией узлов демонстрирует максимальную эффективность. В низкочастотной области (100–250 Гц) разница в показателях оказалась менее выраженной. Это явление согласуется с общеизвестными особенностями оконных конструкций: низкие частоты в большей степени подвержены влиянию бокового (флангового) передачи звука и общей жесткости всей системы, а не только характеристикам самого стеклопакета, указанным производителем [7]. Результаты исследования подтверждают важность комплексного подхода к акустическому совершенствованию окон. Необходимо уделять внимание не только выбору стеклопакета, но и вопросам обеспечения жесткости профиля, а также качеству

герметизации примыканий, включая монтажный шов и уплотнители [5, 7, 12].

Оценка теплотехнических характеристик оконных блоков (U_g , U_f и Ψ_g). Результаты расчета приведенного коэффициента теплопередачи окна U_w для исследуемых конструкций представлены в Таблице 8.

Таблица 8

Исходные теплотехнические параметры для расчета U_w

№ образца	Тип профиля	Тип стеклопакета	U_g , Вт/(м ² ·К)	U_f , Вт/(м ² ·К)	Ψ_g , Вт/(м·К)
W1	цельная древесина	2-камерный, Ar	1.10	1.60	0.060
W2	3-сл. клееный брус	2-камерный, Ar	1.10	1.40	0.050
W3	3-сл. клееный брус + XPS 20 мм	3-камерный, Ar	0.70	1.10	0.040

Коэффициент теплопередачи остекления U_g изменяется в соответствии с известными закономерностями для энергоэффективных оконных систем: его значение уменьшается при увеличении количества камер и использовании инертного газа. При этом вклад рамного профиля и линейного коэффициента теплопередачи ψ_g в зоне примыкания стеклопакета рассматривается как критический из-за образования тепловых мостов [2]. В работах, посвященных энергоэффективности оконных конструкций для зданий (включая эксплуатацию в климатически контрастных условиях), акцентируется, что итоговая эффективность определяется именно совокупностью теплотехнических характеристик остекления, рамы и теплового мостика, а не исключительно значением U_g [1, 10].

Расчёт коэффициента теплопередачи U_w выполнен по формуле (1), результаты представлены в таблице 9. Для сопоставимости результатов использована единая расчётная геометрия оконного блока (условный размер окна), включающая: $A_g = 1,30 \text{ м}^2$, $A_f = 0,50 \text{ м}^2$, $l_g = 5,6 \text{ м}$.

Таблица 9

Результаты расчета U_w для сравниваемых конструкций

№ образца	A_g , м ²	A_f , м ²	l_g , м	U_w , Вт/(м ² ·К)
W1	1.30	0.50	5.6	1.43
W2	1.30	0.50	5.6	1.34
W3	1.30	0.50	5.6	0.94

Анализ результатов, представленных в таблице 9, показывает, что переход от оконного блока из цельной древесины к конструкции из клеёного бруса (W1→W2) сопровождается снижением коэффициента теплопередачи примерно на 6%. Данный эффект обусловлен уменьшением теплопередачи через рамный профиль (U_f) и линейного коэффициента теплопередачи в зоне примыкания стеклопакета (ψ_g) за счёт

более стабильной геометрии и оптимизации конструкции рамы [6, 12].

Наиболее существенное снижение теплопередачи наблюдается для конструкции W3. По сравнению с базовой конструкцией W1 значение U_w уменьшается примерно на 34%. Полученный результат объясняется совокупным влиянием нескольких факторов: снижением коэффициента теплопередачи стеклопакета (U_g) при использовании трёхкамерного остекления, а также уменьшением U_f и ψ_g вследствие внедрения теплоизоляционной вставки из XPS, обеспечивающей разрыв теплопроводного пути в центральной части рамного профиля. Полученные результаты согласуются с данными о значительном влиянии тепловых мостов в оконных конструкциях и эффективности их снижения [2], а также с современными подходами к повышению энергоэффективности зданий [10] и оптимизации ограждающих конструкций для климатических условий Казахстана [1].

