

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.12

УДК 699.86

Д.Н. Сурсанов, А.Б. ПономаревПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ САМОНЕСУЩЕЙ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ

Рассматривается методика оценки приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции на примере не несущей трехслойной стеновой панели из таумалита. Приведен краткий теоретический обзор элементного подхода к расчету удельных потерь теплоты через плоские, линейные и точечные элементы фрагмента ограждающей конструкции. Подробно рассмотрены два случая расчета линейных удельных потерь теплоты на примере узла стыка стен различной толщины и подоконного узла. В качестве примера фрагмента ограждающей конструкции выбрана трехслойная не несущая стеновая панель. Дано конструктивное описание панели, ее слоев, основных размеров, характеристик материалов панели. В соответствии с требованиями методики расчета панель была разбита на один плоский и пять линейных элементов, определены геометрические характеристики для каждого вида элемента. Моделирование температурных полей осуществлялось в программном комплексе ANSYS Workbench 16.1. Геометрическая модель создавалась с помощью программного комплекса AutoCAD 2010. После создания конечно-элементных моделей и задания соответствующих граничных условий были построены температурные поля каждого из пяти линейных элементов. В результате были определены удельные потери теплоты по каждому из элементов. В ходе дальнейшего анализа были выявлены наиболее «слабые» с точки зрения тепловой защиты участки стеновой панели, требующие доработки. В качестве проблемных указаны вопросы использования нерегулярной сетки конечных элементов для расчета средней температуры поверхности ограждающей конструкции, а также отсутствие в СП 50.13330.2012 критерия, определяющего размеры зоны влияния теплопроводного включения при рассмотрении линейного элемента.

Ключевые слова: приведенное сопротивление теплопередаче, температурное поле, теплопроводное включение, тепловой поток, метод конечных элементов, ANSYS, плоский теплопроводный элемент, линейный теплопроводный элемент, точечный теплопроводный элемент.

D.N. Sursanov, A.B. PonomarevPerm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

REDUCED THERMAL RESISTANCE CALCULATION OF THE SELF-SUPPORTING WALL PANEL

Reduced thermal resistance of enclosing structure calculation method and example calculation of enclosing structure as wall panel are presented. Short theoretical overview of the element calculation approach is presented. The calculation of the specific heat loss through the clear field, linear and point transmittances of the building envelope discussed in details. Two calculation cases of the linear specific

heat losses are considered in detail. First example represented by joint assembly of different thicknesses walls. Second example represented by window sill assembly. As an example of enclosing structure fragment, a three-layer wall panel is considered. Given the general design parameters, materials it consists of, the main dimensions, material characteristics of the panel. In accordance with the calculation method the panel divided into one clear field transmittance and five linear transmittances. Geometric characteristics for each element are defined. Modelling of temperature fields was carried out in the ANSYS Workbench 16.1. Creating a geometric model was carried out using the Autodesk AutoCAD 2010. After creating finite element models and setting the appropriate boundary conditions temperature fields were constructed for each of the five linear transmittances. As a result, the specific heat losses for each of the transmittances were determined. Further analysis revealed the most "weak" (in terms of thermal protection) details of the wall panel which required improvement. Next problems of calculation method were determined: irregular finite element mesh for average surface temperature calculation, the absence of SP 50.13330.2012 criterion that determines the size of the influence zone of heat-conducting linear transmittance.

Keywords: reduced thermal resistance, R-value, thermal field, thermal conductive element, heat flux, FEM, ANSYS, clear field transmittance, linear transmittance, point transmittance.

Введение

На сегодняшний день вопрос энергосбережения и проектирования оптимальных с точки зрения тепловой защиты конструкций как никогда актуален для строительной отрасли. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003» обозначили новую методику определения основной теплозащитной характеристики здания – приведенного сопротивления теплопередаче. Данная методика расчета достаточно полно изложена ее разработчиками как в нормативной литературе¹, так и в научных статьях [1–7].

Вышедший, судя по году принятия, раньше СП² ГОСТ Р 54851–2011 «Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче»³ является значимым дополнением к пониманию методики СП⁴, однако ссылается только на СП 23-101–2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»⁵ и в некоторых своих частях на отмененные СНиП 23-02–2003⁶.

СНиП 23-02–2003 предполагал деление конструкций здания на однослойные и многослойные, однородные и неоднородные. Однако упрощенные геометрические схемы теплопроводных включений, дан-

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. М., 2012.

² Там же.

³ ГОСТ Р 54851–2011. Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче. М., 2012.

⁴ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. М., 2012.

⁵ СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2004.

⁶ СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий. М., 2004.

ные в приложениях СП 23-101–2004 и частично перенесенные в ГОСТ Р 54851–2011, на данный момент не способны отразить все многообразие теплопроводных включений, возникающих в современных зданиях. Фрагментный подход к расчету приведенного сопротивления теплопередаче по температурным полям, хотя и был представлен в СП 23-101–2004, сложен в практическом применении [1].

Решением этой проблемы стало использование методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче по температурным полям, благодаря которой стало возможным учитывать влияние самых различных теплопроводных включений.

Кроме изменения расчетной методики, изменилось и понимание величины сопротивления теплопередаче. В понимании современных нормативных документов приведенное сопротивление теплопередаче – комплексная величина, характеризующая всю теплозащитную оболочку здания.

Для выполнения требований тепловой защиты СП 50.13330.2012 необходимо одновременное выполнение трех условий:

а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);

б) удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

в) температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование).

Из сказанного выше следует, что условия а) и в) выполняются при конструировании отдельных узлов, а условие б) может быть удовлетворено только при рассмотрении конкретного здания.

