

УДК 699.865

Е.А. Харитонов, С.И. Вахрушев

E.A. Haritonova, S.I. Vahrushev

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ СТЕНОВЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ ИЗ CLT-ПАНЕЛЕЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПЕРМСКОГО КРАЯ

STUDY OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS FOR ENCLOSING STRUCTURES OF A BUILDING MADE OF CLT-PANELS IN THE PERM REGION

Объект исследования – стеновые ограждения выполненные из CLT-панелей. Цель исследования – изучение вопроса тепловых потерь здания из CLT-панелей в связи с нарушением стеновой ограждающей конструкции теплотехническими неоднородностями. Использованные методы – программное моделирование вариантов стеновых ограждающих конструкций с использованием CLT-панелей, их сравнительный анализ с выявлением общих достоинств и недостатков, влияющих на показатели их энергоэффективности. Результат исследования – определение слабых мест стеновых ограждающих конструкций, влекущих к потере тепла. Определение наиболее перспективного варианта для улучшения стеновой ограждающей конструкции.

Ключевые слова: инновационные технологии малоэтажного строительства, CLT-панели, утепление дома из деревянных панелей, тепловые потери, теплотехнические неоднородности.

The object of study is wall fences made of CLT-panels. The purpose of the study is to study the issue of heat loss of the building of CLT-panels in connection with the violation of the building envelope by thermal engineering heterogeneities. The methods used are software modeling of the enclosing structure variants; their comparative analysis with the identification of common advantages and disadvantages affecting their energy efficiency indicators. The result of the study is the identification of weak points in structures that lead to heat loss, identifying the most promising to improve the option of enclosing structures.

Keywords: innovative technologies of low-rise construction, CLT-panels, insulation of the house from wooden panels, heat losses, heat engineering heterogeneity.

Постановка вопроса. Европейская технология панельного домостроения из кросс-ламинированной древесины – cross-laminated timber (CLT) (рис. 1) существенно расширила возможности использования дерева в качестве основного строительного материала для малоэтажного строительства [1]. Для сборки здания из CLT-панелей используются металлические элементы, которые существенно снижают сложность монтажа ограждающих конструкций [2].

Но теплопроводность таких крепежей в несколько раз выше теплопроводности дерева. Это приводит к возникновению мостиков холода и снижению температуры на внутренней поверхности стены, образованию конденсата.

Возникновение мостиков холода на данный момент является актуальной проблемой в вопросе снижения тепловых потерь здания. Встает вопрос, отвечает ли стеновая ограждающая конструкция из CLT-панелей в первоначальном «европейском варианте» (без утепления) и с утеплением основным требованиям теплотехнической защиты здания, изложенным в СП50.13330.2012, в климатических условиях Пермского края?



Рис. 1. Технология Cross-laminated Timber

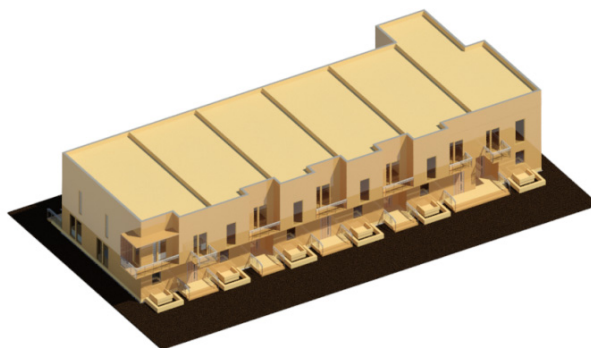


Рис. 2. Объект исследования – двухэтажный таунхаус из CLT-панелей

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является двухэтажный таунхаус в пригороде г. Перми (рис. 2), возведенный по CLT-технологии с использованием соединяющих коннекторов Sherpa [3] для крепления панелей между собой. Объем здания $3695,25 \text{ м}^3$, площадь наружных стен $760,40 \text{ м}^2$. Предмет исследования – стеновые ограждения, выполненные из CLT-панелей и рассчитываемые в климатических условиях Пермского края.

