

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-47-59

Алиев С.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

E-mail: Saliev@sfu-kras.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА УГЛОВЫХ СОПРЯЖЕНИЙ НАРУЖНЫХ СТЕН ИЗ CLT-ПАНЕЛЕЙ С СИСТЕМАМИ СФТК И НФС

**Аннотация.** В статье выполнен комплексный анализ тепло-влажностного состояния угловых соединений стеновых конструкций из древесины перекрестноклееной (CLT) с различными фасадными системами: фасадной теплоизоляционной композиционной системой (СФТК) и навесной фасадной системой (НФС). Расчёты выполнены методом численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics с учётом климатических условий г. Красноярск и влияния клеёвого слоя CLT-панелей. Определены температурные поля, распределение относительной влажности и динамика влагосодержания в слоях конструкций за десятилетний период эксплуатации. Показано, что минимальные температуры внутренней поверхности во всех рассматриваемых вариантах превышают температуру точки росы, что исключает риск поверхностной конденсации. Выявлены зоны потенциального переувлажнения в угловых сопряжениях конструкций с деревянным каркасом вследствие прохождения нулевой изотермы через элементы каркаса. Максимальные значения влажности материалов соответствуют нормативным требованиям СП 50.13330.2024 и не приводят к накоплению влаги в конструкции. Установлено, что системы с бескаркасной облицовкой демонстрируют несколько более благоприятные теплотехнические и влагозащитные показатели по сравнению с конструкциями с деревянным каркасом.

**Ключевые слова:** древесина перекрестноклееная, CLT, тепло-влажностный анализ, угловое сопряжение, численное моделирование, фасадные системы, влагонакопление.

**Введение.** В последние годы древесина перекрестноклееная (CLT) привлекает все большее внимание в строительной отрасли и позиционируется как эффективная и устойчивая альтернатива традиционным материалам, таким как железобетон и сталь. Разработанная в Европе в начале 1990-х годов, эта технология позволяет использовать древесину низкого сорта для создания массивных конструктивных панелей с превосходными эксплуатационными характеристиками [1–3]. Благодаря своей многослойной структуре с перекрестным расположением ламелей, CLT обладает высокой размерной стабильностью, несущей способностью, а также отличными теплоизоляционными свойствами и огнестойкостью [4, 5]. Древесина как материал имеет низкий углеродный след, что способствует снижению общего энергопотребления и выбросов углерода на протяжении всего жизненного цикла здания – от производства до утилизации [6–9]. Эти преимущества, в сочетании с возможностью высокоточной заводской предобработки и сокращением сроков строительства, способствовали резкому росту применения CLT в средне- и многоэтажных зданиях по всему миру.

Соединения между элементами CLT, особенно в угловых сопряжениях стен, представляют собой особые проблемы в точном моделировании и эффективном управлении поглоще-

нием и удалением воды [10]. Работа [11] показывает, что для корректного моделирования тепловых характеристик зданий, особенно тех, что имеют массивные или многослойные ограждающие конструкции, нужно выходить за рамки одномерных моделей. В статье [12] авторы обсуждают ограничение тепловых потерь через теплопередачу в одном направлении, что может включать использование одномерных моделей для расчета тепловых потерь через стены, крыши и полы. В работе [13] авторы подчеркивают необходимость использования детализированных трехмерных моделей для точного учета тепловых мостов.

Даже в однородном материале это приводит к многомерным тепловым потокам, которые могут увеличивать общие теплотери здания до 5 % [14]. Основное следствие этого – локальное снижение температуры внутренних поверхностей [15]. Это, в свою очередь, резко повышает риск поверхностной конденсации влаги и создает благоприятные условия для роста плесени, которая может развиваться при относительной влажности поверхности выше 80 % [16]. Если тепловые характеристики предсказуемы, то управление влажностью представляет собой более сложную задачу. Древесина является гигроскопическим и анизотропным материалом, что делает угловые соединения особенно уязвимыми для накопления влаги.

Перенос жидкой влаги вдоль волокон древесины происходит значительно быстрее, чем поперек них [17]. Торцы панелей, сходящиеся в углах, являются уязвимым участком и интенсивно

В отличие от теплопередачи, которая стабилизируется в CLT за 1–2 дня, перенос влаги – это чрезвычайно медленный процесс, растянутый на месяцы [20]. Это означает, что влага, попавшая в конструкцию, остается там надолго, создавая постоянную угрозу. Повышенная влажность напрямую влияет на долговечность древесины. При влагосодержании выше 26 % в теплую погоду возникает риск развития грибков, которые разрушают структуру материала [21].

Однако, несмотря на значительный объем работ, сохраняются существенные пробелы в знаниях. Лабораторная характеристика гигротермических свойств CLT для многих пород древесины носит предварительный характер, а необходимые для моделирования данные часто отсутствуют в стандартных базах данных программного обеспечения [22, 23]. Существующие модели часто требуют значительной калибровки для достижения согласия с полевыми данными, что указывает на неполное понимание сложных процессов влагопереноса в реальных CLT панелях с их структурными особенностями (зазоры, трещины, клеевой слой) [22]. Наиболее важным пробелом является недостаток комплексных исследований, которые бы одновременно рассматривали взаимосвязанное влияние 3D-тепловых потоков и переноса влаги именно в узлах угловых сопряжений, как самых уязвимых участков конструкции. В связи с этим моделирование

поглощают влагу, особенно во время строительства, когда панели могут подвергаться воздействию осадков. Исследования показывают, что влажность может превысить 30 % [18, 19].

тепло-влажностных процессов с учетом клеевых слоев CLT-панелей является актуальным.

Целью данной работы является комплексный анализ тепло-влажностных процессов в угловых соединениях CLT из различных систем сопряжения (СФТК и НФС) и оценка рисков, связанных с конденсацией и накоплением влаги.

**Материалы и методы.** Решение математической модели, описывающей сопряжённый тепло- и влагоперенос, осуществлялось в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием модуля Heat Transfer. В расчётах применялись интерфейсы Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials, объединённые в рамках мультифизического интерфейса Building Materials. Такой подход позволяет одновременно моделировать теплопроводность, конвекцию, излучение, сорбцию влаги, капиллярный перенос жидкости, диффузию водяного пара, скрытые тепловые эффекты, а также учитывать влагозависимые теплофизические свойства материалов.

Для анализа процесса переноса тепла и влаги во внешних углах здания рассмотрены конструкции наружной стены СФТК (система фасадная теплоизоляционная композиционная) и НФС (навесная фасадная система) с облицовкой бескаркасного типа и обшивкой по деревянному каркасу (рис 1 и 2).