В данной работе рассматривается вопрос соблюдения поэлементных и санитарно-гигиенических требований тепловой защиты на примере трехслойной не несущей стеновой панели в условиях г. Перми.

1. Теоретические основы методики определения приведенного сопротивления теплопередаче по СП 50.13330.2012

Сопротивление теплопередаче многослойной конструкции, состоящей из однородных слоев (рис. 1, а) определяется по формуле

$$R_o = \frac{1}{\alpha_b} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (1)$$

где R_o – сопротивление теплопередаче ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$); α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$).

При этом считается, что плотность теплового потока q_1 ($\text{Вт}/\text{м}^2$) постоянна по всей глади поверхности конструкции. Когда в составе конструкции появляются неоднородные включения, плотность теплового потока в местах этих включений изменяется, что влияет на сопротивление теплопередаче конструкции (рис. 1, б).

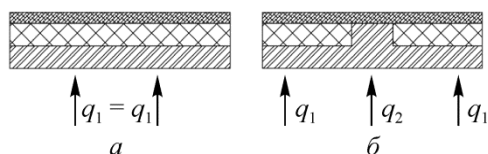


Рис. 1. Примеры ограждающих конструкций:

a – многослойная однородная;

б – многослойная с теплопроводным включением

Методика СП 50.13330.2012 предлагает классифицировать теплопроводные включения по размерности их проекций на поверхность конструкции и при расчетах выделять точечные, линейные и плоские элементы. Приведение различных узлов конструкций к тому или иному виду элементов подробно изложено в нормативных документах⁷ и публикациях [1–6, 8, 9], но в конечном итоге решение остается за расчетчиком. Оценивать удельные потери теплоты через различные элементы предлагается путем сравнения теплового потока, проходящего через условную конструкцию без теплопроводного включения и теплового потока с теплопроводным включением.

⁷ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М., 2012; ГОСТ Р 54851-2011. Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче. М., 2012; EN ISO 6946: 2007. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance Calculation method; ISO 9869:1994 Thermal insulation. Building elements. In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания R_0^{np} , $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, определяется по формуле

$$R_0^{np} = \frac{1}{1/R_0^{усл} + \sum l_j \psi_j + \sum n_k \chi_k} = \frac{1}{\sum a_i U_i + \sum l_j \psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (2)$$

где $R_0^{усл}$ – условное, осредненное по площади сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания либо выделенной ограждающей конструкции ($m^2 \cdot ^\circ C / Вт$); l_j – протяженность линейной неоднородности j -го вида, приходящаяся на $1 m^2$ фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, m/m^2 ; ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, $Вт/(m \cdot ^\circ C)$; n_k – количество точечных неоднородностей k -го вида, приходящихся на $1 m^2$ фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, шт./ m^2 ; χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, $Вт/^\circ C$; a_i – площадь плоского элемента конструкции i -го вида, приходящаяся на $1 m^2$ фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, m^2/m^2 ; U_i – коэффициент теплопередачи однородной i -й части фрагмента теплозащитной оболочки здания (удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида), $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Рассмотрим особенности определения удельных потерь теплоты через плоские, линейные и точечные неоднородности.

Плоский элемент

Удельные потери теплоты через плоский элемент U_i , $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$, определяются по формуле (1). При этом удельный вес этих показателей определяется геометрическим параметром a_i , m^2/m^2 .

Линейный элемент

Удельные потери теплоты через линейный элемент ψ_j , $Вт/(m \cdot ^\circ C)$, определяются по формуле

$$\psi_j = \frac{\Delta Q_j^L}{t_B - t_H}, \quad (3)$$

где $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха, °С; ΔQ_j^L – дополнительные потери теплоты через линейную теплотехническую неоднородность j -го вида, приходящиеся на 1 метр погонной длины, Вт/м, определяемые по формуле

$$\Delta Q_j^L = Q_j^L - Q_{j,1} - Q_{j,2}, \quad (4)$$

где Q_j^L – потери теплоты через расчетную область с линейной теплотехнической неоднородностью j -го вида, приходящиеся на 1 метр погонной длины стыка, являющиеся результатом расчета двумерного температурного поля, Вт/м; $Q_{j,1}, Q_{j,2}$ – потери теплоты через участки однородных частей фрагмента, вошедшие в расчетную область при расчете температурного поля области с линейной теплотехнической неоднородностью j -го вида, Вт/м, определяемые по формулам

$$Q_{j,1} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{o,j,1} \cdot 1 (\text{м})} S_{j,1}, \quad (5)$$

$$Q_{j,2} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{o,j,2} \cdot 1 (\text{м})} S_{j,2}, \quad (6)$$

где $S_{j,1}, S_{j,2}$ – площади однородных частей конструкции, вошедшие в расчетную область при расчете температурного поля, м². При этом величина $S_{j,1} + S_{j,2}$ равна площади расчетной области при расчете температурного поля.

На этом моменте стоит остановиться подробнее и дать ряд пояснений к использованию формул (4)–(6).

Потери теплоты Q_j^L через расчетную область с линейной теплотехнической неоднородностью вычисляются на основе анализа **внутренней** поверхности ограждающей конструкции, введенной в расчет, т.е. стороны с более высокой температурой.

Наличие двух вычитаемых $Q_{j,1}, Q_{j,2}$ в выражении (4) обусловлено предположением, что рассматриваемый узел состоит именно из двух условно однородных частей, расположенных по сторонам теплопроводного включения. Пример такого узла приведен на рис. 2.