Методика исследования. Оценка эффективности проведена в двух узлах здания (рис. 3) для трех вариантов стенового ограждения, представленных в табл. 1.

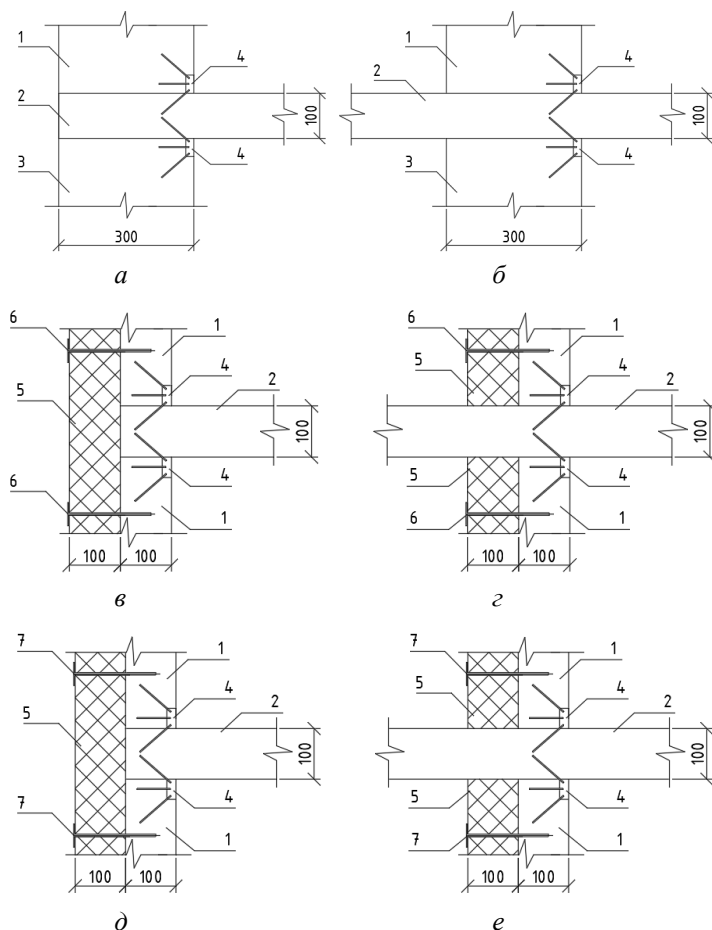


Рис. 3. Варианты стенового ограждения: *а* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию по первому варианту стенового ограждения; *б* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию, включающему плиту балкона по первому варианту стенового ограждения; *в* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию по второму варианту стенового ограждения; *г* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию, включающему плиту балкона по второму варианту стенового ограждения; *д* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию по третьему варианту стенового ограждения; *е* – узел примыкания ограждающей конструкции к перекрытию, включающему плиту балкона по третьему варианту стенового ограждения; 1 – стеновая панель выше уровня перекрытия; 2 – панель перекрытия; 3 – стеновая панель ниже уровня перекрытия; 4 – стальной крепеж-коннектор Sherpa с саморезами; 5 – минераловатный утеплитель; 6 – полимерный крепеж утеплителя со стальной сердцевинной; 7 – полимерный крепеж утеплителя с полиамидной сердцевинной

