

Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом

Сергей Михайлович Мыскин¹, Тамара Ивановна Королева^{1,2},
Михаил Александрович Ивачев²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); г. Пенза, Россия;

² Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ)); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из самых неблагоприятных факторов, влияющих на строительные конструкции в процессе их эксплуатации, является влага, которая при неправильном подборе материалов может конденсировать как в толще, так и на внутренней поверхности ограждения. Для предотвращения конденсации влаги на поверхности ограждающей конструкции необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: температура внутренней поверхности ограждения должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха. Чтобы избежать вышеуказанных проблем, требуется на этапе проектирования проводить теплотехнический расчет строительных конструкций с наибольшей точностью.

Материалы и методы. Проведено аналитическое исследование плоских температурных полей в толще неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом по методике, разработанной К.Ф. Фокиным. Расчет плоских температурных полей сводится к определению температуры в каждом узле ограждающей конструкции. Для этого конструкция стены была разбита сеткой координат на узлы, далее составлены уравнения, по которым были определены вышеупомянутые величины и сведены в табличную форму. Точные вычисления выполнены методом итерации (последовательного приближения) и остановлены на приближении, в котором температуры в каждом из узлов не отличались от температур предыдущего приближения более чем на 0,1 °С.

Результаты. Для достижения требуемого результата осуществлено одиннадцать приближений. На основе рассчитанных величин определен коэффициент теплопередачи исследуемого ограждения. Проведен анализ результатов, полученных с помощью метода расчета плоских температурных полей относительно величин, принятых предварительно. Установлены невязки значений предварительно принятых температур с вычисленными значениями.

Выводы. После проведения данных вычислений выявлено, что использование метода температурных полей для расчета коэффициента теплопередачи неоднородной конструкции оправдывает себя, если необходима наибольшая точность расчета. Для определения температур в толще конструкции, особенно в местах наибольшей неоднородности, следует использовать метод температурных полей, так как он значительно увеличивает точность расчета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плоское температурное поле, метод итерации, коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, тепловой поток, сопротивление теплопередаче, теплотехнические требования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мыскин С.М., Королева Т.И., Ивачев М.А. Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 20–38. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38

Автор, ответственный за переписку: Сергей Михайлович Мыскин, myskin.sergej@yandex.ru.

Investigation of temperature fields of an inhomogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame

Sergei M. Myskin¹, Tamara I. Koroleva^{1,2}, Mikhail A. Ivachev²

¹ Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC); Penza, Russian Federation;

² Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University); Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the most unfavourable factors affecting building structures during their operation is moisture, which, if materials are incorrectly selected, can condense both in the thickness and on the inner surface of the fence. To prevent moisture condensation on the surface of the enclosing structure, the following condition must be fulfilled: the temperature of the inner surface of the enclosure must not be lower than the dew point temperature of the internal air. To avoid the above problems, it is necessary to carry out thermal engineering calculations of building structures with the greatest accuracy at the design stage.

Materials and methods. An analytical study of flat temperature fields in the thickness of a heterogeneous insulated external wall with a monolithic reinforced concrete frame was carried out using the method developed by K.F. Fokin. The calculation of plane temperature fields comes down to determining the temperature in each node of the enclosing structure. To do this, the wall structure was divided into nodes by a coordinate grid, then equations were compiled by which the above-mentioned values were determined and summarized in tabular form. Exact calculations were carried out by the method of integration (successive approximation) and stopped at the approximation in which the temperatures in each of the nodes did not differ from the temperatures of the previous approximation by more than 0.1 °C.

Results. To achieve the required result, eleven approximations were performed. Based on the calculated values, the heat transfer coefficient of the enclosure under study was determined. An analysis of the results obtained using the method of calculating flat temperature fields relative to the previously accepted values was carried out. The discrepancies between the values of previously accepted temperatures and the calculated values are determined.

Conclusions. After carrying out these calculations, it was revealed that the use of the temperature field method to calculate the heat transfer coefficient of a non-uniform structure is justified if the greatest calculation accuracy is required. To determine temperatures within the structure, especially in places of greatest heterogeneity, the temperature field method should be used, since it significantly increases the accuracy of the calculation.

KEYWORDS: plane temperature field, integration method, heat transfer coefficient of the enclosing structure, heat flow, heat transfer resistance, thermal requirements

FOR CITATION: Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of temperature fields of an inhomogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):20-38. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38

Corresponding author: Sergei M. Myskin, myskin.sergej@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Основной мерой противодействия конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения является снижение влажности воздуха в помещении, что может быть достигнуто усилиями вентиляции (уменьшается точка росы) либо повышением теплотехнических свойств стены (увеличение сопротивления теплопередаче ограждения R_o или уменьшение сопротивления тепловосприятию R_b [1–12]). Хороший вариант, когда температура внутренней поверхности на 5–10 °C выше температуры точки росы.

Для правильного выбора строительных конструкций зданий на этапе их проектирования необходимо проводить теплотехнический расчет.

В настоящее время при проектировании в большинстве случаев выполняется расчет многослойной однородной конструкции стены.

В данной статье представлено исследование плоских температурных полей в толще неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом по методике, разработанной К.Ф. Фокиным.

Расчет температурного поля имеет значение не только для решения вопросов строительной теплотехники, но также и для определения температурных напряжений в элементах каркаса. В частности, при разработке проектов высотных зданий со стальным или железобетонным каркасом с жесткой арматурой расчет температурного поля элементов каркаса дает возможность конструкторам более точно рассчитать напряжения в материале каркаса [13–21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выбрана наружная неоднородная ограждающая конструкция стены сред-

нестатистического современного жилого здания, а именно коммерческое помещение на первом этаже (отм. 0,000) в жилом здании, расположенное по адресу: г. Пенза, пр-т Победы, д. 97 А. Просчитан участок наружной стены, проходящий по оси 1.

Характеристики воздуха снаружи здания для г. Пензы определены по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология». Параметры наружного и внутреннего воздуха:

- 1) условия эксплуатации — А;
- 2) $t_{\text{вн}} = -27$ °C;
- 3) $\varphi_{\text{вн}} = 84$ %;
- 4) $t_{\text{б}} = 18$ °C;
- 5) $\varphi_{\text{б}} = 60$ %.