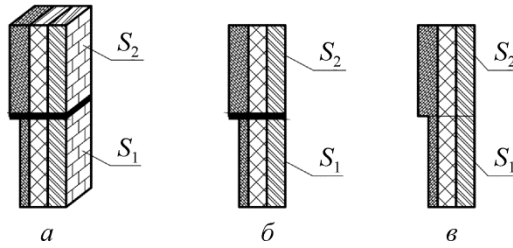


Рис. 2. Горизонтальный стык: *а* – узел конструкции; *б* – расчетная модель узла конструкции с теплопроводным включением; *в* – расчетная модель узла конструкции той же суммарной площади без теплопроводного включения

Здесь линейным теплопроводным включением является стык стен двух разных толщин. Очевидно, можно выделить две площади условно однородных конструкций – выше и ниже стыка. Удельные потери теплоты через участок стены меньшей толщины (в соответствии с нумерацией) будут составлять $Q_{j,1}$ Вт/м, а удельные потери через участок стены большей толщины – $Q_{j,2}$ Вт/м.

Множитель «1 (м)» в формулах (5), (6) появляется в предположении рассмотрения участка конструкции длиной 1 м (длина стены перпендикулярна плоскости чертежа), а сумма площадей при рассмотрении двумерной модели будет, по сути, являться суммой высот этих участков.

Другая ситуация складывается при рассмотрении узла стыка оконной рамы со стеклопакетом и стены здания (рис. 3).

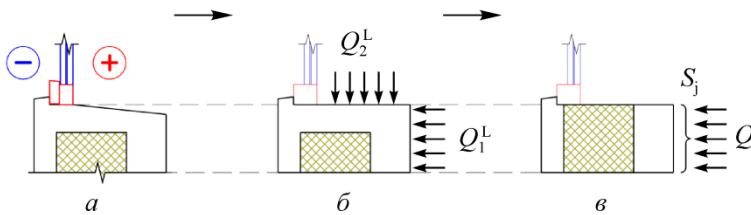


Рис. 3. Подоконный узел: *а* – узел конструкции; *б* – узел конструкции приведенной площади с теплопроводными включениями; *в* – узел конструкции приведенной площади без теплопроводного включения

С учетом требований СП 50.13330.2012 в расчете не участвуют светопрозрачные части конструкций, поэтому здесь мы рассматриваем лишь стену, а в формуле (4) будет фигурировать только одно слагае-

мое. Из-за наличия оконного откоса через него происходят дополнительные теплотери Q_2^L , Вт/м, и формула (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta Q_j^L = Q_j^L - Q_j = (Q_1^L + Q_2^L) - \frac{t_B - t_H}{R_{o,j} \cdot 1(\text{м})} S_j. \quad (7)$$

Последнее, но не менее важное замечание касается использования площади приведения в расчетах. На рис. 3, а оконный откос изначально имеет уклон. На рис. 3, б площадь стены с внутренней стороны мы проецируем на плоскость, параллельную глади стены, и получаем приведенную площадь S_j , м², которая используется для дальнейших расчетов.

Точечный элемент

Удельные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, Вт/(м · °С), определяются по формуле

$$\chi_k = \frac{\Delta Q_k^K}{t_B - t_H}, \quad (8)$$

где ΔQ_k^K – дополнительные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, Вт, определяемые по формуле

$$\Delta Q_k^K = Q_k - \tilde{Q}_k, \quad (9)$$

где Q_k – потери теплоты через узел, содержащий точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, являющийся результатом расчета температурного поля, Вт; \tilde{Q}_k – потери теплоты через тот же узел, не содержащий точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, являющийся результатом расчета температурного поля, Вт.

Здесь стоит отметить, что СП 50.13330.2012 регламентирует расчет трехмерного температурного поля для точечного элемента, а ГОСТ Р 54851–2011 уточняет и использует цилиндрические координаты для расчета точечной неоднородности в виде дюбеля. По мнению авторов, расчет температурного поля как в трехмерных декартовых, так и в трехмерных цилиндрических координатах обеспечит достаточную для инженерных расчетов точность.

Далее рассмотрим вопрос определения приведенного сопротивления теплопередаче на примере трехслойной несущей стеновой панели в условиях г. Перми.

2. Определение приведенного сопротивления теплопередаче теплопередаче несущей трехслойной стеновой панели

2.1. Описание конструкции, выбранной для расчета

Панель представляет собой наружную не несущую стеновую панель. Размеры панели 5740×2750 мм, размеры оконных проемов 880×1820 мм и 1520×1820 мм, балконных дверей – 920×2430 мм. Толщина панели 340 мм. Наружный слой панели толщиной 40 мм и внутренний слой толщиной 120 мм выполнены из таумалита (разновидность гипсобетона), $\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$, средний слой толщиной 180 мм выполнен из каменной ваты Rockwool ВЕНТИ БАТТС ОПТИМА, $\rho_0 = 75 \text{ кг/м}^3$. Общий вид стеновой панели приведен на рис. 4. Арматура композитная, стеклопластиковая, в расчете не учитывается.