Таблица 1

Характеристики исследуемых вариантов стенового ограждения

Материал	Толщина δ , м	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Сопротивление теплопередачи слоя конструкции R , (м ² ·°С)/Вт	Сопротивление теплопередачи наружной поверхности ограждения R_{sis} , (м ² ·°С)/Вт	Сопротивление теплопередачи и внутренней поверхности ограждения R_{se} , (м ² ·°С)/Вт	Условное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции (без учета неоднородности конструкции) $R_0^{усл}$, (м ² ·°С)/Вт
1-й вариант: CLT-панель без утепления						
CLT-панель [4]	0,3	0,13	2,31	0,04	0,12	2,47
Металлический коннектор «Sherpa» [3]	–	47	–			
2-й вариант: CLT-панель с утеплителем, крепящимся металлическими дюбелями						
CLT-панель [4]	0,1	0,13	0,77	0,04	0,12	3,63
Минераловатные плиты «Теплокnauf» [5]	0,1	0,04	2,70			
Металлический коннектор Sherpa [3]	–	47	–			
Полимерный дюбель с стальной сердцевиной [6]	–	47	–			
3-й вариант: CLT-панель с утеплителем, крепящимся полимерными дюбелями						
CLT-панель [4]	0,1	0,13	0,77	0,04	0,12	3,63
Минераловатные плиты «Теплокnauf» [5]	0,1	0,04	2,70			
Металлический коннектор Sherpa [3]	–	47	–			
Полимерный дюбель с полиамидной сердцевиной [6]	–	0,03	–			

Исследование вариантов стенового ограждения выполняется с помощью инженерной системы моделирования тепловых полей «ELCUT® Студенческий 6.3.2.2098 SP2» для исходных климатических условий г. Перми:

– зона влажности – нормальная, согласно прил. В СП 50.13330.2012;

– продолжительность отопительного периода $z_{от} = 225$ сут, согласно табл. 3.1 СП 131.13330.2018;

– средняя расчетная температура отопительного периода $t_{ht} = -5,5$ °С, согласно табл. 3.1 СП 131.13330.2018;

– температура холодной пятидневки $t_{н.п} = -35$ °С, согласно табл. 3.1 СП 131.13330.2018;

– температура внутреннего воздуха $t_{в.п} = +21$ °С, согласно прил. 1 СП 50.13330.2012;

– влажность воздуха $\phi = 55$ %, согласно прил. 1 СП 50.13330.2012;

– влажностный режим помещения нормальный;

– условия эксплуатации ограждающих конструкций Б, согласно табл. 2 СП 50.13330.2012;

– коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения $a_{в} = 8,7$ Вт/м²·°С, согласно табл. 4 СП 50.13330.2012;

– коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения $a_{н} = 23$ Вт/м²·°С, согласно табл. 6 СП 50.13330.2012;

– температура точки росы $t_p = 11,62$ °С, согласно прил. (Р) СП 50.13330.2012.

Для анализа вариантов решения стенового ограждения в каждом из них выделяются неоднородности, которые являются мостиками холода и могут повлиять на снижение теплозащитных свойств стены:

– линейные элементы:

а) опирание междуэтажного перекрытия на наружные стены (протяженность 114,67 м);

б) опирание междуэтажного перекрытия, включающего плиту балкона на наружные стены (протяженность 119,96 м);

– точечные элементы, которые являются мостиками холода:

а) соединительный коннектор Sherpa [3] (плотность установки 0,3 (1/м²));

б) дюбель для крепления утеплителя [6] (плотность установки 7 (1/м²)).

Для каждого элемента находится удельный геометрический показатель по формуле

$$i = \frac{I}{S_{\text{нар.стен}}},$$

где I – общая протяженность (количество) элементов.

Первый этап исследования заключается в проверке условия, что приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{пр}}$, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$, должно быть больше или равно нормируемому $R_0^{\text{норм}}$:

$$R_0^{\text{пр}} \geq R_0^{\text{норм}},$$

Нормируемое сопротивление теплопередаче наружных стен для заданных исходных условий г. Перми согласно методике расчета, приведенной в СП 50.13330.2012, $R_o^{\text{норм}} = 3,49 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$.

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции построены анализируемые элементы в программном комплексе «ELCUT® Студенческий 6.3.2.2098 SP2» и получены:

- картины тепловых полей в наружной стене (рис. 4);
- значения тепловых потоков Q , проходящих через наружную стену;
- графики значений температуры по внутреннему контуру ($t_{\text{в.п}}$) ограждающей конструкции (рис. 5).