Характеристики материалов наружной стены приняты по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и приведены ниже:

- слой № 1: штукатурка фасадная декоративная по стеклосетке — $\delta_1 = 0,02$ м; $\lambda_1 = 0,76$ Вт/(м·°C); $\gamma_1 = 1800$ кг/м³; $\mu_1 = 0,09$ мг/(м·ч·Па);

- слой № 2: утеплитель из плит пенополистирола ППС-16Ф, ГОСТ 15588–2014 — $\delta_2 = 0,15$ м; $\lambda_2 = 0,039$ Вт/(м·°C); $\gamma_2 = 16$ кг/м³; $\mu_2 = 0,05$ мг/(м·ч·Па);

- слой № 3: кладка из камня керамического щелевого КМ-р 250 × 120 × 140/2,1НФ/100/1,2/25/ГОСТ 530–2012 на растворе М50 — $\delta_3 = 0,25$ м; $\lambda_2 = 0,64$ Вт/(м·°C); $\gamma_2 = 1400$ кг/м³; $\mu_2 = 0,14$ мг/(м·ч·Па);

- слой № 4: монолитный железобетон — $\delta_2 = 0,27$ м; $\lambda_2 = 1,92$ Вт/(м·°C); $\gamma_2 = 2500$ кг/м³; $\mu_2 = 0,03$ мг/(м·ч·Па);

- слой № 5: штукатурка известково-песчаная для внутренней отделки — $\delta_2 = 0,02$ м; $\lambda_2 = 0,7$ Вт/(м·°C); $\gamma_2 = 1600$ кг/м³; $\mu_2 = 0,12$ мг/(м·ч·Па).

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

Выберем участок ограждающей конструкции с двумя монолитными узлами и двумя каменными.

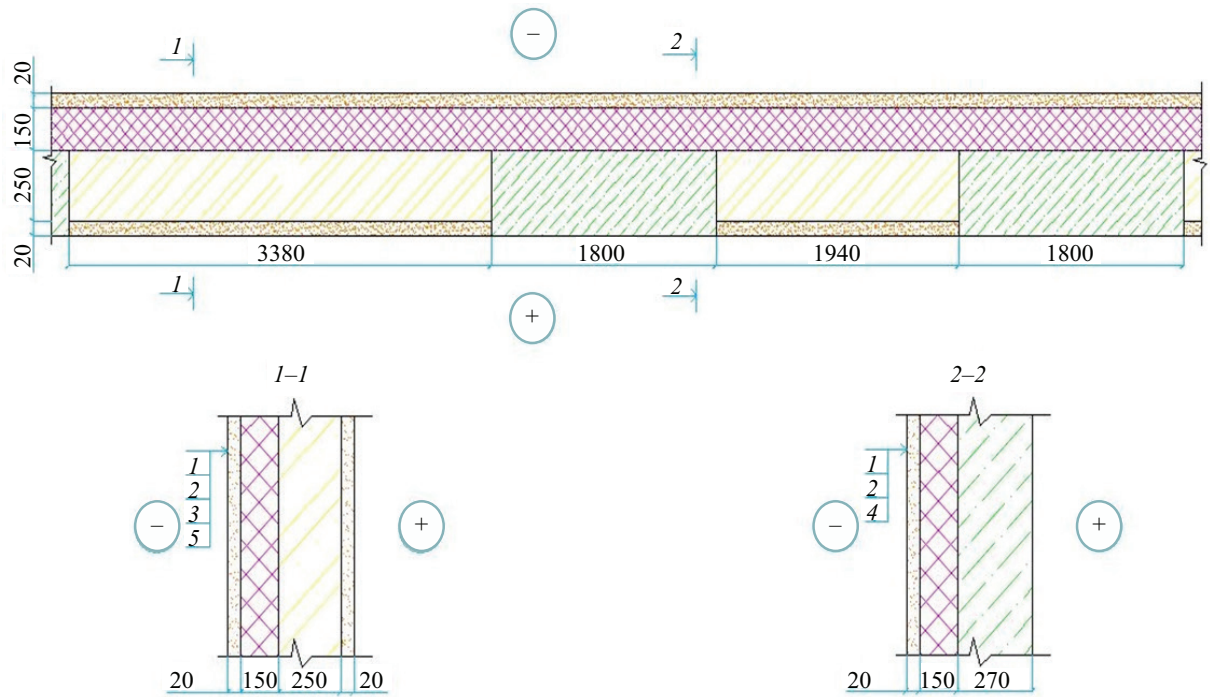


Рис. 1. Конструкция неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом: слой № 1. Штукатурка фасадная декоративная по стеклосетке; слой № 2. Утеплитель из плит пенополистирола ППС-16Ф, ГОСТ 15588–2014; слой № 3. Кладка из камня керамического щелевого КМ-р 250 × 120 × 140 /2,1НФ/100/1,2/25/ ГОСТ 530–2012 на растворе М50; слой № 4. Монолитный железобетон; слой № 5. Штукатурка известково-песчаная для внутренней отделки

Далее разбиваем данный участок сеткой координат так, чтобы в каждом месте, где меняется материал, обозначался новый узел (рис. 2). После рассчитываем температуры каждого из узлов в зависимости от четырех соседних с ними.

В данной статье подробные вычисления описаны для узла А1. Другие узлы рассчитываются по аналогии.

К узлу А2 теплопередача проходит по штукатурному слою: расстояние между данными узлами $\Delta = 0,845$ м; площадь, по которой происходит теплопередача, $F = 0,02/2 = 0,01$ м²; коэффициент теплопроводности между материалами $\lambda_1 = 0,76$ Вт/(м·°С).

Определим коэффициент теплопередачи, Вт/°С, от узла А1 к узлу А2 с учетом площади теплопередачи:

$$k_{A1-A2} = \frac{\lambda}{\Delta} \cdot F = \frac{0,76}{0,845} \cdot 0,01 = 0,009 \text{ Вт/°С.} \quad (1)$$

Рассчитаем величину передаваемого тепла к узлу А2, Вт:

$$Q_{A1-A2} = (t_{A1} - t_{A2}) k_{A1-A2}. \quad (2)$$

К узлу В1 теплопередача выполняется также по штукатурному слою, но в перпендикулярном направлении: расстояние между узлами $\Delta = 0,02$ м; площадь, по которой происходит теплопередача, $F = (0,845 + 0,600)/2 = 0,723$ м²; коэффициент теплопроводности между материалами $\lambda_1 = 0,76$ Вт/(м·°С).

Установим коэффициент теплопередачи, Вт/°С, от узла А1 к узлу В1 с учетом площади теплопередачи:

$$k_{A1-B1} = \frac{0,76}{0,02} \cdot 0,723 = 27,474 \text{ Вт/°С.}$$

Вычислим величину передаваемого тепла, Вт, к узлу В1:

$$Q_{A1-B1} = (t_{A1} - t_{B1}) k_{A1-B1}.$$

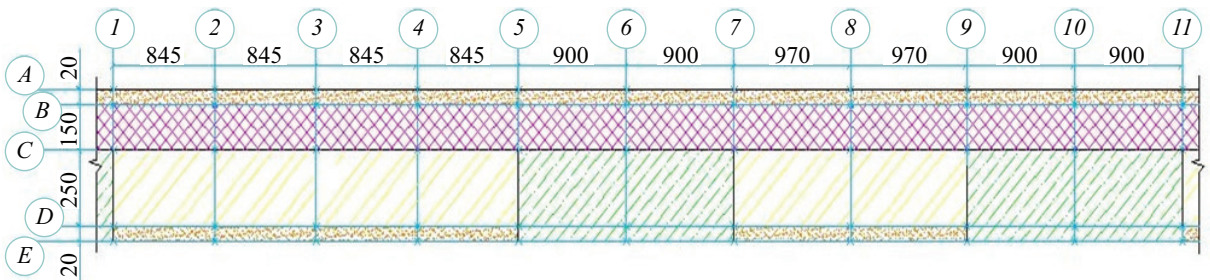


Рис. 2. Схема разбивки на узлы неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом