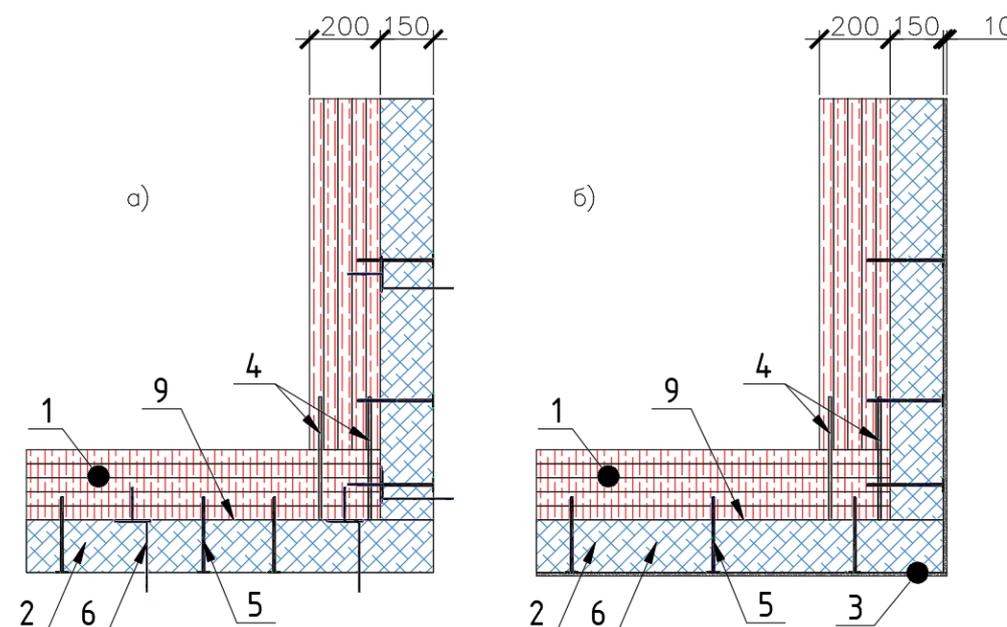


Рис. 1. Конструкция углового сопряжения стены здания с облицовкой бескаркасного типа: а) НФС; б) СФТК  
1 – CLT-панель; 2 – минеральная вата; 3 – наружный штукатурный слой; 4 – саморез конструкционный для крепления CLT-панелей; 5 – тарельчатый дюбель; 6 – кронштейн с анкером; 9 – пароизоляционный слой

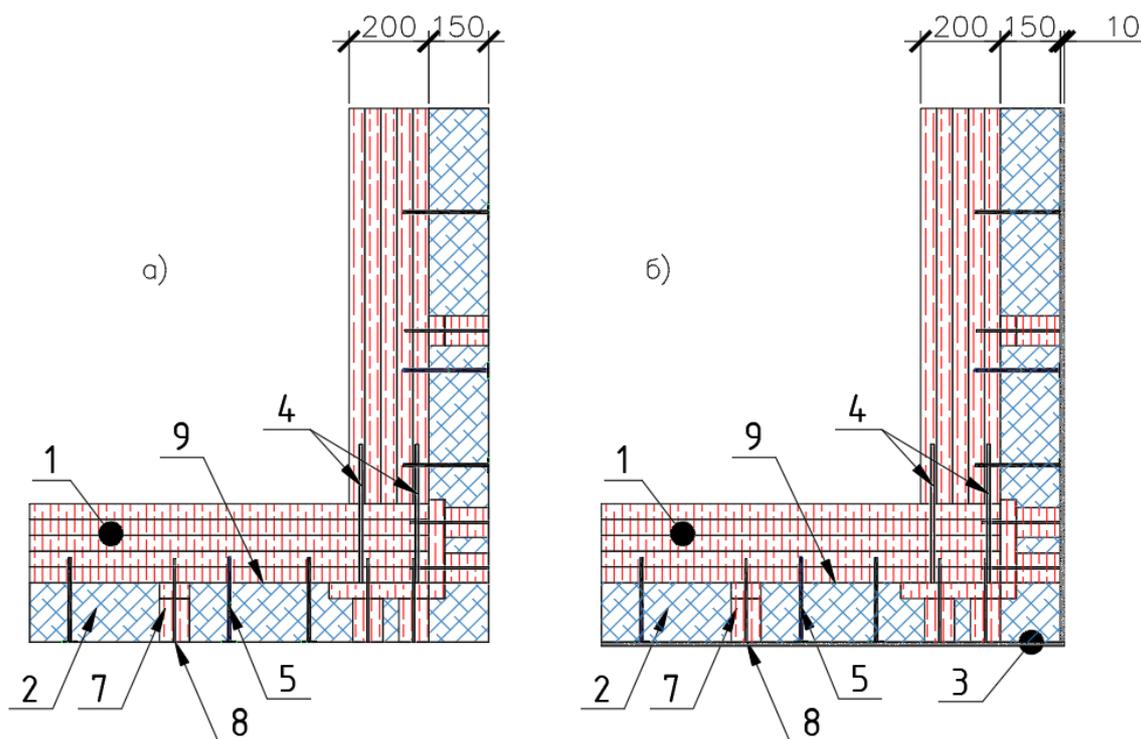


Рис. 2. Конструкция углового сопряжения стены обшивкой по деревянному каркасу: а) НФС; б) СФТК

1 – CLT-панель, 2 – минеральная вата, 3 – наружный штукатурный слой, 4 – саморез конструкционный для крепления CLT-панелей, 5 – тарельчатый дюбель, 7 – деревянный каркас, 8 – саморез конструкционный для крепления каркаса, 9 – пароизоляционный слой

Значения коэффициента теплопроводности для древесины (сосны), минеральной ваты и цементно-песчаного раствора принимались как функциональные зависимости от относительной влажности воздуха (рис. 3), основываясь на данных из COMSOL Multiphysics, WUFI, научной литературы и СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий».

Для остальных материалов коэффициенты теплопроводности, а также коэффициенты паропроницаемости для всех материалов были приняты в соответствии с СП 50.13330.2024 (таблица 1). Расчеты проводились для жилого здания в климатических условиях г. Красноярска (таблица 2 и 3). Дополнительно влияние клеевых слоев в CLT-панелях учитывалось путем его явного моделирования в расчетах [24].

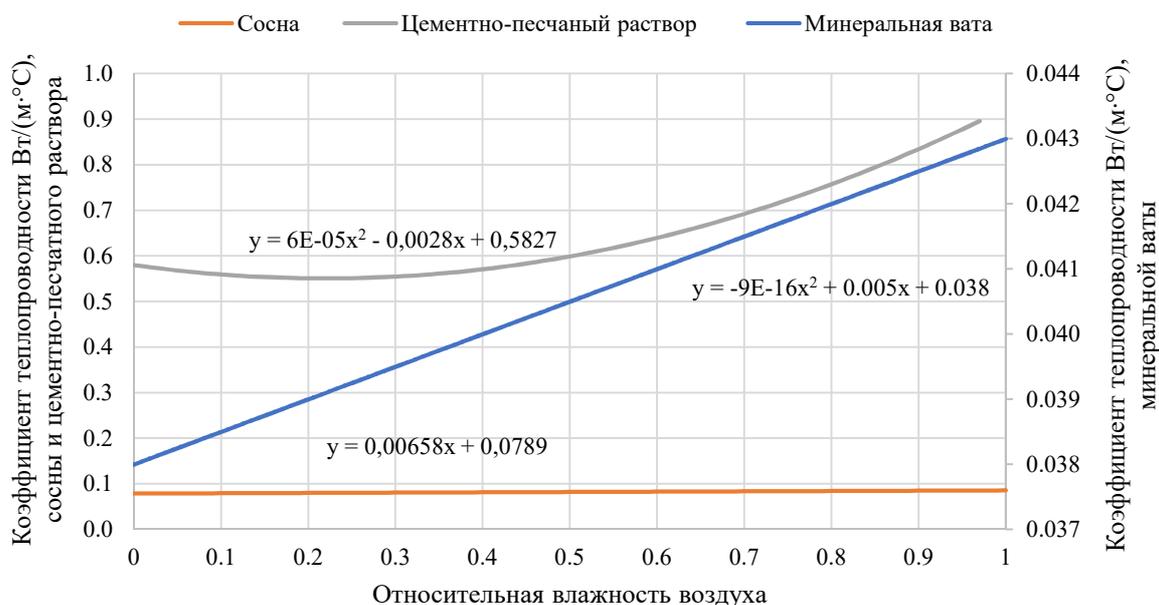


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от относительной влажности для материалов стены

Таблица 1

## Теплофизические свойства материалов стенового ограждения

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda_A$ , Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , с
Техно Вент Проф (минеральная вата)		$\lambda(\varphi)$ (рис. 3)	.
Сосна (CLT-панели, каркас)		$\lambda(\varphi)$ (рис. 3)	0
Клеевой состав (для склеивания ламелей CLT-панелей)		–	.
Пароизоляционный слой (Сопротивление паропроницанию 7,3 м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг)	–	–	–
Цементно-песчаный раствор (штукатурка)		$\lambda(\varphi)$ (рис. 3)	.
Сталь (анкер, кронштейн, саморезы)			.
Полиамид (дюбель)			.
Паронит (прокладка)			.