Потери теплоты $Q_{\text{усл}}$, Вт/м, через расчетную область l , м, определяются по формуле

$$Q_{\text{усл}} = (t_{\text{в.п}} - (-t_{\text{н.п}})) \frac{l}{R_o^{\text{усл}}}.$$

Дополнительные потери теплоты $Q_{\text{доп}}$, Вт/м, через элемент теплотехнической неоднородности определяется по формуле

$$Q_{\text{доп}} = Q - Q_{\text{усл}}.$$

Удельные потери теплоты Ψ , Вт/(м·°C), через элемент теплотехнической неоднородности определяется по формуле

$$\Psi = \frac{Q_{\text{доп}}}{(t_{\text{в.п}} - (-t_{\text{н.п}}))}.$$

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче для каждого варианта наружных стен из CLT-панелей приведен в табл. 2–4.

Второй этап исследования заключается в проверке наружной стены на выполнение санитарно-гигиенических требований тепловой защиты здания (отсутствие конденсата на внутренней поверхности в местах теплопроводных включений – мостиков холода), °C:

$$t_{\text{в.п}} \geq t_{\text{мин}} = t_p + (2 \div 3).$$

В заданных климатических условиях Пермского края

$$t_{\text{мин}} = 11,62 + (2 \div 3) = 14,62 \text{ °C}.$$

Для проверки недопущения выпадения конденсата исследуем графики изменения температуры (рис. 5) по внутреннему контуру (в.к.) стеновой ограждающей конструкции в направлении, показанном на рис. 4.