К наружному воздуху теплопередача происходит по площади $F = 0,723 \text{ м}^2$ при $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Определим коэффициент передачи тепла, $\text{Вт}/^\circ\text{С}$, от узла $A1$ к наружному воздуху:

$$k_{A1-n} = \alpha_n \cdot F = 23 \cdot 0,723 = 16,629 \text{ Вт}/^\circ\text{С}.$$

Найдем количество передаваемого тепла, Вт , от узла $A1$ к наружному воздуху:

$$Q_{A1-n} = (t_{A1} - t_n) k_{A1-n}.$$

Выведем уравнение теплового баланса для узла $A1$:

$$2Q_{A1-A2} + Q_{A1-B1} + Q_{A1-n} = 0.$$

Узел $A2$ в расчете взят с коэффициентом 1,71, так как узел $A1$ находится на оси симметрии ограждающей конструкции и с противоположной стороны оси находится узел размером 600 мм.

Подставим значения величин теплоты:

$$1,71 \cdot (t_{A1} - t_{A2}) k_{A1-A2} + (t_{A1} - t_{B1}) k_{A1-B1} + (t_{A1} - t_n) k_{A1-n} = 0.$$

Выразим из уравнения температуру в узле $A1$:

$$t_{A1} = \frac{1,71 \cdot k_{A1-A2} t_{A2} + k_{A1-B1} t_{B1} + k_{A1-n} t_n}{1,71 \cdot k_{A1-A2} + k_{A1-B1} + k_{A1-n}}. \quad (3)$$

Подставив значения коэффициентов теплопередачи, получим:

$$t_{A1} = \frac{1,71 \cdot 0,009 t_{A2} + 27,474 t_{B1} + 16,629 t_n}{1,71 \cdot 0,009 + 27,474 + 16,629} = 0,0003 t_{A2} + 0,623 t_{B1} + 0,377 t_n.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, расчет температурного поля неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом сводится к решению следующих уравнений:

$$\begin{aligned} t_{A1} &= 0,003 t_{A2} + 0,623 t_{B1} + 0,377 t_n; \\ t_{A2} &= 0,002 t_{A1} + 0,623 t_{B2} + 0,0002 t_{A3} + 0,377 t_n; \\ t_{A3} &= 0,002 t_{A2} + 0,623 t_{B3} + 0,0002 t_{A4} + 0,377 t_n; \\ t_{A4} &= 0,002 t_{A3} + 0,623 t_{B4} + 0,0002 t_{A5} + 0,377 t_n; \\ t_{A5} &= 0,002 t_{A4} + 0,623 t_{B5} + 0,0002 t_{A6} + 0,377 t_n; \\ t_{A6} &= 0,002 t_{A5} + 0,623 t_{B6} + 0,0002 t_{A7} + 0,377 t_n; \\ t_{A7} &= 0,002 t_{A6} + 0,623 t_{B7} + 0,0002 t_{A8} + 0,377 t_n; \\ t_{A8} &= 0,002 t_{A7} + 0,623 t_{B8} + 0,0002 t_{A9} + 0,377 t_n; \\ t_{A9} &= 0,002 t_{A8} + 0,623 t_{B9} + 0,0002 t_{A10} + 0,377 t_n; \\ t_{A10} &= 0,002 t_{A9} + 0,623 t_{B10} + 0,0002 t_{A11} + 0,377 t_n; \\ t_{A11} &= 0,002 t_{A9} + 0,623 t_{B10} + 0,377 t_n; \\ t_{B1} &= 0,992 t_{A1} + 0,0007 t_{B2} + 0,007 t_{C1}; \\ t_{B2} &= 0,992 t_{A2} + 0,0004 t_{B1} + 0,0004 t_{B3} + 0,007 t_{C2}; \\ t_{B3} &= 0,992 t_{A3} + 0,0004 t_{B2} + 0,0004 t_{B4} + 0,007 t_{C3}; \\ t_{B4} &= 0,992 t_{A4} + 0,0004 t_{B3} + 0,0004 t_{B5} + 0,007 t_{C4}; \\ t_{B5} &= 0,992 t_{A5} + 0,0004 t_{B4} + 0,0004 t_{B6} + 0,007 t_{C5}; \\ t_{B6} &= 0,993 t_{A6} + 0,0003 t_{B5} + 0,0003 t_{B7} + 0,007 t_{C6}; \\ t_{B7} &= 0,993 t_{A7} + 0,0003 t_{B6} + 0,0003 t_{B8} + 0,007 t_{C7}; \\ t_{B8} &= 0,993 t_{A8} + 0,003 t_{B7} + 0,003 t_{B9} + 0,007 t_{C8}; \\ t_{B9} &= 0,993 t_{A9} + 0,0003 t_{B8} + 0,0003 t_{B10} + 0,007 t_{C9}; \\ t_{B10} &= 0,993 t_{A10} + 0,0003 t_{B9} + 0,0003 t_{B11} + 0,007 t_{C10}; \\ t_{B11} &= 0,993 t_{A11} + 0,0007 t_{B10} + 0,007 t_{C11}; \\ t_{C1} &= 0,046 t_{B1} + 0,099 t_C + 0,024 t_{C2} + 0,831 t_{D1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{C2} &= 0,085 t_{B2} + 0,038 t_{C1} + 0,038 t_{C3} + 0,839 t_{D2}; \\ t_{C3} &= 0,085 t_{B3} + 0,038 t_{C2} + 0,038 t_{C4} + 0,839 t_{D3}; \\ t_{C4} &= 0,085 t_{B4} + 0,038 t_{C3} + 0,038 t_{C5} + 0,839 t_{D4}; \\ t_{C5} &= 0,044 t_{B5} + 0,019 t_{C4} + 0,053 t_{C6} + 0,884 t_{D5}; \\ t_{C6} &= 0,030 t_{B6} + 0,035 t_{C5} + 0,035 t_{C7} + 0,899 t_{D6}; \\ t_{C7} &= 0,046 t_{B7} + 0,051 t_{C6} + 0,016 t_{C8} + 0,887 t_{D7}; \\ t_{C8} &= 0,087 t_{B8} + 0,030 t_{C7} + 0,030 t_{C9} + 0,854 t_{D8}; \\ t_{C9} &= 0,046 t_{B9} + 0,016 t_{C8} + 0,051 t_{C10} + 0,887 t_{D9}; \\ t_{C10} &= 0,030 t_{B10} + 0,035 t_{C9} + 0,035 t_{C11} + 0,899 t_{D10}; \\ t_{C11} &= 0,045 t_{B11} + 0,052 t_{C10} + 0,017 t_C + 0,886 t_{D11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{D1} &= 0,071 t_{C1} + 0,009 t_D + 0,002 t_{D2} + 0,918 t_{E1}; \\ t_{D2} &= 0,068 t_{C2} + 0,003 t_{D1} + 0,003 t_{D3} + 0,926 t_{E2}; \\ t_{D3} &= 0,068 t_{C3} + 0,003 t_{D2} + 0,003 t_{D4} + 0,926 t_{E3}; \\ t_{D4} &= 0,068 t_{C4} + 0,003 t_{D3} + 0,003 t_{D5} + 0,926 t_{E4}; \\ t_{D5} &= 0,072 t_{C5} + 0,002 t_{D4} + 0,005 t_{D6} + 0,922 t_{E5}; \\ t_{D6} &= 0,077 t_{C6} + 0,003 t_{D5} + 0,003 t_{D7} + 0,920 t_{E6}; \\ t_{D7} &= 0,072 t_{C7} + 0,004 t_{D6} + 0,001 t_{D8} + 0,922 t_{E7}; \\ t_{D8} &= 0,068 t_{C8} + 0,002 t_{D7} + 0,002 t_{D9} + 0,927 t_{E8}; \\ t_{D9} &= 0,072 t_{C9} + 0,001 t_{D8} + 0,004 t_{D10} + 0,922 t_{E9}; \\ t_{D10} &= 0,077 t_{C10} + 0,003 t_{D9} + 0,003 t_{D11} + 0,920 t_{E10}; \\ t_{D11} &= 0,050 t_{C11} + 0,003 t_{D10} + 0,001 t_{D10} + 0,946 t_{E11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{E1} &= 0,873 t_{D1} + 0,0006 t_E + 0,0002 t_{E2} + 0,126 t_{E_B}; \\ t_{E2} &= 0,801 t_{D2} + 0,0002 t_{E1} + 0,0002 t_{E3} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E3} &= 0,801 t_{D3} + 0,0002 t_{E2} + 0,0002 t_{E4} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E4} &= 0,801 t_{D4} + 0,0002 t_{E3} + 0,0002 t_{E5} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E5} &= 0,884 t_{D5} + 0,0001 t_{E4} + 0,0003 t_{E6} + 0,116 t_{E_B}; \\ t_{E6} &= 0,916 t_{D6} + 0,0002 t_{E5} + 0,0002 t_{E7} + 0,083 t_{E_B}; \\ t_{E7} &= 0,881 t_{D7} + 0,0003 t_{E6} + 0,0001 t_{E8} + 0,119 t_{E_B}; \\ t_{E8} &= 0,801 t_{D8} + 0,0002 t_{E7} + 0,0002 t_{E9} + 0,199 t_{E_B}; \\ t_{E9} &= 0,881 t_{D9} + 0,0001 t_{E8} + 0,0003 t_{E10} + 0,119 t_{E_B}; \\ t_{E10} &= 0,916 t_{D10} + 0,0002 t_{E9} + 0,0002 t_{E11} + 0,083 t_{E_B}; \\ t_{E11} &= 0,882 t_{D11} + 0,0003 t_{E10} + 0,0001 t_E + 0,118 t_{E_B}. \end{aligned}$$