Таблица 2

## Климатические параметры г. Красноярска для стационарного расчета

Параметры	Значения параметров
Район строительства	г. Красноярск
Расчетная температура наружного воздуха $t_{н}$ , °С	-37
Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{в}$ , °С:	21
Климатический подрайон	IV
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций $\alpha_{в}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С): для стен	8,7
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающих конструкций $\alpha_{н}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С): - НФС; - СФТК	12 23
Коэффициент переноса влаги внутренней поверхности ограждающих конструкций, $\beta_{в} = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_{в}$ , с/м:	$6,09 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент переноса влаги наружной поверхности ограждающих конструкций, $\beta_{н} = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_{н}$ , с/м: - НФС - СФТК	$8,4 \cdot 10^{-8}$ $1,61 \cdot 10^{-7}$
Начальная относительная влажность ограждающих конструкций, %	65
Относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi^в$ , %	55
Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %	72
Влажностный режим помещений	нормальный
Зона влажности территории строительства	сухая
Условия эксплуатации ограждающих конструкций	A
Температура точки росы $t_p$ , °С, при $t_{в} = 21$ °С, $\varphi^в = 55\%$	11,6

Таблица 3

## Климатические параметры в г. Красноярске за год по СП 131.13330.2020

Месяц	Температура наружного воздуха $t_{ext}$ , °С	Относительная влажность наружного воздуха $\varphi_{ext}$	Парциальное давление, Па
Январь	-16,3	0,89	160
Февраль	-13,9	0,83	180
Март	-5,9	0,72	290
Апрель	2,4	0,6	440
Май	9,7	0,56	680
Июнь	16,4	0,64	1200
Июль	18,7	0,71	1540
Август	15,6	0,77	1360
Сентябрь	9	0,77	880
Октябрь	1,7	0,75	520
Ноябрь	-7,4	0,84	300
Декабрь	-13,6	0,86	190

**Основная часть.** Результаты расчета температурных полей представлены на рис. 4–5. По результатам расчета получен тепловой поток на внутренней поверхности у каждого типа конструкций. Поскольку тарельчатые дюбели, кронштейны и анкеры являются точечными элементами, их влияние необходимо рассчитывать в

трехмерной постановке. В таблице 4 представлены значения теплового потока на внутренней поверхности ограждающих конструкций, из которых следует, что наименьший тепловой поток наблюдается у СФТК с облицовкой бескаркасного типа. Прослеживается влияние геометрии углового сопряжения и точечных элементов по сравнению с однородной конструкцией.

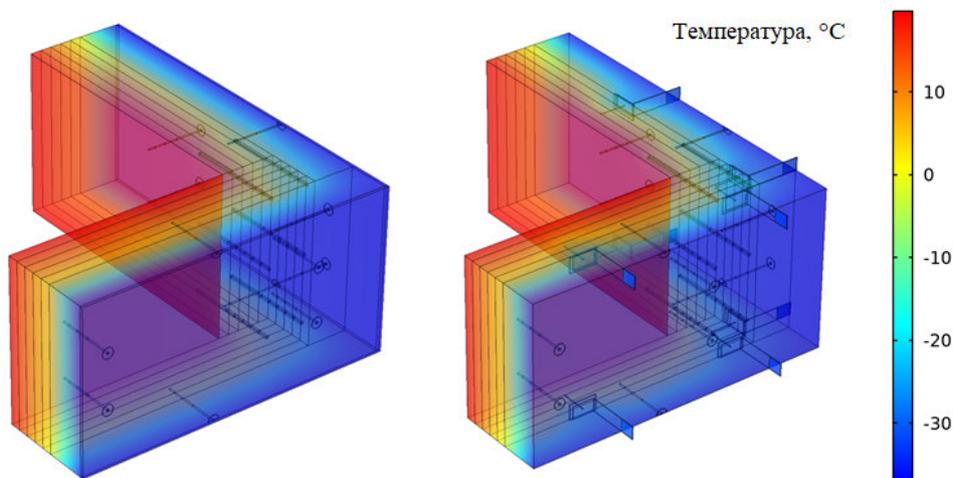


Рис. 4. Распределение температурных полей у углового сопряжения СФТК (слева) и НФС (справа) с облицовкой бескаркасного типа при наружной температуре -37 °С

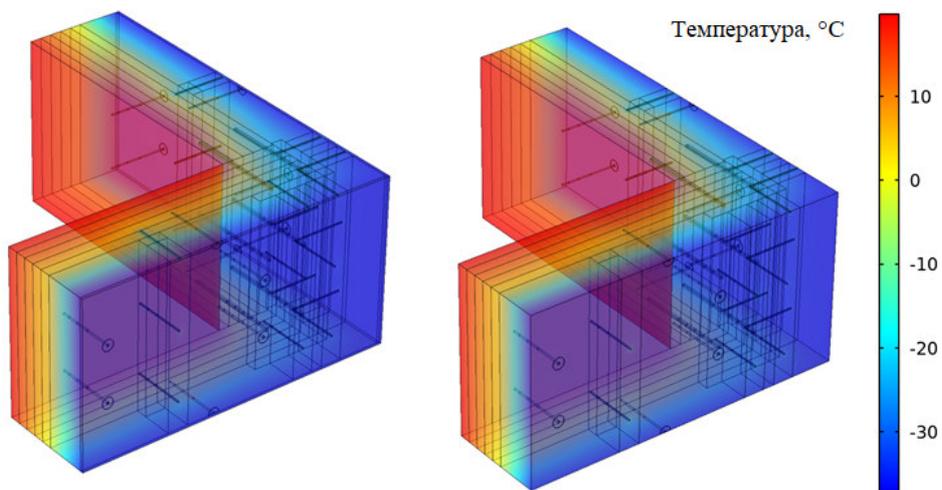


Рис. 5. Распределение температурных полей у углового сопряжения СФТК (слева) и НФС (справа) с обшивкой по деревянному каркасу при наружной температуре -37 °С

Таблица 4

**Тепловой поток на внутренней поверхности и сопротивление теплопередаче конструкций**

Тип конструкции	Тепловой поток углового сопряжения, Вт/м <sup>2</sup>	Тепловой поток однородной конструкции, Вт/м <sup>2</sup>	Сопротивление теплопередаче углового сопряжения, м <sup>2</sup> ·°С/Вт
СФТК с облицовкой бескаркасного типа	12,14	9,48	4,78
НФС с облицовкой бескаркасного типа	13,46	9,42	4,31
СФТК с обшивкой по деревянному каркасу	14,02	9,48	4,14
НФС с обшивкой по деревянному каркасу	13,18	9,42	4,40

Наименьшее значение температуры на внутренней поверхности ограждения составляет 16,3 °С, 14,7 °С, 15,3 °С и 15,3 °С соответственно у СФТК с облицовкой бескаркасного типа, у СФТК с обшивкой по деревянному каркасу, у НФС с облицовкой бескаркасного типа, у НФС с обшивкой по деревянному каркасу. Температура внутренней поверхности стены должна быть не менее температуры точки росы  $t_p = 11,6$  °С при температуре внутреннего воздуха 21 °С и отно-

сительной влажности воздуха 55 %. Данное требование выполняется для всех видов конструкций.