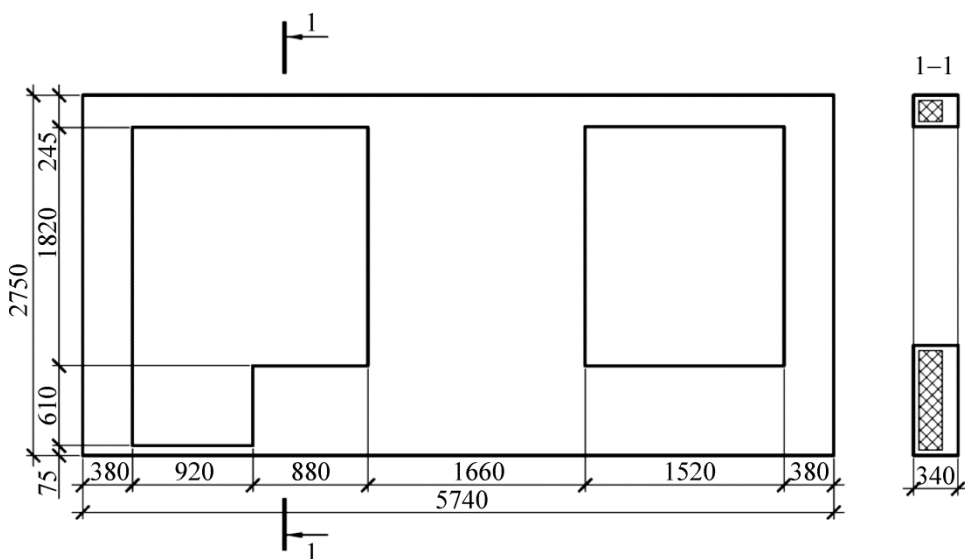


Рис. 4. Общий вид панели

Теплотехнические свойства материалов приведены в табл. 1.

2.2. Перечисление элементов, составляющих ограждающую конструкцию

В рассматриваемой конструкции можно выделить следующие элементы: стеновая панель – плоский элемент 1; верхние оконные от-

косы – линейный элемент 1; нижний откос дверного проема – линейный элемент 2; узкие вертикальные откосы оконных проемов – линейный элемент 3; остальные откосы – линейный элемент 4; внешние ребра – линейный элемент 5.

Таблица 1

Теплотехнические свойства материалов

№ п/п	Наименование материала	Теплопроводность λ_B , Вт/(м·°С)
1	Таумалит	0,47
2	Rockwool ВЕНТИ БАТТС ОПТИМА	0,038
3	Оконная рама	0,12
4	Двухкамерный стеклопакет	0,092

Таким образом, в рассматриваемом фрагменте ограждающей конструкции 1 вид плоского элемента и 5 видов линейных элементов (рис. 5).

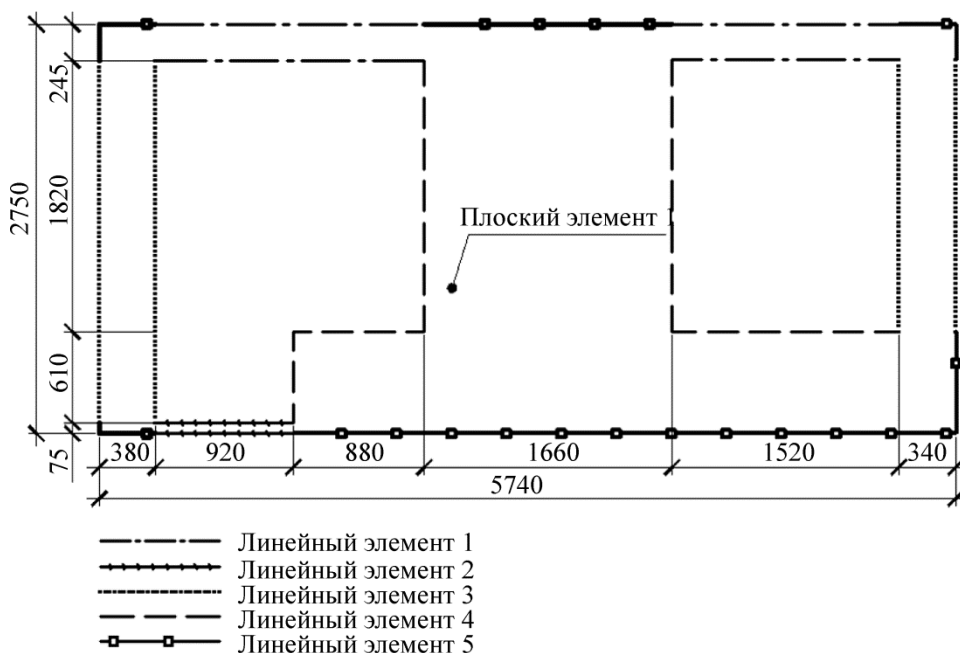


Рис. 5. Разбивка панели на элементы

2.3. Геометрические характеристики проекций элементов

Площадь стеновой панели, включая проемы, составляет:

$$A_{\text{ст.п}} = 2,75 \cdot 5,74 = 15,79 \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь проемов панели

$$A_{\text{пр}} = 2,43 \cdot 0,92 + 1,82 \cdot 0,88 + 1,52 \cdot 1,82 = 6,6 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности фрагмента ограждающей конструкции для расчета $R_0^{\text{пр}}$ составляет $A = 15,79 - 6,6 = 9,19 \text{ м}^2$.

Площадь выделенного плоского элемента составляет: $A_1 = A = 9,19 \text{ м}^2$. Доля площади элемента от общей площади фрагмента $a_1 = 9,19/9,19 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Общая длина проекции верхних оконных откосов $L_1 = 0,92 + 0,88 + 1,52 = 3,32 \text{ м}$. Длина проекции этих откосов, приходящаяся на 1 м^2 площади фрагмента, $l_1 = L_1 / A = 3,32/9,19 = 0,36 \text{ м}/\text{м}^2$.

Длина проекции нижнего откоса дверного проема $L_2 = 0,92 \text{ м}$. Длина проекции этого откоса, приходящаяся на 1 м^2 площади фрагмента, $l_2 = L_2 / A = 0,92/9,19 = 0,1 \text{ м}/\text{м}^2$.