Следует учитывать, что при использовании полимерных теплоизоляционных материалов важным фактором является долговременная стабильность их свойств. Возможная деградация XPS со временем может приводить к изменению теплотехнических характеристик конструкции, что необходимо учитывать при прогнозировании эксплуатационной эффективности оконного блока [8]. Тем не менее, применение локальной теплоизоляции в структуре рамного профиля остаётся эффективным методом снижения коэффициента теплопередачи U_w , особенно при ограниченной монтажной глубине конструкции [3, 6, 11].

Результаты сравнительного анализа теплотехнических и акустических характеристик деревянных оконных блоков различных конструкций. Сопоставление результатов по акустике показывает, что полученный диапазон $R_w \approx 31 - 39$ дБ для деревянных оконных систем находится в реалистичном интервале для конструкций с многокамерным остеклением. В частности, исследования деревянных окон с тройным остеклением демонстрируют заметное повышение акустической эффективности по сравнению со стандартными решениями, при этом ключевыми факторами остаются тип стеклопакета и герметичность узлов [5]. Наша тенденция W1→W3 (рост R_w и рост R_f в средне-высоких частотах) соответствует именно этой закономерности: увеличение «слоистости» системы и улучшение стабильности притвора приводят к более выраженному эффекту в диапазоне, доминирующем для речевого и бытового шума, тогда как в низкочастотной области преимущество уменьшается из-за фланговых передач и особенностей транспортного спектра [7].

По теплотехнике полученные значения $U_w \approx 1.43 \rightarrow 0.94$ Вт/(м² · К) отражают переход от базовой деревянной конструкции типичный для энергоэффективных окон к системе, где

оптимизированы одновременно U_g , U_f и ψ_g . В экспериментальных работах по тепловым мостикам в элементах рам (включая анализ зоны примыкания стеклопакета) подчеркивается, что именно линейный мост ψ_g часто становится «скрытым» ограничителем, и меры по его уменьшению дают сопоставимый вклад с улучшением U_g [2]. В этом смысле конструкция W3 концептуально согласуется с подходом снижения теплопередачи через рамный профиль при сохранении несущей способности, что активно обсуждается в работах по оптимизации дизайна оконных рам и их гигротепловому поведению [6], [11].

С точки зрения прикладной значимости для зданий, результаты по U_w согласуются с направлением исследований по повышению энергоэффективности ограждающих конструкций в условиях Казахстана и сопоставимых климатов, где уменьшение теплопотерь через окна рассматривается как одна из наиболее эффективных мер энергосбережения [1], [10]. При этом внедрение полимерной вставки XPS требует корректной инженерной интерпретации: хотя вклад в снижение U_f очевиден, долговременная стабильность теплоизоляционных свойств XPS и возможные изменения характеристик со временем должны учитываться при прогнозе жизненного цикла решения [8]. Дополнительно, использование клееного бруса как основы профиля оправдано не только эксплуатационной стабильностью, но и более системным взглядом на материал как промышленный продукт с прогнозируемыми характеристиками. Это соответствует современным подходам к применению клеёного бруса в строительных системах [12] и его оценке в контексте жизненного цикла [4].

В целом, обсуждение результатов подтверждает, что «точечные» улучшения (например, только замена стеклопакета без оптимизации рамы и узлов примыкания) дают ограниченный эффект, тогда как наилучший результат достигается при одновременной оптимизации остекления, рамного профиля и теплового моста, а для акустики — при строгом контроле герметичности монтажного узла и притвора [2], [5], [7], [10]. Именно поэтому сравнение трех конструкций W1–W3 является методически оправданным: оно демонстрирует пошаговый вклад каждого инженерного решения в итоговые показатели, а не просто «констатирует», что один вариант лучше другого.

Выводы

1. В ходе исследования разработана конструкция деревянного оконного блока на основе трехслойного клееного соснового бруса с интегрированной теплоизоляционной вставкой из экструдированного пенополистирола (XPS), расположенной в центральной части рамного профиля, что обеспечивает снижение теплопередачи через рамную зону.