Для проверки выполнения санитарно-гигиенических требований согласно СП 50.13330.2024 произведен тепло-влажностный расчет данных конструкций. Распределения температуры с изолиниями относительной влажности в рассматриваемых моделях представлены на рис. 6–7. В расчётных моделях предусмотрен слой пароизоляции между CLT-панелями и утеплителем, предотвращающий увлажнение конструкции

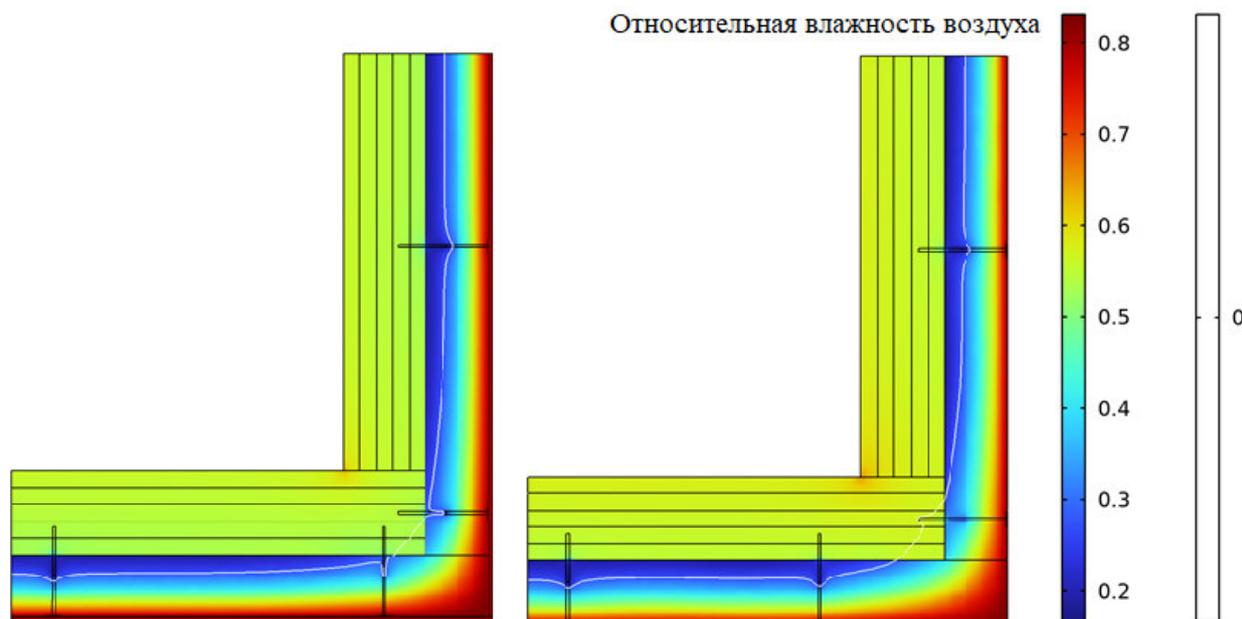


Рис. 6. Распределение относительной влажности воздуха в угловом сопряжении СФТК (слева) и НФС (справа) с облицовкой бескаркасного типа. Белая линия – нулевая изотерма

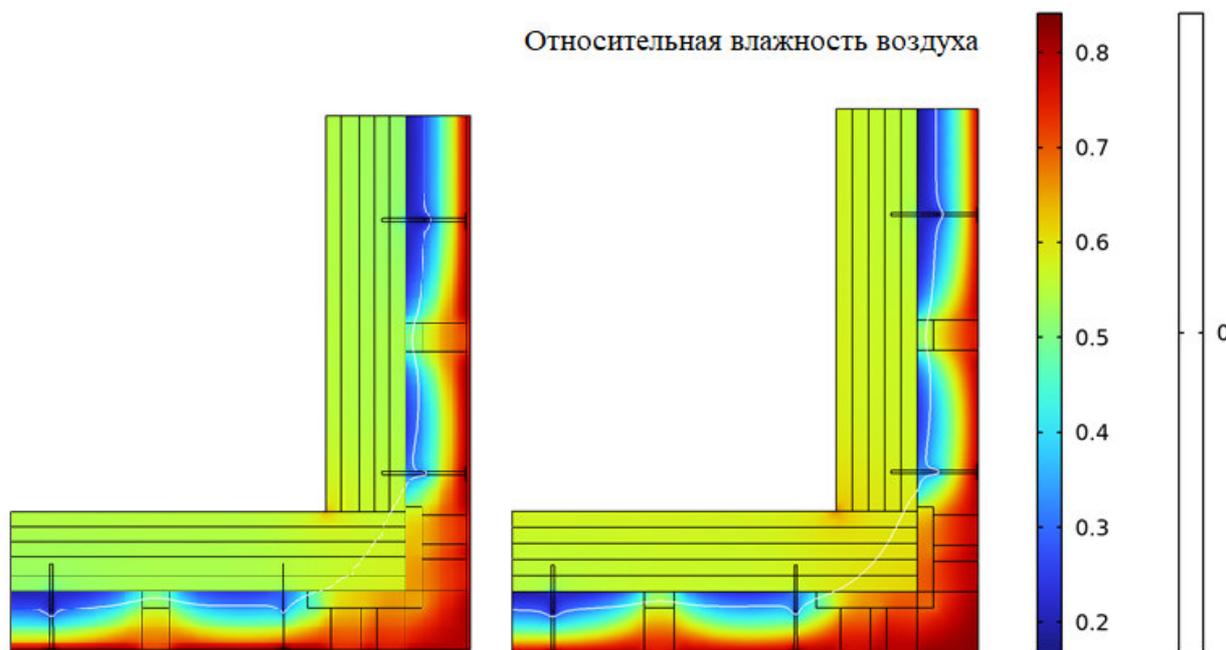


Рис. 7. Распределение относительной влажности воздуха в угловом сопряжении СФТК (слева) и НФС (справа) с обшивкой по деревянному каркасу. Белая линия – нулевая изотерма

В конструкции с системой СФТК (рис. 6) наблюдается плавный градиент относительной влажности от внутренних слоев к наружным. В массиве CLT-панели устанавливается равновесная влажность древесины, соответствующая внутренним условиям (около 10–12 %), что эквивалентно относительной влажности воздуха 55–60 %. По мере приближения к утеплителю, в зоне отрицательных температур, влажность воздуха в порах материала резко возрастает, достигая максимальных значений 75–80 % в самом холодном наружном слое утеплителя. Критически важным является положение нулевой изотермы. В угловой зоне она частично проходит в несущей конструкции. Однако замерзания влаги в древесине не происходит, так как при относительной влажности воздуха около 60 % в сосне устанавливается равновесная влажность 10–12 %, при которой свободная вода отсутствует. Конструкция с навесной фасадной системой демонстрирует схожий общий характер распределения влажности, но нулевая изотерма смещена на большее расстояние в слое CLT-панели.