Общая длина проекции узких вертикальных откосов оконных проемов $L_3 = 0,61 + 1,82 + 1,82 = 4,25 \text{ м}$. Длина проекции этих откосов, приходящаяся на 1 м^2 площади фрагмента, $l_3 = L_3 / A = 4,25/9,19 = 0,46 \text{ м}/\text{м}^2$.

Общая длина проекции остальных откосов $L_4 = 0,61 + 0,88 + 1,82 + 1,82 + 1,52 = 6,65 \text{ м}$. Длина проекции этих откосов, приходящаяся на 1 м^2 площади фрагмента, $l_4 = L_4 / A = 6,65/9,19 = 0,72 \text{ м}/\text{м}^2$.

Общая длина проекции внешних ребер $L_5 = (0,38 \cdot 2 + 0,075 + 0,245 + 1,66) \cdot 2 + 0,88 + 1,52 + 0,61 = 8,49 \text{ м}$. Длина проекции этих ребер, приходящаяся на 1 м^2 площади фрагмента, $l_5 = L_5 / A = 8,49/9,19 = 0,92 \text{ м}/\text{м}^2$.

2.4. Расчет удельных потерь теплоты, обусловленных элементами

Расчет температурных полей может быть выполнен с использованием различных программных комплексов, как специализированных, так и мультизадачных. Среди специализированных коммерческих программных комплексов стоит выделить ELCUT, Temper 3D; среди мультизадачных некоммерческих – CalculiX, Elmer, Lisa; мультизадачных коммерческих – ANSYS, Abaqus и др. Очевидно, что выбор той или иной программы остается за расчетчиком.

В данном случае для расчета был выбран расчетный комплекс ANSYS Workbench 16.1. Геометрия узлов была построена в AutoCAD 2010, затем путем экспорта через формат IGES перенесена в среду ANSYS Workbench Design Modeler. Поскольку в данной среде условия конвекции возможно применить только к поверхностям, для каждого элемента была построена трехмерная модель толщиной 100 мм из плоскости чертежа. Граничные условия для моделирования представлены в табл. 2. Для создания конечных элементов использовалась регулярная сетка с размером элемента 0,01 м.

Таблица 2

Граничные условия

№ п/п	Наименование параметра	Значения	Единицы измерения
1	Тип задачи	Стационарный теплоперенос	–
2	Вид теплопроводности	Изотропная	–
3	Теплопроводность	см. табл. 1	Вт/(м · °С)
4	Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции (стена и подоконная часть)	8,7	Вт/(м ² · °С)
5	Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции (окно)	8	Вт/(м ² · °С)
6	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции	23	Вт/(м ² · °С)
7	Температура внутри	21	°С
8	Температура снаружи	–35	°С

Геометрические размеры линейных элементов 1–5, принятые для моделирования, отражены на рис. 6, 7.

Для плоского элемента 1 удельные потери теплоты составляют:

$$R_{o,1}^{усл} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,12}{0,47} + \frac{0,18}{0,038} + \frac{0,04}{0,47} + \frac{1}{23} = 5,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт},$$

$$U_1 = 1 / R_{o,1}^{усл} = 1 / 5,24 = 0,191 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

Для линейного элемента 1 рассчитывается температурное поле узла конструкции, содержащего элемент. Расчетная схема и трехмерное температурное поле представлены на рис. 8.

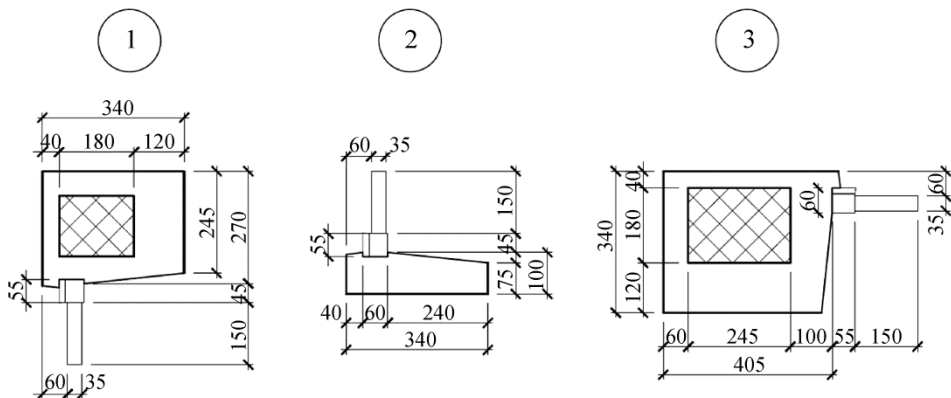


Рис. 6. Узлы линейных элементов 1–3

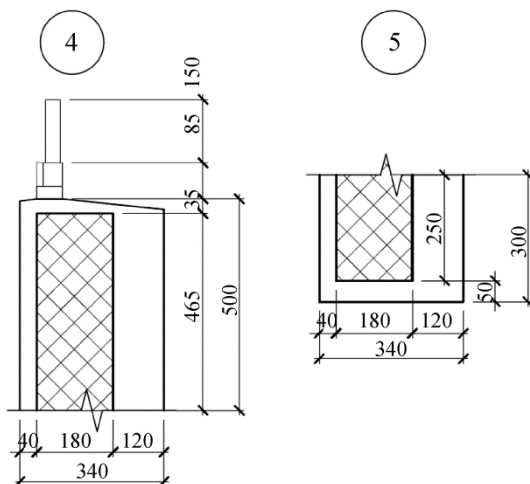


Рис. 7. Узлы линейных элементов 4, 5

Расчетный участок имеет размеры $0,270 \times 0,340$ м при толщине $0,1$ мм. Площадь стены, вошедшей в расчетный участок, $S_1 = 0,27 \cdot 0,1 = 0,027 \text{ м}^2$. Потери теплоты через стену с откосом, вошедшую в участок, по результатам расчета температурного поля представлены программой в виде количества теплоты, Вт (рис. 8, а, зеленая зона). Тогда потери теплоты с учетом двумерной постановки $Q_1^L = 1,6 \text{ Вт}/0,1 \text{ м} = 16 \text{ Вт}/\text{м}$.