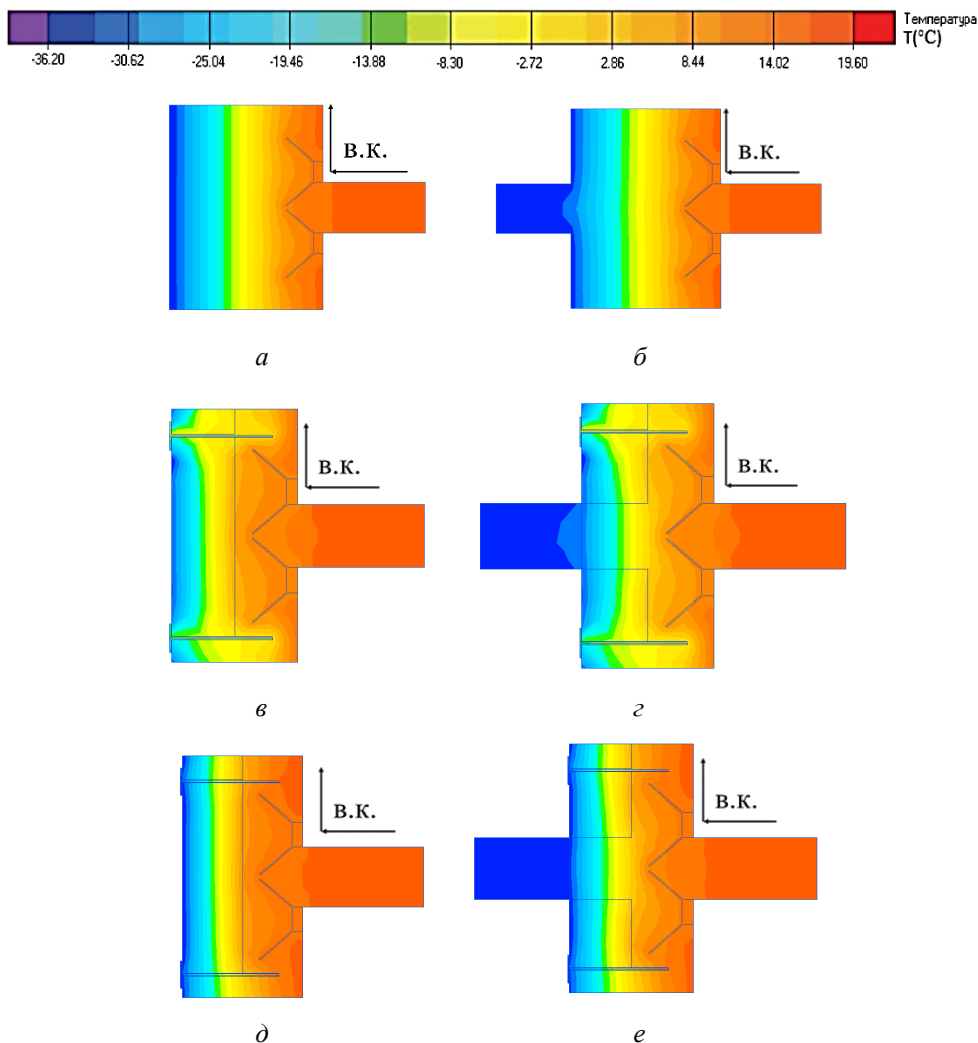


Рис. 4. Картины тепловых полей, где: *a* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию по первому варианту стенового ограждения; *б* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию, включающему конструкцию основания балкона по первому варианту стенового ограждения; *в* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию по второму варианту стенового ограждения; *г* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию, включающему конструкцию основания балкона по второму варианту стенового ограждения; *д* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию по третьему варианту стенового ограждения; *е* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию, включающему конструкцию основания балкона по третьему варианту стенового ограждения

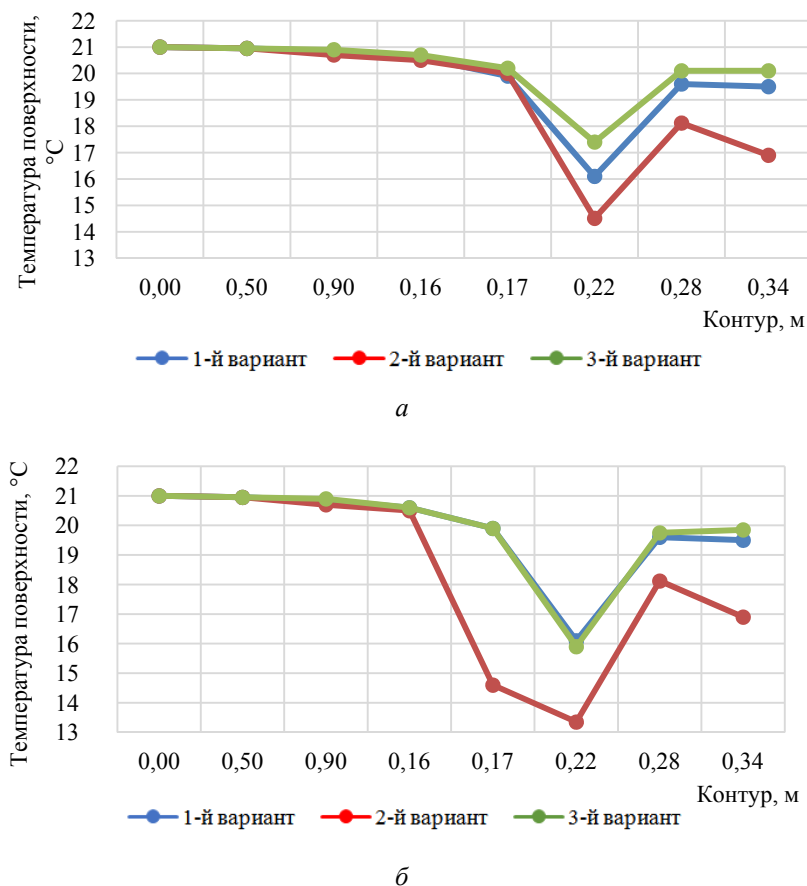


Рис. 5. График температур по внутреннему контуру: *а* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию; *б* – примыкание ограждающей конструкции к перекрытию, включающему конструкцию балконной плиты

Анализ основных этапов исследования. Значения тепловых потоков, полученных по внутреннему контуру здания в разных вариантах решения стенового ограждения, имеют расхождения. Объясняется это тем, что при построении тепловых полей учитывались теплотехнические неоднородности, которые обладают разной теплопередачей. Так, например в первом варианте (рис. 4, *а*, *б*) тепловые поля распределены равномерно, и только в месте включения соединительного коннектора наблюдаются тепловые потери.