Вычисления проводятся методом итерации (последовательного приближения) в табличной форме. Для первого приближения значения температуры найдем с помощью уравнения теплопередачи через плоскую стенку. С этой целью рассчитаем поперечные сечения стены по осям координат 3, 6.

Для расчетов задаем значение температуры внутреннего воздуха 18°С и принимаем температуру наружного воздуха, равную температуре наиболее холодной пятидневки для г. Пензы (согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» равна -27°С).

Выполним расчет поперечного сечения стены по оси 3:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} = 4,45 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С};$$

$$t_E = t_B - (t_B - t_n) \frac{\sum R}{R_0} = 18 - (18 - (-27)) \cdot \left(\frac{1}{8,7} \right) = 16,84^\circ\text{С};$$

$$t_D = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7}\right)}{4,45} = 16,55 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64}\right)}{4,45} = 12,60 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039}\right)}{4,45} = -26,30 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76}\right)}{4,45} = -26,56 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Данные значения принимаем для осей 2, 3, 4, 8.

Выполним расчет поперечного сечения стены по оси 6:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,64} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{1}{23} = 4,17 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C};$$

$$t_E = t_B - (t_B - t_H) \frac{\Sigma R}{R_0} = 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8,7}\right)}{4,17} = 16,76 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92}\right)}{4,45} = 16,73 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92}\right)}{4,45} = 15,42 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039}\right)}{4,45} = -23,48 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \frac{\left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{1,92} + \frac{0,25}{1,92} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,02}{0,76}\right)}{4,45} = -23,74 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Данные значения принимаем для осей 6, 10.

Значения температур для осей 1, 5, 7, 9, 11 найдем как среднее арифметическое между значениями для осей 3 и 6:

$$t_E = \frac{16,84 + 16,76}{2} = 16,8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = \frac{16,55 + 16,73}{2} = 16,64 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = \frac{12,60 + 15,42}{2} = 14,01 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = \frac{-26,30 - 23,48}{2} = -24,89 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = \frac{-26,56 - 23,74}{2} = -25,15 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Дальнейший расчет сводим в табличную форму (табл. 1–12). Процесс расчета останавливаем на при-

Табл. 1. Предварительно принятые значения температур в узлах

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25,15	-26,56	-26,56	-26,56	-25,15	-23,74	-25,15	-26,56	-25,15	-23,74	-25,15
B	-24,89	-26,30	-26,30	-26,30	-24,89	-23,48	-24,89	-26,30	-24,89	-23,48	-24,89
C	14,01	12,60	12,60	12,60	14,01	15,42	14,01	12,60	14,01	15,42	14,01
D	16,64	16,55	16,55	16,55	16,64	16,73	16,64	16,55	16,64	16,73	16,64
E	16,8	16,84	16,84	16,84	16,8	16,76	16,8	16,84	16,8	16,76	16,8

Табл. 2. 1-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25,69	-26,57	-26,57	-26,57	-25,69	-24,81	-25,69	-26,57	-25,69	-24,81	-25,69
B	-24,87	-26,28	-26,28	-26,28	-24,87	-23,48	-24,89	-26,44	-24,89	-23,48	-24,89
C	14,51	12,66	12,61	12,66	14,67	15,32	14,60	12,69	14,60	15,32	14,64
D	16,60	16,55	16,55	16,55	16,62	16,71	16,58	16,53	16,58	16,71	16,66
E	16,81	16,85	16,85	16,85	16,80	16,83	16,81	16,85	16,81	16,83	16,81