2. Проведен сравнительный анализ трех вариантов оконных конструкций (W1–W3), отличающихся материалом рамного профиля и типом остекления, что позволило определить влияние конструктивных решений на теплотехнические и акустические характеристики оконных блоков.

3. Установлено, что применение многокамерного стеклопакета и клееного бруса приводит к увеличению звукоизоляционных характеристик: индекс изоляции воздушного шума возрастает до $R_w \approx 39$ дБ, при этом наибольший эффект достигается в средне- и высокочастотном диапазоне.

4. Расчеты теплотехнических характеристик показали, что внедрение теплоизоляционной вставки XPS позволяет снизить коэффициент теплопередачи оконного блока с $U_w \approx 1.43$ до $U_w \approx 0.94$ Вт/(м²·К), что свидетельствует о повышении энергоэффективности конструкции.

5. Полученные результаты подтверждают, что наибольший эффект достигается при комплексной оптимизации конструкции, включающей выбор материала рамного профиля, типа стеклопакета и снижение тепловых мостиков, что делает предложенную конструкцию перспективной для применения в условиях континентального климата.

References

1. Tukhtamisheva, A., Adilova, D., Banionis, K., Levinskytė, A., Bliudžius, R. Optimization of the thermal insulation level of residential buildings in the Almaty region of Kazakhstan. *Energies*, 2020, 13(18), 4692. <https://doi.org/10.3390/en13184692>
2. Moutzakis, A., Zoras, S., Evagelopoulos, V., Dimoudi, A. Experimental investigation of thermal bridges and heat transfer through window frame elements at achieving energy saving. *Energies*, 2022, 15(14), 5055. <https://doi.org/10.3390/en15145055>
3. Ostapska, K., Jensen, T. M., Gullbreken, L., Ruther, P. Developing slimmer timber window frame. *World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE 2023)*, 3823–3828. <https://doi.org/10.52202/069179-0497>
4. Nakano, K., Hattori, N., Koide, M., Imago, M., Yamada, Y., Ogawa, T. Life cycle assessment of structural glued laminated timber production with different dimensions and exposure conditions. *Journal of Wood Science*, 2025, 71, 36. <https://doi.org/10.1186/s10086-025-02212-1>
5. Miskinis, K., Dikavičius, V., Burlingis, A. The acoustic and thermal characteristics of wooden triple glazed windows. *Noise Control Engineering Journal*, 2016, 64(4), 485–499. <https://doi.org/10.3397/1/376395>