Благодаря этому происходит снижение температуры по внутреннему контуру от 21 °С до минимального значения 16,05 °С (рис. 5). Тем не менее, несмотря на тепловые потери (табл. 2), отсутствуют условия для образования точки росы (табл. 5) и, как следствие, выпадения конденсата. Это объясняется тем, что металлический коннектор и саморезы для его крепления располагаются не с наружной стороны, а внутри помещения и не проходят панель насквозь.

Во втором варианте выполнения стены тепловой поток, выходящий из здания, увеличивается по сравнению с первым вариантом на 44 % (табл. 5). Тепловые поля в утепленном варианте распределены неравномерно (рис. 4, в, з) не только в месте включения соединительного коннектора, но и в местах установки полимерного дюбеля со стальным сердечником для крепления утеплителя. Это объясняется тем, что стеновая конструкция с утеплением является слоистой и благодаря дюбелям и коннектору неоднородной. Дюбели расположены с наружной стороны и благодаря высокой теплопроводности стального сердечника (табл. 1) являются мостиками холода и приводят к значительным тепловым потерям (табл. 3). Вследствие этого происходит снижение температуры по внутреннему контуру от 21 °С до минимального значения 13,20 °С (рис. 5). Это приводит к образованию точки росы (табл. 5) и выпадению конденсата на внутренней поверхности стены.

Таблица 2

Расчет приведенного сопротивления теплопередачи для наружной стены из CLT-панелей без утепления

Элемент	Опираие междуэтажного перекрытия на наружные стены, м/м ²	Опираие междуэтажного перекрытия, включающего плиту балкона на наружные стены, м/м ²	Соединительный коннектор Sherpa с саморезами, 1/м ²
Удельный геометрический показатель i	0,15	0,16	0,30
Потери теплоты через расчетную область Q , Вт/м	96,45	97,87	35,88
Потери теплоты через участок однородной конструкции тех же размеров $Q_{\text{усл}}$, Вт/м	6,17	6,17	1,70
Дополнительные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности $Q_{\text{доп}}$, Вт/м	90,28	91,7	34,18
Удельные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности Ψ , Вт/(м·°С)	1,61	1,64	0,61
Процент потерь, приходящийся на элемент, %	35	38	26
Удельный поток теплоты $Q_{\text{уд}}$, обусловленный элементом, Вт/(м·°С)	0,24	0,26	0,18
Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_0^{\text{пр}}$, Вт/(м·°С)	1,47		

В третьем варианте наружной стены, в отличие от второго, для крепления утеплителя использовались полимерные дюбели с полиамидным сердечником. Теплопроводность таких дюбелей идентична теплопроводности используемого утеплителя, вследствие чего наблюдается схожая с первым вариантом картина тепловых потоков (рис. 5, *д*, *е*), но при этом толщина конструкции сокращается на треть. Снижение температуры по внутреннему контуру происходит только в месте крепления металлического коннектора. Температура изменяется от 21 °С до минимального значения 15,90 °С (рис. 5), что говорит об отсутствии условий для образования точки росы и выпадения конденсата.