Табл. 3. 2-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–25,68	–26,56	–26,56	–26,56	–25,68	–24,81	–25,69	–26,66	–25,69	–24,81	–25,69
B	–25,40	–26,29	–26,29	–26,29	–25,40	–24,54	–25,42	–26,44	–25,42	–24,54	–25,42
C	14,47	12,68	12,61	12,69	14,65	15,34	14,55	12,69	14,55	15,34	14,65
D	16,65	16,56	16,56	16,56	16,66	16,76	16,63	16,55	16,63	16,76	16,70
E	16,77	16,85	16,85	16,85	16,79	16,81	16,76	16,83	16,76	16,81	16,82

Табл. 4. 3-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,01	–26,57	–26,57	–26,57	–26,01	–25,47	–26,02	–26,66	–26,02	–25,47	–26,02
B	–25,39	–26,28	–26,28	–26,28	–25,39	–24,54	–25,42	–26,54	–25,42	–24,54	–25,42
C	14,49	12,69	12,62	12,70	14,66	15,35	14,57	12,71	14,57	15,35	14,67
D	16,61	16,56	16,56	16,57	16,65	16,75	16,58	16,53	16,58	16,75	16,71
E	16,82	16,85	16,85	16,85	16,82	16,85	16,80	16,85	16,80	16,85	16,86

Табл. 5. 4-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,00	–26,56	–26,56	–26,56	–26,00	–25,47	–26,02	–26,72	–26,02	–25,47	–26,02
B	–25,72	–26,29	–26,29	–26,29	–25,72	–25,20	–25,75	–26,54	–25,75	–25,20	–25,75
C	14,46	12,69	12,62	12,71	14,66	15,35	14,52	12,68	14,52	15,35	14,68
D	16,65	16,57	16,56	16,57	16,68	16,78	16,62	16,55	16,62	16,78	16,75
E	16,78	16,85	16,85	16,86	16,81	16,84	16,76	16,83	16,76	16,84	16,87

Табл. 6. 5-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,21	–26,57	–26,57	–26,57	–26,21	–25,88	–26,23	–26,72	–26,23	–25,88	–26,23
B	–25,71	–26,28	–26,28	–26,28	–25,71	–25,20	–25,75	–26,60	–25,75	–25,20	–25,75
C	14,48	12,70	12,62	12,70	14,67	15,35	14,54	12,70	14,54	15,35	14,70
D	16,61	16,57	16,56	16,58	16,67	16,77	16,58	16,53	16,58	16,77	16,76
E	16,82	16,86	16,85	16,86	16,84	16,87	16,79	16,85	16,79	16,87	16,90

Табл. 7. 6-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,20	–26,56	–26,56	–26,56	–26,20	–25,88	–26,23	–26,76	–26,23	–25,88	–26,23
B	–25,92	–26,29	–26,29	–26,29	–25,92	–25,61	–25,96	–26,60	–25,96	–25,61	–25,96
C	14,44	12,70	12,63	12,71	14,66	15,34	14,51	12,67	14,51	15,34	14,70
D	16,65	16,58	16,56	16,58	16,70	16,80	16,61	16,55	16,61	16,80	16,79
E	16,78	16,86	16,85	16,87	16,83	16,86	16,76	16,83	16,76	16,86	16,91

Табл. 8. 7-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,34	–26,57	–26,57	–26,57	–26,33	–26,14	–26,36	–26,76	–26,36	–26,14	–26,36
B	–25,91	–26,28	–26,28	–26,28	–25,91	–25,61	–25,96	–26,64	–25,96	–25,61	–25,96
C	14,47	12,70	12,62	12,71	14,68	15,36	14,52	12,69	14,52	15,36	14,72
D	16,61	16,58	16,56	16,59	16,69	16,79	16,58	16,53	16,58	16,79	16,80
E	16,82	16,87	16,85	16,87	16,86	16,89	16,78	16,85	16,78	16,89	16,94

Табл. 9. 8-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26,33	–26,56	–26,56	–26,56	–26,33	–26,14	–26,36	–26,78	–26,36	–26,14	–26,36
B	–26,05	–26,29	–26,29	–26,29	–26,04	–25,87	–26,09	–26,64	–26,09	–25,87	–26,09
C	14,44	12,71	12,63	12,72	14,67	15,35	14,50	12,67	14,50	15,35	14,73
D	16,65	16,58	16,56	16,59	16,72	16,82	16,60	16,55	16,60	16,82	16,83
E	16,78	16,87	16,85	16,88	16,85	16,88	16,76	16,83	16,76	16,88	16,95

ближении, в котором температуры от предыдущего приближения отличаются не более чем на 0,1 °С.

Невязка значений температур приближения 11 относительно приближения 10 не превышает 0,1 °С, расчет окончен.

На основании полученных температур в узлах ограждающей конструкции стены определим точное значение сопротивления теплопередаче. Для этого рассчитаем величину среднего теплового потока, проходящего через конструкцию ограждения, Вт/м²:

q_{cp} = \frac{q_v + q_n}{2}, \tag{4}

где q_v — тепловой поток, проходящий через внутреннюю поверхность ограждения, Вт/м²; q_n — тепловой

поток, проходящий через внешнюю поверхность ограждения, Вт/м²;

q_v = \alpha_v(t_v - t_{vcp}), \tag{5}

где \alpha_v — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); t_v — температура внутреннего воздуха, °С; t_{vcp} — средняя температура внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С;

q_n = \alpha_n(t_n - t_{ncp}), \tag{6}

где \alpha_n — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); t_n — температура наружного воздуха, °С; t_{ncp} — средняя температура наружной поверхности ограждающей конструкции, °С.

t_{ncp} = \frac{\begin{bmatrix} -26,47 \cdot 0,4225 + (-26,57) \cdot 0,845 + (-26,57) \cdot 0,845 + \\ + (-26,57) \cdot 0,845 + (-26,46) \cdot 0,8725 + (-26,39) \cdot 0,900 + \\ + (-26,49) \cdot 0,935 + (-26,79) \cdot 0,970 + (-26,49) \cdot 0,935 + \\ + (-26,39) \cdot 0,900 + (-26,49) \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = -26,52 \text{ } ^\circ\text{C};

t_{vcp} = \frac{\begin{bmatrix} 16,82 \cdot 0,4225 + 16,87 \cdot 0,845 + 16,85 \cdot 0,845 + \\ + 16,89 \cdot 0,845 + 16,89 \cdot 0,8725 + 16,93 \cdot 0,900 + \\ + 16,76 \cdot 0,935 + 16,85 \cdot 0,970 + 16,76 \cdot 0,935 + \\ + 16,93 \cdot 0,900 + 17,00 \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = 16,86 \text{ } ^\circ\text{C};

Табл. 10. 9-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,42	-26,57	-26,57	-26,57	-26,41	-26,30	-26,44	-26,78	-26,44	-26,30	-26,44
B	-26,04	-26,28	-26,28	-26,28	-26,04	-25,87	-26,09	-26,66	-26,09	-25,87	-26,09
C	14,46	12,70	12,63	12,72	14,69	15,37	14,51	12,69	14,51	15,37	14,75
D	16,61	16,59	16,56	16,60	16,71	16,81	16,58	16,53	16,58	16,81	16,84
E	16,82	16,87	16,85	16,88	16,88	16,91	16,77	16,85	16,77	16,91	16,97