Поскольку элемент с теплопроводным включением был смоделирован в трехмерной постановке, учитываем это при использовании формулы (5); здесь же запишем площадь расчетного участка как про-

изведение. Тогда потери теплоты через участок однородной стены той же площади

$$Q_1 = \frac{21+35}{5,24 \cdot 0,1} 0,27 \cdot 0,1 = 2,89 \text{ Вт/м.}$$

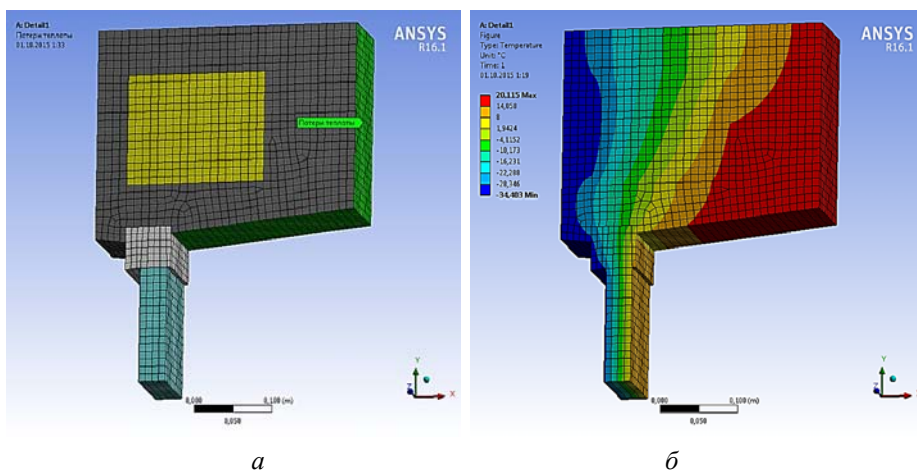


Рис. 8. Линейный элемент 1: *a* – конечно-элементная модель; *б* – температурное поле модели

Как видно из формулы, в дальнейшем можно сокращать множитель толщины участка 0,1 м и подставлять в формулу приведенную высоту участка.

Дополнительные потери теплоты через линейный элемент 1 составляют:

$$\Delta Q_1^L = 16 - 2,89 = 13,11 \text{ Вт/м.}$$

Удельные линейные потери теплоты через линейный элемент 1

$$\psi_1 = \frac{13,11}{21+35} = 0,23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C).}$$

Аналогично определяются удельные линейные потери теплоты через линейные элементы 2 и 3 ($Q_2^L = 12,52 \text{ Вт/м}$; $Q_3^L = 20,76 \text{ Вт/м}$):

$$Q_2 = \frac{21+35}{5,24} 0,1 = 1,06 \text{ Вт/м,}$$

$$\Delta Q_2^L = 12,52 - 1,06 = 11,46 \text{ Вт/м},$$

$$\psi_2 = \frac{11,46}{21+35} = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$Q_3 = \frac{21+35}{5,24} 0,405 = 4,32 \text{ Вт/м},$$

$$\Delta Q_3^L = 20,76 - 4,32 = 16,44 \text{ Вт/м},$$

$$\psi_3 = \frac{11,46}{21+35} = 0,29 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

При определении удельных линейных потерь теплоты через линейные элементы 1–3 их размеры были ограничены конструктивно. При рассмотрении линейных элементов 4 и 5 возникает вопрос о выборе высоты расчетного участка, зоны влияния, в пределах которой теплопроводное включение существенно влияет на распределение температур в конструкции. Ряд авторов определяет данную величину путем сравнения температуры поверхности условной конструкции без теплопроводного включения и температуры поверхности конструкции с теплопроводным включением [2, 6]. В данной работе размеры зоны влияния приняты по аналогичному критерию.

В целом очевидно, что критерий для определения размеров зоны влияния теплопроводного включения должен быть озвучен в СП 50.13330.2012 и его дальнейших актуализациях.

Удельные линейные потери теплоты через линейные элементы 4 и 5 после определения размеров зоны влияния находятся аналогично предыдущим ($Q_4^L = 11,77 \text{ Вт/м}$, $Q_5^L = 6,81 \text{ Вт/м}$):

$$Q_4 = \frac{21+35}{5,24} 0,5 = 5,34 \text{ Вт/м},$$

$$\Delta Q_4^L = 11,77 - 5,34 = 6,43 \text{ Вт/м},$$

$$\psi_4 = \frac{6,43}{21+35} = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

$$Q_5 = \frac{21+35}{5,24} 0,3 = 3,21 \text{ Вт/м},$$

$$\Delta Q_5^L = 6,81 - 3,21 = 3,6 \text{ Вт/м},$$

$$\psi_5 = \frac{3,6}{21 + 35} = 0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

2.5. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче стеновой панели

Данные для расчета приведенного сопротивления теплопередаче стеновой панели сведены в табл. 3.