Таблица 3

Расчет приведенного сопротивления теплопередачи для наружной стены из CLT-панелей с утеплением и использованием полимерным крепежей со стальной сердцевиной для крепления изоляционного материала

Элемент	Опираие междуэтажного перекрытия на наружные стены, м/м ²	Опираие междуэтажного перекрытия, включающего плиту балкона на наружные стены, м/м ²	Соединительный коннектор Sherpa с саморезами, 1/м ²	Дюбель для крепления утеплителя, 1/м ²
Удельный геометрический показатель, <i>i</i>	0,15	0,16	0,30	7
Потери теплоты через расчетную область Q , Вт/м	163,36	204,14	26,07	6,07
Потери теплоты через участок однородной конструкции тех же размеров $Q_{\text{усл}}$, Вт/м	6,17	6,17	1,70	0,15
Дополнительные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности $Q_{\text{доп}}$, Вт/м	160,19	197,97	24,37	5,92
Удельные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности Ψ , Вт/(м·°С)	2,86	3,53	0,44	0,11
Процент потерь, приходящийся на элемент, %	24	30	7	39
Удельный поток теплоты $Q_{\text{уд}}$, обусловленный элементом, Вт/(м·°С)	0,46	0,57	0,13	0,74
Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_0^{\text{пр}}$, Вт/(м·°С)	0,53			

Таблица 4

Расчет приведенного сопротивления теплопередачи для наружной стены из CLT-панелей с утеплением и использованием полимерных крепежей с полиамидной сердцевиной для крепления изоляционного материала

Элемент	Опираие междуэтажного перекрытия на наружные стены, м/м ²	Опираие междуэтажного перекрытия, включающего плиту балкона на наружные стены, м/м ²	Соединительный коннектор Sherpa с саморезами, 1/м ²	Дюбель для крепления утеплителя, 1/м ²
Удельный геометрический показатель i	0,15	0,16	0,30	7
Потери теплоты через расчетную область Q , Вт/м	66,35	112,00	24,07	1,41
Потери теплоты через участок однородной конструкции тех же размеров $Q_{\text{удл}}$, Вт/м	6,17	6,17	1,70	0,15
Дополнительные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности $Q_{\text{доп}}$, Вт/м	60,18	105,83	22,37	1,26
Удельные потери теплоты через элемент теплотехнической неоднородности Ψ , Вт/(м·°C)	1,07	1,90	0,40	0,02
Процент потерь приходящийся на элемент, %	32	56	12	Менее 0,001
Удельный поток теплоты, обусловленный элементом $Q_{\text{уд}}$, Вт/(м·°C)	0,16	0,30	0,12	0,16
Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_0^{\text{пр}}$, Вт/(м·°C)	1,35			

Таблица 5

Анализ основных результатов исследования

Вариант ограждающей конструкции	Без утепления		С утеплителем и полимерным дюбелем со стальной сердцевиной		С утеплителем и полимерным дюбелем со полиамидной сердцевиной	
$R_0^{\text{норм}}$, Вт/(м·°С)	3,56		3,56		3,56	
$R_0^{\text{учл}}$, Вт/(м·°С)	2,47		3,63		3,63	
$R_0^{\text{пр}}$, Вт/(м·°С)	1,47		0,57		1,35	
$R_0^{\text{пр}} \geq R_0^{\text{норм}}$	1,47 < 3,49		0,57 < 3,49		1,35 < 3,49	
Процент снижения сопротивления ограждающей конструкции за счет теплотехнических неоднородностей, %	40		84		62	
	Узел 1	Узел 2	Узел 1	Узел 2	Узел 1	Узел 2
$t_{\text{мин}}$, °С	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62
$t_{\text{в.п}}$, °С	16,05	16,10	14,50	13,20	17,40	15,90
$t_{\text{в.п.}} \geq t_{\text{мин}}$	16,05 > 14,62	16,10 > 14,62	14,50 < 14,62	13,20 < 14,62	17,40 > 14,62	15,90 > 14,62

Примечание: – необходимое условие выполняется; – необходимое условие не выполняется.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемые конструктивные решения стенового ограждения не позволяют обеспечить условия комфортного проживания в исследуемом здании (табл. 5). В каждом варианте наблюдается невыполнение первого условия теплотехнической защиты здания $R_0^{\text{пр}} \geq R_0^{\text{норм}}$, а также невыполнение второго условия $t_{\text{в.п}} \geq t_{\text{мин}}$ в варианте с использованием металлических дюбелей для крепления утеплителя к стеновому ограждению.