В СФТК с обшивкой по каркасу (рис. 7) наблюдается сложная картина распределения влажности, обусловленная наличием деревянного каркаса. В то время как в основной плоскости несущей стены относительная влажность остается на умеренном уровне (около 50–60 %), в зоне деревянных стоек каркаса и в самом угло-

вом сопряжении формируются зоны с повышенной влажностью. Ключевым фактором риска является положение нулевой изотермы. Она проходит непосредственно через элементы деревянного каркаса и вплотную приближается к несущей CLT-панели в наиболее уязвимых зонах: в самом углу и в местах примыкания горизонтальных элементов каркаса. Это означает, что значительная часть деревянных элементов каркаса и, потенциально, прилегающая к ним часть несущей стены находятся в зоне отрицательных температур. Такое расположение создаёт потенциальные условия для локального переувлажнения и замерзания влаги в древесине при нарушении пароизоляции или длительной эксплуатации во влажных условиях. Циклы замораживания–оттаивания в таких зонах могут привести к деструкции материала. Относительная влажность воздуха в порах материалов в этих зонах достигает ~80 %, что соответствует равновесной влажности древесины около 18–20 % – пороговому значению для развития микроорганизмов. НФС с обшивкой по каркасу имеет похожую картину и отличается незначительно.

Для оценки влагосодержания слоев конструкции был произведен расчет в динамике за 10 лет (первый расчетный месяц – июль). Для всех рассматриваемых систем характерен циклический характер влагосодержания с годовой периодичностью даже с учетом начальной высокой влажности конструкций, например, как на рис. 8.

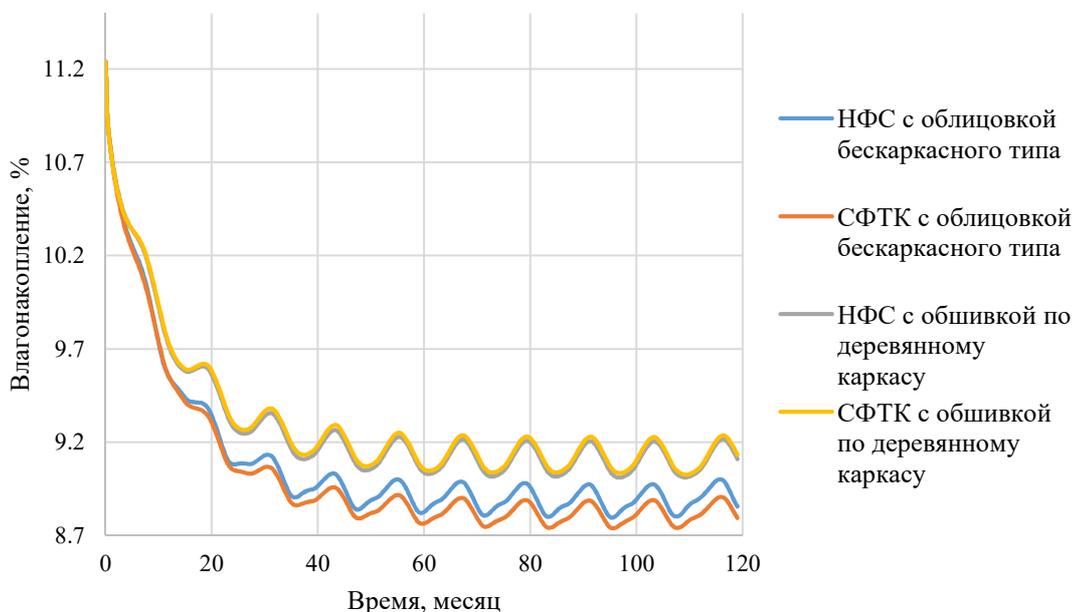


Рис. 8. Влагосодержание в CLT-панели в десятилетнем цикле

Существенной тенденции к увеличению влагосодержания материалов конструкции за 10 лет не выявлено (рис. 8); пиковые и минимальные значения остаются относительно стабильными

после выхода расчётной модели на квазистационарный режим (стабилизации амплитуды годовых колебаний влагосодержания) на 4–5-й год эксплуатации. СФТК и НФС с обшивкой бес-

каркасного типа показывают значения влагосодержания примерно на 0,3–0,4 % ниже, чем системы с обшивкой по деревянному каркасу. Влагосодержание рассматриваемых систем составляет 8,7–9,2 %, что ниже предельного значения 12 %, установленного для нормальных условий эксплуатации согласно таблице 1 СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции».

На рис. 9–11 представлены результаты расчёта динамики влагосодержания различных слоёв конструкции за последний (10-й) год эксплуатации; начальный месяц расчёта – июль.

Вопреки классическому сценарию, при котором основная влажностная нагрузка связана с зимней диффузией водяного пара из помещения, в утепителе (рис. 9) наблюдается инвертированный годовой цикл. Накопление влаги начинается в тёплый период года – с мая (10-й месяц расчётного периода) – и достигает максимума в сентябре (2-й месяц). Пиковые значения составляют

~0,37 % для СФТК с каркасом и ~0,40 % для НФС бескаркасного типа. Осушение происходит в холодный период, с сентября по май, когда влажность снижается до ~0,20–0,24 %. Такой нетипичный режим указывает на доминирование процессов влагонакопления в тёплое время года над процессами высыхания. Возможными причинами такого поведения могут быть: инверсия направления диффузионных потоков водяного пара из-за изменения температурно-влажностного градиента через толщу стены, конвективный перенос влаги через негерметичности в конструкции, или специфические особенности паропроницаемости материалов при повышенных температурах. Максимальные значения влагосодержания в минеральной вате находятся значительно ниже критических уровней для данного типа теплоизоляционного материала, что свидетельствует об отсутствии риска конденсации и накопления жидкой влаги.

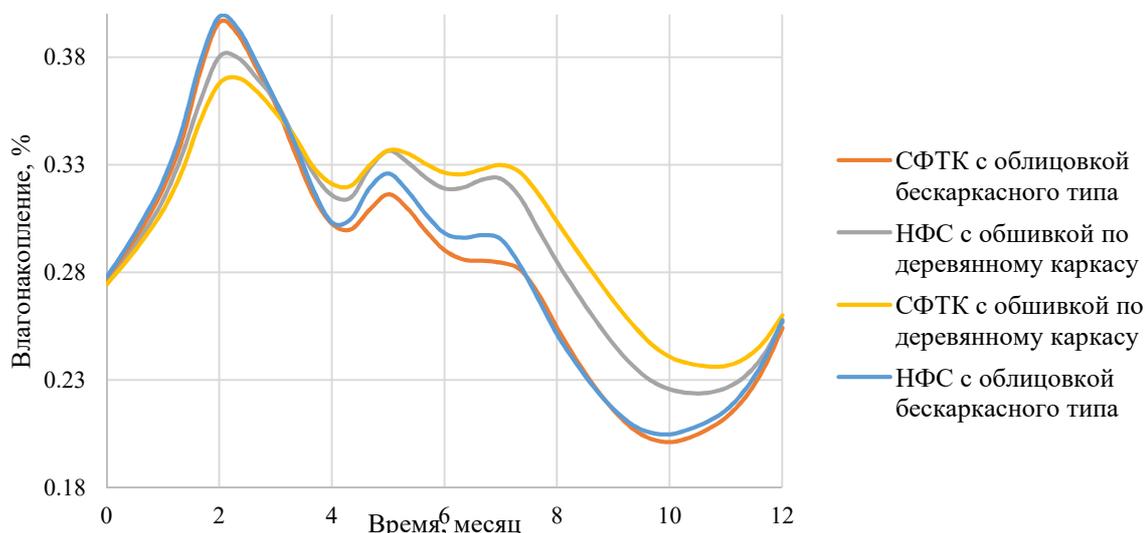


Рис. 9. Динамика влагосодержания в минеральной вате в течение 10-ого года расчета (первый расчетный месяц – июль)