Табл. 11. 10-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,41	-26,56	-26,56	-26,56	-26,41	-26,30	-26,44	-26,79	-26,44	-26,30	-26,44
B	-26,13	-26,29	-26,29	-26,29	-26,12	-26,02	-26,17	-26,66	-26,17	-26,02	-26,17
C	14,43	12,71	12,63	12,73	14,68	15,36	14,49	12,67	14,49	15,36	14,76
D	16,65	16,58	16,56	16,60	16,74	16,84	16,59	16,55	16,59	16,84	16,86
E	16,78	16,88	16,85	16,89	16,87	16,90	16,76	16,83	16,76	16,90	16,98

Табл. 12. 11-е приближение

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26,47	-26,57	-26,57	-26,57	-26,46	-26,39	-26,49	-26,79	-26,49	-26,39	-26,49
B	-26,12	-26,28	-26,28	-26,28	-26,12	-26,02	-26,17	-26,67	-26,17	-26,02	-26,17
C	14,46	12,70	12,63	12,73	14,70	15,38	14,50	12,68	14,50	15,38	14,77
D	16,61	16,59	16,56	16,61	16,73	16,83	16,58	16,53	16,58	16,83	16,87
E	16,82	16,87	16,85	16,89	16,89	16,93	16,76	16,85	16,76	16,93	17,00

$$\begin{aligned}q_b &= 8,7(18 - 16,86) = 9,92 \text{ Вт/м}^2; \\q_n &= 23(-26,52 - (-27)) = 11,04 \text{ Вт/м}^2; \\q_{cp} &= \frac{9,92 + 11,04}{2} = 10,48 \text{ Вт/м}^2.\end{aligned}$$

Зная величину теплового потока, проходящего через ограждение, найдем сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции из формулы:

$$\begin{aligned}R_0^{np} &= \frac{t_b + t_n}{q_{cp}}; \\R_0^{np} &= \frac{(18 - (-27))}{10,48} = 4,29 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.\end{aligned}\quad (7)$$

Чтобы проверить, отвечает конструкция требованиям тепловой защиты или нет, найдем нормируемую величину сопротивления теплопередаче для стены и сравним ее с полученной в ходе расчета.

Определяем градусо-сутки отопительного периода:

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_{on}) \cdot Z_{on} = (18 - (-3,9)) \cdot 201 = 4402 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{сут},$$

где t_b — температура внутреннего воздуха в помещении, $^\circ\text{C}$; t_{on} — средняя температура отопительного периода со среднесуточной температурой воздуха, не превышающей $8 \text{ }^\circ\text{C}$; Z_{on} — количество суток отопительного периода со среднесуточной температурой воздуха, не превышающей $8 \text{ }^\circ\text{C}$, сут.

Рассчитаем базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче:

$$R_0^{np} = a \cdot \text{ГСОП} + b = 0,00035 \cdot 4402 + 1,4 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}, \quad (8)$$

где a, b — значения, которые следует принимать для соответствующих групп зданий (определяются по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»).

Определяем коэффициент n_i :

$$n_i = \frac{t_b^* - t_{on}^*}{t_b - t_{on}} = \frac{18 - (-3,9)}{18 - (-3,9)} = 1. \quad (9)$$

Умножаем базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче на коэффициент n_i :

$$R_0^{np} = R_0^{np} \cdot n_i = 2,941 \cdot 1 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}. \quad (10)$$

Рассчитываем нормируемое значение приведенного значения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_0^{норм} = R_0^{np} \cdot m_i = 2,941 \cdot 1 = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}, \quad (11)$$

где $m_i = 1$ — коэффициент, учитывающий регион строительства.

$$R_0^{норм} = 2,941 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт} < R_0^{np} = 4,29 \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче больше нормируемого, следовательно, конструкция стены отвечает теплотехническим требованиям. Определим коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции:

$$k = \frac{1}{R_0^{np}} = \frac{1}{4,29} = 0,233 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Полученные результаты сравним относительно величин, принятых для расчетов предварительно (см. табл. 1, 12).

Для расчета плоского температурного поля определим невязку полученного значения коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции с коэффициентом теплопередачи, получаемым при расчете по значениям из табл. 1:

$$t_{ncp}^* = \frac{\begin{bmatrix} -25,15 \cdot 0,4225 + (-26,56) \cdot 0,845 + (-26,56) \cdot 0,845 + \\ + (-26,56) \cdot 0,845 + (-25,15) \cdot 0,8725 + (-23,74) \cdot 0,900 + \\ + (-25,15) \cdot 0,935 + (-26,56) \cdot 0,970 + (-25,15) \cdot 0,935 + \\ + (-23,74) \cdot 0,900 + (-25,15) \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = -25,42 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{всп}^* = \frac{\begin{bmatrix} 16,8 \cdot 0,4225 + 16,84 \cdot 0,845 + 16,84 \cdot 0,845 + \\ + 16,84 \cdot 0,845 + 16,8 \cdot 0,8725 + 16,76 \cdot 0,900 + \\ + 16,8 \cdot 0,935 + 16,84 \cdot 0,970 + 16,8 \cdot 0,935 + \\ + 16,76 \cdot 0,900 + 16,8 \cdot 0,450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,4225 + 0,845 + 0,845 + 0,845 + 0,8725 + 0,900 + \\ + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,450 \end{bmatrix}} = 16,81 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_b^* = 8,7(18 - 16,81) = 10,35 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_n^* = 23(-25,42 - (-27)) = 36,34 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{cp}^* = \frac{10,35 + 36,34}{2} = 23,35 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_0^{np} = \frac{(18 - (-27))}{23,35} = 1,93 \text{ }^\circ\text{C/Вт};$$

Табл. 13. Невязка значений температур в узлах, %

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	5,2	0,04	0,04	0,04	5,2	11,2	5,3	0,9	5,3	11,2	5,3
B	4,9	0,1	0,1	0,1	4,9	10,8	5,1	1,4	5,1	10,8	5,1
C	3,2	0,8	0,2	1,0	4,9	0,3	3,5	0,6	3,5	0,3	5,4
D	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,6	0,4	0,1	0,4	0,6	1,4
E	0,1	0,2	0,1	0,3	0,5	1,0	0,2	0,1	0,2	1,0	1,2

$$k^* = \frac{1}{1,93} = 0,518 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}.$$

Определим невязку величин между *k* и *k**:

$$\frac{0,518 - 0,233}{0,518} \cdot 100 = 55 \text{ \%}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования можно утверждать, что данная невязка характеризует повышение точности расчета коэффициента теплопередачи методом температурного поля на 55 % для данной ограждающей конструкции.

Также определим невязку значений температур в узлах.

Как видно из табл. 13, невязка между температурами, рассчитанными методом плоского температурного поля, и теми, что были взяты изначально, имеет наибольшее значение в узлах, где теплопередача в соседние узлы идет по нескольким материалам, другими словами, в узлах, где наблюдается наибольшая неоднородность конструкции.