Таблица 3

Данные для расчета приведенного сопротивления теплопередаче

№ п/п	Элемент конструкции	Удельный геометрический показатель	Удельные потери теплоты	Удельный поток теплоты, обусловленный элементом	Доля общего потока теплоты через фрагмент, %
1	Плоский элемент 1	$a_1 = 1 \text{ м}^2/\text{м}^2$	$U_1 = 0,191 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	$U_1 a_1 = 0,191 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	33
2	Линейный элемент 1	$l_1 = 0,36 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_1 = 0,23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_1 l_1 = 0,083 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	15
3	Линейный элемент 2	$l_2 = 0,1 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_2 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_2 l_2 = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	4
4	Линейный элемент 3	$l_3 = 0,46 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_3 = 0,29 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_3 l_3 = 0,13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	23
5	Линейный элемент 4	$l_4 = 0,72 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_4 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_4 l_4 = 0,086 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	15
6	Линейный элемент 5	$l_5 = 0,92 \text{ м}/\text{м}^2$	$\psi_5 = 0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_5 l_5 = 0,055 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	1
7	Итого			$1 / R^{np} = 0,565 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	100

Приведенное сопротивление теплопередаче стеновой панели

$$R_0^{np} = \frac{1}{0,191 + 0,083 + 0,02 + 0,13 + 0,086 + 0,055} = 1,77 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/ \text{Вт}.$$

Для оценки соответствия приведенного сопротивления теплопередаче R_0^{np} (м²·°C)/Вт его сравнивают с нормируемым значением при-

веденного сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{норм}}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт, которое определяют в зависимости от градусо-суток отопительного периода по формуле

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тп}} m_p = (a \cdot \text{ГСОП} + b) m_p = (a \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) z_{\text{от}} + b) m_p, \quad (10)$$

где $R_0^{\text{тп}}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт; m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства; ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, $\text{°C} \cdot \text{сут/год}$; a , b – коэффициенты, которые принимаются по табл. 3 СП 23-101–2004; $t_{\text{от}}$, $z_{\text{от}}$ – средняя температура наружного воздуха, °C , и продолжительность, сут/год, отопительного периода; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °C .

Для условий г. Перми

$$R_0^{\text{норм}} = (0,00035 \cdot (21 + 5,5) 225 + 1,4) 1 = 3,49 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}.$$

В формуле (10) фигурирует коэффициент m_p , который при выполнении требований СП 50.13330.2012 может быть понижен до значения 0,63 при расчете приведенного сопротивления теплопередаче стен. Таким образом, получаем неравенство, которому должно отвечать значение приведенного сопротивления теплопередаче стеновой панели (11):

$$0,63 R_0^{\text{тп}} \leq R_0^{\text{нп}} \leq R_0^{\text{тп}}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого случая

$$R_0^{\text{нп}} = 1,77 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/В} < 0,63 R_0^{\text{тп}} = 2,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт} \leq R_0^{\text{тп}} = 3,49 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}.$$

Как видно из неравенства, приведенное сопротивление теплопередаче стеновой панели существенно ниже нормируемого значения.

После выполнения анализа температурных полей узлов конструкции и табл. 3 можно сделать выводы о причинах столь низкого показателя тепловой защиты:

1. Доля общего потока теплоты через линейные элементы 1, 3 и 4 соответственно 15, 23 и 15 %, что говорит о необходимости в первую очередь изменить конструктивное решение линейного элемента 3.

2. Анализ температурных полей узлов 1, 2 и 4 указывает на наличие минимальной температуры на стыке оконного откоса и рамы $\tau_{\text{min}} =$

= 5,5 °С, а в узле 3 – $\tau_{\min} = 2,5$ °С, что меньше температуры точки росы $t_d = 10,4$ °С для помещений с нормальным влажностным режимом, что говорит о необходимости утепления данного участка или изменения его конфигурации.

После внесения соответствующих изменений в конструкции узлов расчет приведенного сопротивления теплопередаче стеновой панели следует повторить.

Выводы

На основании выполненного анализа элементной методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче и примера расчета приведенного сопротивления теплопередаче ненесущей стеновой трехслойной панели можно сделать следующие выводы:

1. Использование элементного подхода при расчете приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции по температурным полям позволяет определить наиболее «слабые» с точки зрения теплозащиты узлы или части узлов конструкции и оптимизировать их.

2. При определении размеров расчетного участка линейного элемента конструкции отсутствует критерий определения размеров зоны влияния теплопроводного включения, который был бы отражен в СП 50.13330.2012.

3. При разработке серийных ограждающих конструкций [10, 11], таких как стеновые панели, или типовых узлов следует выполнить оценку теплопотерь через каждую конструкцию для использования этих данных в дальнейшем типовом проектировании;

4. Использование неравномерной (нерегулярной) сетки конечных элементов при моделировании может привести к получению различных значений средней температуры на поверхности фрагмента τ , °С.

5. Использование расчетных комплексов с возможностью вариации расчетных моделей и параметризации геометрических размеров узла (толщины утеплителя, размеров теплопроводных включений) существенно расширяет возможности анализа теплотехнических свойств конструкции.

За рамками основных выводов стоит отметить, что изучение влияния на результат расчета таких параметров конечно-элементной модели, как размер элемента, регулярность сетки конечных элементов,

использование в качестве результата не температуры, а плотности теплового потока и геометрическая точность при построении моделей узлов, требуют дополнительных исследований.

Библиографический список

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строительные материалы. – 2010. – № 12. – С. 4–12.

2. Крайнов Д.В., Сафин И.Ш., Любимцев А.С. Расчет дополнительных теплопотерь через теплопроводные включения ограждающих конструкций (на примере узла оконного откоса) // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 6. – С. 17–22.

3. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 8. – С. 21–27.

4. Голубев С.С. Определение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций на основе численного расчета распределения температурных полей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 5. – С. 93–97.