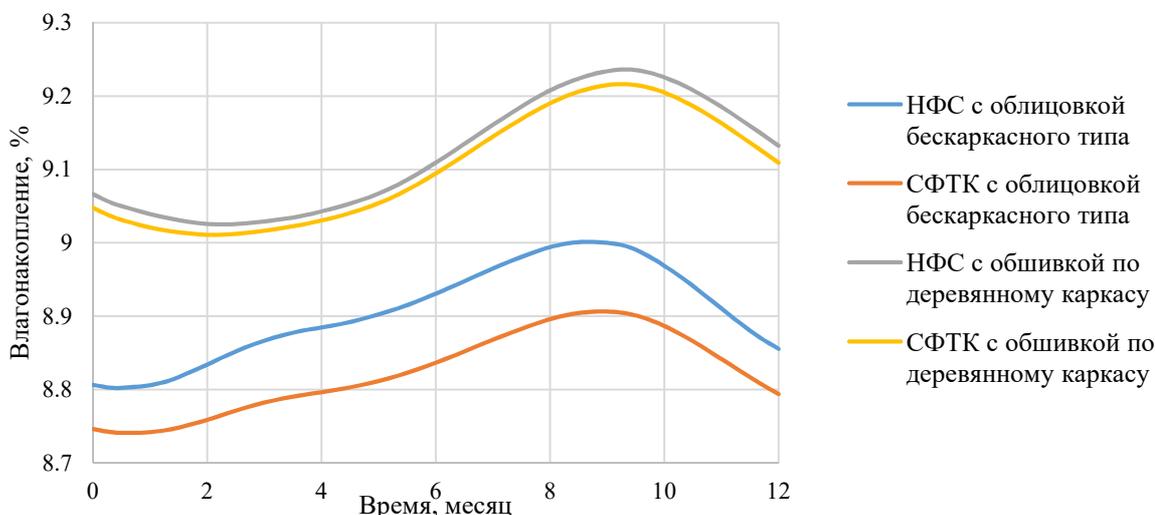


Рис. 10. Динамика влагосодержания в CLT-панели в течение 10-ого года расчета (первый расчетный месяц – июль)

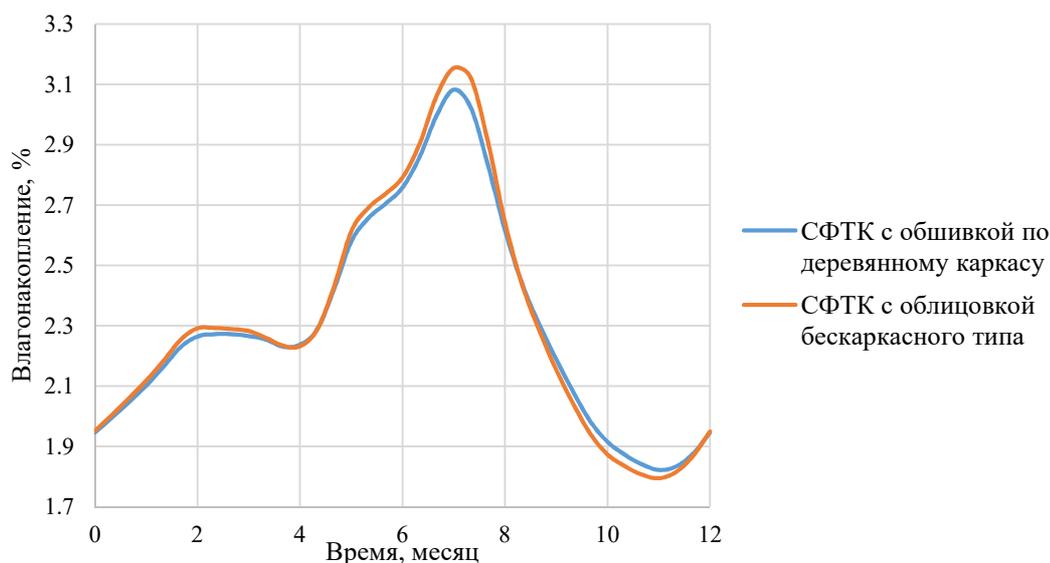


Рис. 11. Динамика влагосодержания во внешнем штукатурном слое в течение 10-ого года расчета, (первый расчетный месяц – июль)

В отличие от утеплителя, CLT-панель (рис. 10) демонстрирует классический годовой цикл, характерный для ограждающих конструкций отапливаемых зданий в холодном климате. Накопление влаги происходит осенью и зимой, достигая максимума в апреле (9-й месяц), а минимальные значения наблюдаются в сентябре. Это объясняется положением панели на «тёплой» стороне стены: зимой максимальный градиент парциального давления водяного пара вызывает его диффузию наружу, и в порах древесины растёт относительная влажность, что приводит к сорбционному увлажнению. Летом панель прогревается, процесс меняет направление, и происходит десорбция влаги. Конструкции с обшивкой по деревянному каркасу имеют стабильно более высокое влагосодержание, чем бескаркасные аналоги. В пиковый период (апрель) их влажность достигает  $\sim 9,22\%$ , а минимальное значение (август) составляет  $\sim 9,0\%$ .

В отличие от утеплителя и CLT-панели, влажностный режим внешнего штукатурного слоя (рис. 11), находящегося на границе с наружной средой, демонстрирует сложный бимодальный (двухпиковый) годовой цикл. Это свидетельствует о том, что на него влияют два разнонаправленных физических процесса. Процесс интенсивного увлажнения происходит зимой, достигая своего максимума в феврале (7-й месяц). Пиковое влагосодержание составляет  $\sim 3,15\%$  для бескаркасной системы и  $\sim 3,08\%$  для системы с каркасом. Этот пик обусловлен диффузией водяного пара изнутри помещения наружу. В зимний период, когда температурный градиент максимален, водяной пар, проходя через всю толщу стены, достигает холодного, практически замороженного штукатурного слоя. В этой зоне его

относительная влажность резко возрастает, что приводит к интенсивной сорбции влаги материалом. Это доминирующий механизм увлажнения для данного слоя.

Менее выраженный, локальный пик влажности наблюдается в октябре (3-й месяц), где влагосодержание достигает  $\sim 2,2\%$ . Этот пик является реакцией на летне-осеннее увлажнение со стороны наружного воздуха. В период высокой абсолютной влажности наружного воздуха (конец лета – начало осени) происходит диффузионный поток, направленный извне внутрь. Штукатурный слой, как первый барьер, сорбирует часть этой влаги.

Сравнение кривых показывает, что наличие или отсутствие деревянного каркаса практически не влияет на влажностный режим штукатурного слоя: различия между системами минимальны на всём протяжении года.

Результаты расчётов влагосодержания сведены в таблицу 5, где они сопоставлены с нормативными значениями эксплуатационной влажности для условий А и предельно допустимым приращением за период влагонакопления.