На основании этого можно сделать вывод, что использование метода температурных полей для расчета коэффициента теплопередачи неоднородной конструкции оправдывает себя, если необходима наибольшая точность расчета. Для определения температур в толще конструкции, особенно в местах наибольшей неоднородности, следует использовать метод температурных полей, так как он значительно увеличивает точность расчета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корниенко С.В. Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // AlfaBuild. 2020. № 1 (13). С. 1–6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH.

2. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017

3. Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of the moisture conditions of the building envelope of sand-lime brick walls insulated with expanded polystyrene of various grades // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2758. P. 020013. DOI: 10.1063/5.0145492

4. Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е. Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 159–166. EDN USRREO.

5. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Greysukh G.I., Mel'nikov I.E., Ratushnaia L.G. Study of humidity conditions for wall's envelopes of lime-sand bricks insulated with different polystyrene foams // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Issue 23.

6. Myskin S., Koroleva T., Ivachev M. Humidity conditions of brick enclosures heat-insulated by polystyrene foam from various manufacturers // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 403. P. 03010. DOI: 10.1051/e3sconf/2023403-03010

7. Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е. Исследование влажностных полей в толще облегченной ограждающей конструкции // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 1 (38). С. 177–186. EDN HARVQE.

8. Королева Т.И., Мельников И.Е. Исследование влажностного режима ограждающих конструкций стен : монография. Пенза, 2019. 136 с. EDN LJIJGL.

9. Петров А.С., Юзмухаметов А.М., Куприянов В.Н., Андрейцева К.С. Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 24–28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28. EDN WLBNFW.

10. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016

11. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical Method for Determination of Maximum Wetting Plane Position in Enclosing Structures of Buildings // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 2. P. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046

12. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002
13. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ. 2016. № 11. С. 132–145. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145
14. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064
15. Королева Т.И., Аржаева Н.В. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 152–158. EDN XRQMEX.
16. Королева Т.И., Мыскин С.М. Методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций зданий // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сб. ст. XXII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С 64–71. EDN ULTJRK.
17. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций : дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2018. 380 с. EDN OSTDTZ.
18. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 4. С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495. EDN ZGXMTR.
19. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 34–54. EDN WEFRRD.
20. Логанина В.И., Рыжов А.Д., Фролов М.В. Влияние теплоизоляционной штукатурки на основе известково-перлитового состава на влажностный режим наружных стен зданий // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 1 (26). С. 44–47. EDN VSXMPP.
21. Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 8 (52). С. 25–37. DOI: 10.5862/MCE.52.4. EDN TBVUHB.

Поступила в редакцию 26 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Сергей Михайлович Мыскин** — аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 480028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 2396-2314; Scopus: 58303420600; ORCID: 0000-0002-0388-2729; myskin.sergei@yandex.ru;

Тамара Ивановна Королева — кандидат экономических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 480028, г. Пенза, ул. Германа Титова; профессор кафедры пожарной безопасности; **Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ))**; 440039, г. Пенза, ул. Гагарина, д. 11а, корп. 12; korolevatamara@mail.ru;

Михаил Александрович Ивачев — доцент кафедры пожарной безопасности; **Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (ПКИТ (филиал) МГУТУ имени К.Г. Разумовского (ПКУ))**; 440039, г. Пенза, ул. Гагарина, д. 11а, корп. 12; ivacheff2015@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мыскин С.М. — идея, сбор материала, обработка материала, проведение исследования, итоговые выводы, написание и оформление статьи.

Королева Т.И. — научное руководство, формулирование концепции исследования и научное редактирование текста.

Ивачев М.А. — доработка текста, участие в сборе материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The main measure to counteract moisture condensation on the inner surface of the enclosure is to re-

duce the humidity of the air in the room, which can be achieved by ventilation efforts (the dew point is reduced) or by increasing the thermal properties of the wall (in-

creasing the heat transfer resistance of the enclosure R_e or reducing the resistance to heat penetration R_i [1–12]). A good option is when the internal surface temperature is 5–10 °C above the dew point temperature.

For the correct choice of building structures of buildings at the stage of their design, it is necessary to carry out a thermal calculation.

Nowadays, in most cases, the design is based on a multi-layer homogeneous wall structure.

This paper presents a study of plane temperature fields in the thickness of a heterogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame according to the method developed by K.F. Fokin.

Calculation of the temperature field is important not only for solving the issues of building thermal engineering, but also for determining the temperature stresses in the frame elements. In particular, when designing high-rise buildings with a steel or reinforced concrete frame with rigid reinforcement, the calculation of the temperature field of the frame elements allows designers to calculate the stresses in the frame material more accurately [13–21].

MATERIALS AND METHODS

The object of the study is an external heterogeneous enclosing wall structure of an average modern residential building, namely a commercial space on the ground floor (0.000) in a residential building, located at the address: 97 A Pobeda Avenue, Penza. The section of the external wall running along axis 1 was calculated.

Air characteristics outside the building for Penza are determined according to CP 131.13330.2020 “Building Climatology”. Outdoor and indoor air parameters:

- 1) operating conditions — A ;
- 2) $t_{ef} 0.92 = -27\text{ °C}$;
- 3) $\phi_o = 84\text{ %}$;
- 4) $t_i = 18\text{ °C}$;
- 5) $\phi_i = 60\text{ %}$.

The characteristics of the external wall materials are taken according to CP 50.13330.2012 “Thermal Protection of Buildings” and are given below:

- layer No. 1: decorative facade plaster on glass mesh — $\delta_1 = 0.02\text{ m}$; $\lambda_1 = 0.76\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_1 = 1,800\text{ kg/m}^3$; $\mu_1 = 0.09\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 2: insulation from EPS–16F polystyrene foam boards, GOST 15588–2014 — $\delta_2 = 0.15\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.039\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 16\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.05\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 3: masonry of ceramic slotted stone KM–r 250 × 120 × 140/2, 1NF/100/1,2/25/ GOST 530–2012 on mortar M50 — $\delta_3 = 0.25\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.64\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 1,400\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.14\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 4: monolithic reinforced concrete — $\delta_2 = 0.27\text{ m}$; $\lambda_2 = 1.92\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 2,500\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.03\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$;
- layer No. 5: lime–sand plaster for interior finishing — $\delta_2 = 0.02\text{ m}$; $\lambda_2 = 0.7\text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$; $\gamma_2 = 1,600\text{ kg/m}^3$; $\mu_2 = 0.12\text{ mg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$.

A general view of the wall structure is shown in Fig. 1.