6. Verichev, K., Díaz-López, C., García-Ruíz, A., Valdenegro, F. Window frame design optimization analysis based on hygrothermal performance and the Level(s) framework. *Buildings*, 2025, 15(12), 2126. <https://doi.org/10.3390/buildings15122126>
7. Dulak, L., Nowoświat, A. Effect of window structure and mounting on sound insulation: a laboratory-based study. *Sustainability*, 2025, 17(15), 6892. <https://doi.org/10.3390/su17156892>
8. Park, S.-H., Kim, S.-H., Jeong, J.-Y., Kim, H.-J., Seo, D.-H. Detailed building energy impact analysis of XPS insulation degradation using existing long-term experimental data. *Energies*, 2025, 18(13), 3260. <https://doi.org/10.3390/en18133260>
9. Wangchuk, P. Hygrothermal analysis of wooden frame and cross-laminated timber wall for energy efficiency and durability in Bhutanese climate. M.A.Sc. thesis, Concordia University, Montreal, Canada, 2023.
10. Qiu, X., Gong, M., Kaboorani, A. A case study on the energy efficiency of windows in institutional and residential buildings. *Buildings*, 2025, 15(19), 3478. <https://doi.org/10.3390/buildings15193478>
11. Wang, Z., Yao, L., Shi, Y., Zhao, D., Chen, T. Optimizing the performance of window frames: a comprehensive review of materials in China. *Applied Sciences*, 2024, 14(14), 6091. <https://doi.org/10.3390/app14146091>
12. Swedish Wood. The glulam handbook – Volume 1: Facts about glulam. Stockholm, 2024. Available at: [Glulam Handbook Volume 1 \(PDF\)](#)
13. Simões, N., Moghaddam, S. A., da Silva, M. G. Review of the experimental methods for evaluation of windows' thermal transmittance: from standardized tests to new possibilities. *Buildings*, 2023, 13(3), 703. <https://doi.org/10.3390/buildings13030703>
14. Šadauskienė, J., Ramanauskas, J., Krawczyk, D. A., Klumbytė, E., Fokaidis, P. A. Investigation of thermal bridges of a new high-performance window installation using 2-D and 3-D methodology. *Buildings*, 2022, 12(5), 572. <https://doi.org/10.3390/buildings12050572>
15. Qin, X., Liu, H., Zhang, X., Jiang, N., Yang, L., Jin, X. Thermal analysis of the window-wall interface for renovation of historical buildings. *Energy and Buildings*, 2024, 310, 114108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114108>
16. Saadatian, S., Freire, F., Simões, N. Embodied impacts of window systems: a comparative assessment of framing and glazing alternatives. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35, 102042. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102042>
17. Saadatian, S., Rodrigues, C., Freire, F., Simões, N. Key drivers of life-cycle environmental and cost assessment of windows for different European climate zones. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50, 104206. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104206>
18. Búryová, D., Vaňová, R., Gregor, M., Uhrín, R., Sedlák, P. Life cycle perspectives of fixed and operable wooden windows. *Buildings*, 2025, 15(24), 4490. <https://doi.org/10.3390/buildings15244490>

19. Vidmar, G., Repič, R., Lesar, B., Humar, M. Crack size in coating and moisture problems comparing thermally modified and native spruce window frame profiles using hygrothermal simulations. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, 82, 2109–2119. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02149-0>
20. Valentini, F., Maracchini, G., di Filippo, R., Dorigato, A., Bursi, O. A prospective life cycle assessment of insulation and window systems under evolving electricity and recycling scenarios for building energy retrofit in Italy. *Energy and Buildings*, 2025, 347(A), 116245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116245>
21. Ahn, N., Park, S. Heat transfer analysis of timber windows with different wood species and anatomical direction. *Energies*, 2020, 13(22), 6050. <https://doi.org/10.3390/en13226050>
22. Moghaddam, S. A., Serra, C., Gameiro da Silva, M., Simões, N. Comprehensive review and analysis of glazing systems towards nearly zero-energy buildings : Energy Performance, Thermal Comfort, Cost-Effectiveness, and Environmental Impact Perspectives. *Energies*, 2023, 16(17), 6283. <https://doi.org/10.3390/en16176283>
23. Paulos, J., Berardi, U. Optimizing the thermal performance of window frames through aerogel enhancements. *Applied Energy*, 2020, 266, 114776. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114776>
24. Flimel, M. Material optimization of wooden window structures to increase their thermal properties. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, 861, 19–23. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.19>
25. Cuce, E. Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation. *Energy and Buildings*, 2018, 171, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.036>
26. Jung, W., Kim, D., Ko, S. H. Recent progress in high-efficiency transparent vacuum insulation technologies for carbon neutrality. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2024, 11, 1681–1702 <https://doi.org/10.1007/s40684-024-00623-x>
27. Peng, J., Tan, Y., Fang, Y., Yang, H., Song, A., Curcija, C., Selkowitz, S. Excellent insulation vacuum glazing for low-carbon buildings: Fabrication, modeling, and evaluation. *Engineering*, 2025, 53, 18-39 <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.027>
28. Granzotto, N., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., Fausti, P., Caniato, M. Energy and acoustic performances of windows and their correlation. *Energy and Buildings*, 2017, 136, 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.024>
29. Buratti, C., Barelli, L., Moretti, E. (2013). Wooden windows: Sound insulation evaluation by means of artificial neural networks. *Applied Acoustics*, 74(5), 740–745. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.12.001>