Для минеральной ваты и CLT-панелей максимальная расчётная влажность материала в последний год моделирования ( $0,37\text{--}0,40\%$  и  $8,91\text{--}9,24\%$  соответственно) не превышает нормативных значений для условий эксплуатации ( $2\%$  и  $15\%$ ) и не превышает предельно допустимое приращение влажности за период влагонакопления для минеральной ваты ( $<3\%$ ), что свидетельствует об отсутствии риска критического увлажнения

Для наружного штукатурного слоя расчётное приращение влажности за период влагона-

копления составляет 1,21 % (бескаркасная система) и 1,13 % (система с деревянным каркасом), что также ниже допустимого значения 2 %. Однако максимальная расчётная влажность

(3,08–3,16 %) превышает нормативные 2 %, что указывает на хроническое переувлажнение слоя и высокий риск морозной деструкции, снижения адгезии и долговечности фасадной системы.

Таблица 5

### Сравнение нормативной влажности материала конструкций с расчетными показателями

Материал	Влажность материала расчетная максимальная в последний год расчета, %				Влажность для условия эксплуатации A,w, %*	Предельное допустимое приращение влажности за период влагонакопления $\Delta w$ , %*
	с облицовкой бескаркасного типа		с обшивкой по деревянному каркасу			
	СФТК	НФС	СФТК	НФС		
Минеральная вата	0,40	0,40	0,37	0,38	2	3
CLT-панель	8,91	9,00	9,24	9,22	15	Нет в нормативе
Наружный штукатурный слой	3,16	–	3,08	–	2	2

\* Согласно СП 50.13330.2024.

**Выводы.** Наилучшие теплозащитные характеристики продемонстрировала система фасадной теплоизоляции с бескаркасной облицовкой (СФТК), обеспечившая минимальный тепловой поток на внутренней поверхности (12,14 Вт/м<sup>2</sup>) и максимальное сопротивление теплопередаче (4,78 м<sup>2</sup>·°C/Вт).

Все исследованные конструкции обеспечивают температуру внутренней поверхности выше точки росы (11,6 °C), что исключает риск поверхностной конденсации.

Долгосрочное моделирование (10 лет) показало стабилизацию влажностного режима после 4–5 лет эксплуатации без тенденции к прогрессирующему увлажнению. Влагосодержание CLT-панелей (8,7–9,2 %) стабильно ниже критического уровня 12 %.

Выявлен аномальный характер влагонакопления в минеральной вате с максимумом в тёплый период года, что требует дополнительного изучения механизмов влагопереноса.

В системах с деревянным каркасом обнаружены локальные зоны повышенной влажности в местах расположения стоек, где нулевая изотерма проходит через древесину, создавая риск циклического замораживания-оттаивания.

Наиболее уязвимым элементом является наружный штукатурный слой СФТК, где расчётная влажность превышает нормативные значения, что требует конструктивных мер защиты.

Для обеспечения долговечности конструкций рекомендуется отдавать предпочтение бескаркасным системам облицовки, демонстрирующим лучшие теплотехнические характеристики и более благоприятный влажностный режим. При использовании систем с деревянным каркасом необходим особый контроль герметичности и па-

роизоляции в зонах примыкания каркасных элементов к несущим CLT-панелям для предотвращения локального переувлажнения и промерзания древесины.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Pina J.C., Saavedra Flores E.I., Saavedra K. Numerical study on the elastic buckling of cross-laminated timber walls subject to compression // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 199. Pp. 82–91. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.013.
- Asdrubali F., Ferracuti B., Lombardi L., Guattari C., Evangelisti L., Grazieschi G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications // *Building and Environment*. 2017. Vol. 114. Pp. 307–332. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.033.
- Li J., Rismanchi B., Ngo T. Feasibility study to estimate the environmental benefits of utilising timber to construct high-rise buildings in Australia // *Building and Environment*. 2019. Vol. 147. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.052.
- Wang L., Ge H. Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies: a stochastic approach // *Building and Environment*. 2016. Vol. 97. Pp. 11–25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.034.
- Tamagnone G., Rinaldin G., Fragiaco M. A novel method for non-linear design of CLT wall systems // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 167. Pp. 760–771. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.010.
- Head M., Levasseur A., Beaugard R., Margni M. Dynamic greenhouse gas life cycle inventory and impact profiles of wood used in Canadian buildings // *Building and Environment*.

2020. Vol. 173. 106751. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106751.
7. Pangh H., Hosseinabadi H. Z., Kotlarewski N., Moradpour P., Lee M., Nolan G. Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 208. Pp. 535–542. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.010.
8. Hassanieh A., Valipour H. R., Bradford M. A. Experimental and numerical investigation of short-term behaviour of CLT-steel composite beams // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 144. Pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.052.
9. Cho H.M., Wi S., Chang S.J., Kim S. Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 231. Pp. 1353–1363. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.197.
10. Ljunggren F., Fredriksson M., Johansson N., Sasic Kalagasidis A. Cross-laminated timber: a state-of-the-art review of moisture, fire, acoustics, and energy-related aspects // *Wood Material Science & Engineering*. 2025. Pp. 1–23. DOI: 10.1080/17480272.2025.2507145.
11. Košny J., Kossecka E. Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs // *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34, № 5. Pp. 445–454. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00122-0.
12. Leblond P. L'essentiel de la RT 2012-2e éd.: Obligations et mise en oeuvre de la réglementation thermique. Dunod, 2015. 256 p.
13. Theodosiou T.G., Tsikaloudaki K., Chastas P., Kontoleon K.J. Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 109. Pp. 377–384. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.037.
14. Simões N., Prata J., Tadeu A. 3D Dynamic Simulation of Heat Conduction through a Building Corner Using a BEM Model in the Frequency Domain // *Energies*. 2019. Vol. 12, № 23. P. 4595. DOI: 10.3390/en12234595.
15. Zhang S., Huang Z., Wu Y., Zhu Y. Effect of Thermal Bridge in Light-Frame Wood Wall // *BioResources*. 2023. Vol. 18, № 1. Pp. 367–381. DOI: 10.15376/biores.18.1.367-381.
16. Oreszczyn T. Cold bridging at corners: Surface temperature and condensation risk // *Building Services Engineering Research and Technology*. 1988. Vol. 9(4). Pp. 167–175. DOI: 10.1177/014362448800900404.
17. Imamura F.B.T., Chen Y., Deng L., Chui Y.H. Dimensional Changes of Cross-laminated Timber Basement Walls Under Ambient Humidity Variation // *BioResources*. 2025. Vol. 20(2). Pp. 4568–4589. DOI: 10.15376/biores.20.2.4568-4589.
18. Kordziel S., Pei S., Glass S.V., Zelinka S., Tabares-Velasco P.C. Structure moisture monitoring of an 8-story mass timber building in the Pacific Northwest // *Journal of Architectural Engineering*. 2019. Vol. 25(4). 04019019. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000367
19. Finch G. High-rise wood building enclosures // *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference*. 2016. Pp. 679–692.
20. Tripathi J., Rice R.W. Finite element modelling of heat and moisture transfer through cross laminated timber panels // *BioResources*. 2019. Vol. 14, № 3. Pp. 6278–6293. DOI: 10.15376/biores.14.3.6278-6293.
21. Wang J. Construction Moisture Management—Cross Laminated Timber // Stirling, R., Lum, C., (Eds). 2020.
22. Kordziel S., Glass S.V., Boardman C.R., Munson R.A., Zelinka S. L., Pei S., Tabares-Velasco P.C. Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope // *Building and Environment*. 2020. Vol. 177. 106866. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106866.
23. Alsayegh G., Mukhopadhyaya P., Wang J., Zalok E., van Reenen D. Preliminary characterization of physical properties of cross-laminated-timber (CLT) panels for hygrothermal modelling // *Advances in Civil Engineering Materials*. 2013. Vol. 2 (1). Pp. 472–484. DOI: 10.1520/ACEM20120048.
24. Назиров Р.А., Алиев С.А., Жжонных А.М. Влияние клеевого состава на гигротермические свойства CLT-панели // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 1(781). С. 116–122. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-116-122.