Снижение сопротивления теплопередаче стены во втором варианте (табл. 3) наблюдалось в большей степени из-за металлических неоднородностей (в сумме 46 % от всего снижения). В общем итоге снижение сопротивление теплопередачи стеновой ограждающей конструкции наблюдалось на 87 % (табл. 5), что свидетельствует о серьезной недоработке данного узла, в отличие от похожего варианта утепления, но с использованием полимерных дюбелей с полиамидным сердечником. В данном варианте общее снижение сопротивления наружной стены снизилось на 62 % (табл. 5), при этом на дюбель для крепления утеплителя пришлось менее 0,001 % тепловых потерь (табл. 3).

Выводы. Исследование трех вариантов конструктивных решений стеновой ограждающей конструкции показало, что теплопотери, возникающие из-за нарушения однородности, могут достигать 80 % и более. Это объясняется возникновением мостиков холода, что наглядно демонстрирует программа Elcut. Выяснено, минимальная потеря тепла (40 %) наблюдается в первом варианте стенового ограждения – без утепления («европейский» вариант). Это объясняется тем, что данная конструкция наружной стены имеет минимальное включение неоднородностей. В климатических условиях Пермского края данный вариант использоваться не может, так как ограждающая конструкция стены требует увеличения сопротивления теплопередачи, а это можно осуществить только путем увеличения толщины панели, но выпуск CLT-панелей толщиной более 300 мм не производится.

Замена полимерного дюбеля со стальным сердечником на полимерный дюбель с полиамидным сердечником повышает энергоэффективность наружной стены из CLT-панелей с точки зрения устранения мостиков холода на 22 %. Поэтому третий вариант является самым перспективным из трех исследуемых для дальнейшей доработки снижения потерь. Для более результативного повышения энергоэффективности по наружному контуру требуется увеличение теплоизоляционного слоя стены.

Данное исследование показало, что для повышения энергоэффективности здания мало рассчитывать только условное сопротивление теплопередачи. Необходимо тщательно учитывать все теплотехнические неоднородности, входящие в стеновую ограждающую конструкцию и потери тепла, которые на них приходится. Рациональный выбор вида теплоизоляционного материала и способа его крепления не только снижает теплопотери и повышает тепловой комфорт помещения, но и исключает возможность возникновения конденсата на внутренней поверхности стены, что увеличивает срок службы ограждающей конструкции.

Список литературы

1. Vestin A., Säfsten K., Löfving M. On the way to a smart factory for single-family wooden house builders in Sweden // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – No. 25. – P. 459–470.
2. Харитоновна Е.А., Вахрушев С.И. Анализ патентных исследований в области крепления стен здания из CLT-панелей. Классификация соединений, применяемых для стыковки CLT-панелей // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. – 2019. – № 1. – С. 192–199.
3. Austrian Civil Engineering Institute. Patent AT. ETA-18/0083. – 2018. – URL: http://ru.sherpa-connector.com/dl/ETA-18-0083%20CLT%20Connector_en.pdf (accessed 06 April 2019).

4. Строительство деревянных домов. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pslcomp.ru/tehnologii-stroitelstva-derevyannyh-domov/clt> (дата обращения: 24.05.2019).

5. Knaufinsulation. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.Knaufinsulation.ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B1/%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BEknauf-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BB%D0%B8-%D0%B8-%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BD> (accessed 24 April 2019).

6. Утеплим все. Виды и особенности фасадных дюбелей [Электронный ресурс] // [Uteplimvse.ru](http://uteplimvse.ru): информ.-справочный портал. – URL: <http://uteplimvse.ru/dybely/fasadnie.html> (дата обращения: 24.05.2019).

Получено 9.09.2019

Харитоновна Елена Андреевна – студентка, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: haritonowa13@mail.ru.

Вахрушев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: spstf@pstu.ru.