5. Ананьин М.Ю., Ведищева Ю.С. Многофакторное численное исследование теплотехнических свойств сэндвич-панелей вертикальной разрезки // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. – 2012. – № 2. – С. 71–75.

6. Крайнов Д.В., Садыков Р.А. Определение дополнительных потоков теплоты через элементы фрагмента ограждающей конструкции // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 10–12.

7. Косых А.А., Сурсанов Д.Н. Анализ нормативных документов, действующих в сфере контроля технического состояния объектов культурного наследия, расположенных на территории Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – С. 34–43.

8. Norris N., Ropell P., Lawton M. The concept of linear and point transmittance and its value in dealing with thermal bridges in building enclosures // Building enclosure science & technology conference. – Atlanta. April, 2012. – URL: https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/BEST/best3_lawton_norris.2.14.pdf (дата обращения: 01.10.2015).

9. Murray S. Thermal bridging and whole building energy performance / Morrison Hershfield, Ontario Association of architects. – URL: <http://www.oaa.on.ca/oaamedia/documents/Thermal%20Bridging%20And%20Whole%20Building%20Energy%20Performance.pdf> (дата обращения: 01.10.2015).

10. Сурсанов Д.Н., Сазонова С.А., Пономарев А.Б. Анализ результатов натурных испытаний шпоночного соединения на срез // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 2. – С. 7–23.

11. Натурные испытания многпустотной плиты с фибролитовыми пустотообразователями / А.Б. Пономарев [и др.] // Жилищное строительство. – 2014. – № 10. – С. 27–32.

12. Теплозащита наружных стен зданий с облицовкой из кирпичной кладки / В.Г. Гагарин [и др.] // Журнал АВОК. – 2009. – Ч. 1, № 5. – С. 48–56.

References

1. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Teoreticheskie predposylki rascheta privedennogo soprotivleniia teploperedache ograzhdaiushchikh konstruksii [The theoretical assumptions for calculating the reduced R-value]. *Stroitel'nye materialy*, 2010, no. 12, pp. 4-12.

2. Krainov D.V., Safin I.Sh., Liubimtsev A.S. Raschet dopolnitel'nykh teplopoter' cherez teploprovodnye vkliucheniiia ograzhdaiushchikh konstruksii (na primere uzla okonnogo otkosa) [Calculation of additional conductive heat loss through the inclusion walling (for example, window sill detail)]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2010, no. 6, pp. 17-22.

3. Krivoshein A.D., Fedorov S.V. K voprosu o raschete privedennogo soprotivleniia teploperedache ograzhdaiushchikh konstruksii [On the question of the calculation of the reduced R-value]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 21-27.

4. Golubev S.S. Opredelenie privedennogo soprotivleniia teploperedache ograzhdaiushchikh konstruksii na osnove chislennogo rascheta raspredeleniia temperaturnykh polei [Determination of reduced resistance to heat transfer of fencing wall based on numerical calculation of distribution of temperature fields]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2011, no. 5, pp. 93-97.

5. Anan'in M.Iu., Vedishcheva Iu.S. Mnogofaktornoe chislennoe issledovanie teplotekhnicheskikh svoistv sendvich-panelei vertikal'noi razrezki [Multifactor numerical investigation of thermal properties of sandwich

panels vertical cutting]. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*, 2012, no. 2, pp. 71-75.

6. Krainov D.V., Sadykov R.A. Opredelenie dopolnitel'nykh potokov teploty cherez elementy fragmenta ograzhdaiushchei konstruksii [Identification of additional heat flows through the building envelope elements fragment]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2012, no. 6, pp. 10-12.

7. Kosykh A.A., Sursanov D.N. Analiz normativnykh dokumentov, deistvuiushchikh v sfere kontrolya tekhnicheskogo sostoianiia ob'ektov kul'turnogo nasledii, raspolozhennykh na territorii Permskogo kraia [The analysis of laws in a sphere of monument condition of structures, situated in a Perm region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, pp. 34-43.

8. Norris N., Ropell P., Lawton M. The concept of linear and point transmittance and its value in dealing with thermal bridges in building enclosures. *Building enclosure science & technology conference*. Atlanta, 2012, available at: https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/BEST/best3_lawton_norris.2.14.pdf.

9. Murray S. Thermal bridging and whole building energy performance. Morrison Hershfield, Ontario Association of architects, available at: <http://www.oaa.on.ca/oaamedia/documents/Thermal%20Bridging%20And%20Whole%20Building%20Energy%20Performance.pdf>.

10. Sursanov D.N., Sazonova S.A., Ponomarev A.B. Analiz rezul'tatov naturnykh ispytanii shponochnogo soedineniia na srez [Analysis of concrete dowel full-scale shearing tests]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 2, pp. 7-23.

11. Sursanov D.N., Sazonova S.A., Ponomarev A.B., Lyskov A.V. Naturnye ispytaniia mnogopustotnoi plity s fibrolitovymi pustotoobrazovateliami [Full-scale tests with hollow core slabs inside core]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2014, no. 10, pp. 27-32.

12. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Kryshov S.I., Ponomarev O.I. Teplozashchita naruzhnykh sten zdaniy s oblitovkoi iz kirpichnoi kladki [Thermal protection external walls with facing brickwork]. *Zhurnal AVOK*, 2009, vol. 1, no. 5, pp. 48-56.

Получено 30.09.2015

Об авторах

Сурсанов Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sursanov@mail.ru).

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника» Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ru).

About the authors

Dmitrii N. Sursanov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: koallita@yandex.ru).

Andrei B. Ponomarev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: spstf@pstu.ru).