*Информация об авторах*

**Алиев Семур Асиф оглы**, аспирант кафедры строительных конструкций и управляемых систем. E-mail: Saliev@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79.

Поступила 02.09.2025 г.

© Алиев С.А., 2026

**Aliev S.A.**

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

\*E-mail: Saliev@sfu-kras.ru

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HEAT AND MOISTURE REGIME IN CORNER JOINTS OF EXTERIOR WALLS MADE OF CLT PANELS WITH ETICS AND VENTILATED FACADE SYSTEMS

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of the hygrothermal performance of corner joints in cross-laminated timber (CLT) wall assemblies with different façade systems: an external thermal insulation composite system (ETICS) and a ventilated façade system (VFS). Calculations were performed using numerical simulation in COMSOL Multiphysics, taking into account the climatic conditions of Krasnoyarsk and the influence of the adhesive layer in CLT panels. Temperature fields, relative humidity distribution, and moisture content dynamics in the wall layers over a ten-year service period were determined. It was shown that the minimum inner surface temperatures in all analyzed configurations exceed the dew-point temperature, thereby eliminating the risk of surface condensation. Potential zones of local moisture accumulation were identified at the corner joints of timber-frame assemblies due to the passage of the zero isotherm through frame members. The maximum material moisture levels comply with the requirements of SP 50.13330.2024 and do not result in moisture accumulation within the structure. It was established that cladding systems without a supporting frame exhibit slightly more favorable thermal and moisture protection performance compared to timber-frame assemblies.

**Keywords:** Cross-Laminated Timber, CLT, hygrothermal analysis, corner joint, numerical modeling, façade systems, moisture accumulation.

### REFERENCES

1. Pina J.C., Saavedra Flores E.I., Saavedra K. Numerical study on the elastic buckling of cross-laminated timber walls subject to compression. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 199. Pp. 82–91. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.013.
2. Asdrubali F., Ferracuti B., Lombardi L., Guattari C., Evangelisti L., Grazieschi G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*. 2017. Vol. 114. Pp. 307–332. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.033.
3. Li J., Rismanchi B., Ngo T. Feasibility study to estimate the environmental benefits of utilising timber to construct high-rise buildings in Australia. *Building and Environment*. 2019. Vol. 147. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.052.
4. Wang L., Ge H. Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies: a stochastic approach. *Building and Environment*. 2016. Vol. 97. Pp. 11–25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.034.
5. Tamagnone G., Rinaldin G., Fragiaco M. A novel method for non-linear design of CLT wall systems. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 167. Pp. 760–771. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.010.
6. Head M., Levasseur A., Beauregard R., Margni M. Dynamic greenhouse gas life cycle inventory and impact profiles of wood used in Canadian buildings. *Building and Environment*. 2020. Vol. 173. P. 106751. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106751.
7. Pangh H., Hosseinabadi H.Z., Kotlarewski N., Moradpour P., Lee M., Nolan G. Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 208. Pp. 535–542. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.010.
8. Hassanieh A., Valipour H.R., Bradford M.A. Experimental and numerical investigation of short-term behaviour of CLT-steel composite beams. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 144. Pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.052.
9. Cho H.M., Wi S., Chang S.J., Kim S. Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 231. Pp. 1353–1363. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.197.
10. Ljunggren F., Fredriksson M., Johansson N., Sasic Kalagasidis A. Cross-laminated timber: a state-of-the-art review of moisture, fire, acoustics, and energy-related aspects. *Wood Material Science & Engineering*. 2025. Pp. 1–23. DOI: 10.1080/17480272.2025.2507145.
11. Košny J., Kossecka E. Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34. No. 5. Pp. 445–454. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00122-0.
12. Leblond P. L'essentiel de la RT 2012-2e éd.: Obligations et mise en oeuvre de la réglementation thermique. Dunod, 2015. 256 p.

13. Theodosiou T.G., Tsikaloudaki K., Chastas P., Kontoleon K.J. Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 109. P. 377–384. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.027.
14. Simões N., Prata J., Tadeu A. 3D Dynamic Simulation of Heat Conduction through a Building Corner Using a BEM Model in the Frequency Domain. *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 23. 4595. DOI: 10.3390/en12234595.
15. Zhang S., Huang Z., Wu Y., Zhu Y. Effect of Thermal Bridge in Light-Frame Wood Wall. *BioResources*. 2023. Vol. 18. No. 1. Pp. 367–381. DOI: 10.15376/biores.18.1.367-381.
16. Oreszczyń T. Cold bridging at corners: Surface temperature and condensation risk. *Building Services Engineering Research & Technology*. 1988. Vol. 9. No. 4. Pp. 167–175. DOI: 10.1177/014362448800900404.
17. Imamura F.B.T., Chen Y., Deng L., Chui Y.H. Dimensional Changes of Cross-laminated Timber Basement Walls Under Ambient Humidity Variation. *BioResources*. 2025. Vol. 20. No. 2. Pp. 4568–4589. DOI: 10.15376/biores.20.2.4568-4589.
18. Kordziel S., Pei S., Glass S.V., Zelinka S., Tabares-Velasco P.C. Structure moisture monitoring of an 8-story mass timber building in the Pacific Northwest. *Journal of Architectural Engineering*. 2019. Vol. 25. No. 4. 04019019. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000367.
19. Finch G. High-rise wood building enclosures. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference*. 2016. Pp. 679–692.
20. Tripathi J., Rice R.W. Finite element modeling of heat and moisture transfer through cross laminated timber panels. *BioResources*. 2019. Vol. 14. No. 3. Pp. 6278–6293. DOI: 10.15376/biores.14.3.6278-6293.
21. Wang J. Construction Moisture Management—Cross Laminated Timber. In: Stirling R., Lum C. (Eds.). 2020.
22. Kordziel S., Glass S.V., Boardman C.R., Munson R.A., Zelinka S.L., Pei S., Tabares-Velasco P.C. Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope. *Building and Environment*. 2020. Vol. 177. 106866. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106866.
23. Alsayegh G., Mukhopadhyaya P., Wang J., Zalok E., van Reenen D. Preliminary characterization of physical properties of cross-laminated-timber (CLT) panels for hygrothermal modelling. *Advances in Civil Engineering Materials*. 2013. Vol. 2. No. 1. Pp. 472–484. DOI: 10.1520/ACEM20120048.
24. Nazirov R.A., Aliev S.A., Zzhonykh A.M. Influence of the adhesive composition on the hygrothermal properties of the CLT panel [Vliyaniye kleevogo sostava na gigrotermicheskie svoystva CLT-paneli]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2024. No. 1(781). Pp. 116–122. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-116-122. (rus)

*Information about the author*

**Aliev, Semur A.**, Postgraduate Student. E-mail: Saliev@sfu-kras.ru Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 79.

*Received 02.09.2025*

**Для цитирования:**

Алиев С.А. Сравнительный анализ тепло-влажностного режима угловых сопряжений наружных стен из CLT-панелей с системами СФТК и НФС. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2026. № 3. С. 47–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-47-59

**For citation:**

Aliev S.A. Comparative analysis of the heat and moisture regime in corner joints of exterior walls made of CLT panels with etics and ventilated facade systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 3. Pp. 47–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-47-59