We select a section of the envelope with two monolithic nodes and two masonry nodes. Next, we partition this section with a coordinate grid so that at each

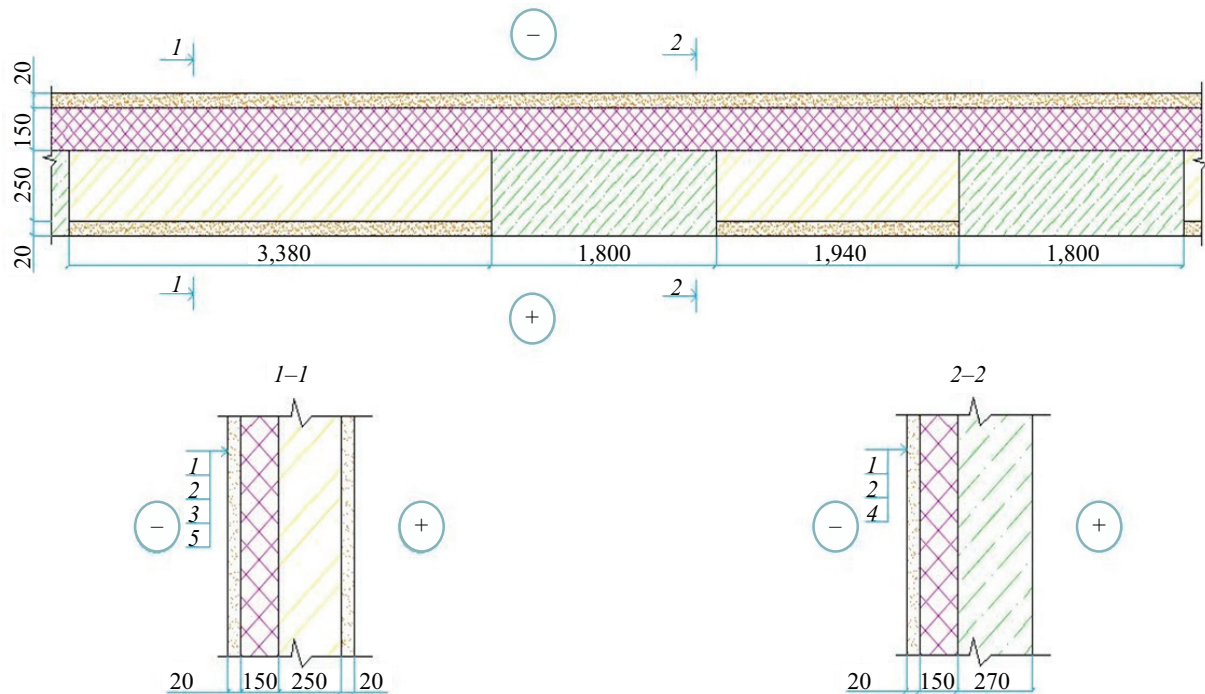


Fig. 1. Construction of heterogeneous insulated exterior wall with monolithic reinforced concrete frame: layer No. 1. Decorative facade plaster over glass mesh; layer No. 2. Insulation made of polystyrene foam boards EPS–16F, GOST 15588–2014; layer No. 3. Ceramic slotted stone masonry KM–r 250 × 120 × 140/2, 1NF/100/1.2/25/ GOST 530–2012 on M50 mortar; layer No. 4. Monolithic reinforced concrete; layer No. 5. Lime–sand plaster for interior finishing

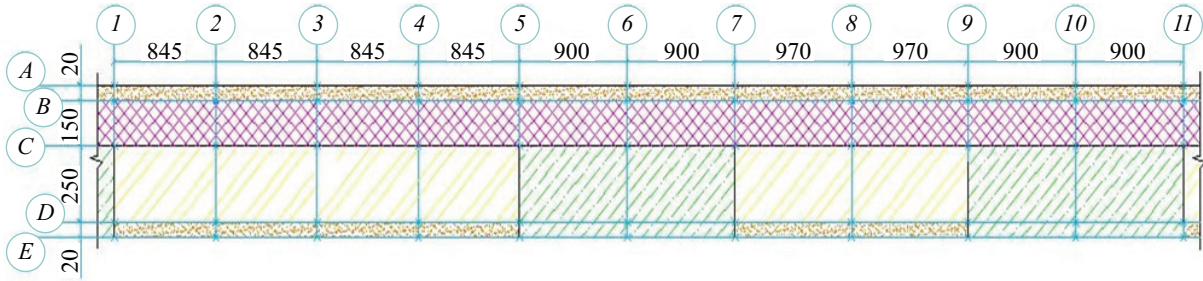


Fig. 2. Schematic diagram of node breakdown of a heterogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame

place where the material changes, a new node is marked (Fig. 2). Afterwards, we calculate the temperatures of each node depending on the four neighbouring nodes.

In this paper detailed calculations are described for node A1. Other nodes are calculated by analogy.

To node A2 the heat transfer passes through the plaster layer: the distance between these nodes $\Delta = 0.845$ m; the area over which the heat transfer takes place is $F = 0.02/2 = 0.01$ m²; the heat transfer coefficient between the materials is $\lambda_1 = 0.76$ W/(m·°C).

Let us determine the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to node A2 taking into account the heat transfer area:

$$k_{A1-A2} = \frac{\lambda}{\Delta} \cdot F = \frac{0.76}{0.845} \cdot 0.01 = 0.009 \text{ W/°C}. \quad (1)$$

Let's calculate the value of heat transferred to node A2, W:

$$Q_{A1-A2} = (t_{A1} - t_{A2})k_{A1-A2}. \quad (2)$$

To node B1, heat transfer is also performed along the plaster layer, but in the perpendicular direction: the distance between the nodes $\Delta = 0.02$ m; the area over which heat transfer takes place, $F = (0.845 + 0.600)/2 = 0.723$ m²; the heat transfer coefficient between the materials $\lambda_1 = 0.76$ W/(m·°C).

Let's set the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to node B1 taking into account the heat transfer area:

$$k_{A1-B1} = \frac{0.76}{0.02} \cdot 0.723 = 27.474 \text{ W/°C}.$$

Let's calculate the value of transferred heat, W, to node B1:

$$Q_{A1-B1} = (t_{A1} - t_{B1})k_{A1-B1}.$$

To the outside air, heat transfer occurs over an area of $F = 0.723$ m² at $\alpha_o = 23$ W/(m²·°C).

Determine the heat transfer coefficient, W/°C, from node A1 to the outside air:

$$k_{A1-o} = \alpha_o \cdot F = 23 \cdot 0.723 = 16.629 \text{ W/°C}.$$

Let's find the amount of transferred heat, W, from node A1 to the outside air:

$$Q_{A1-o} = (t_{A1} - t_o)k_{A1-o}.$$

Let's derive the heat balance equation for node A1:

$$2Q_{A1-A2} + Q_{A1-B1} + Q_{A1-o} = 0.$$

Node A2 in the calculation is taken with a coefficient of 1.71, because node A1 is located on the axis of symmetry of the envelope and on the opposite side of the axis there is a node of 600 mm.

Let's substitute the values of the heat values:

$$1.71 \cdot (t_{A1} - t_{A2})k_{A1-A2} + (t_{A1} - t_{B1})k_{A1-B1} + (t_{A1} - t_o)k_{A1-o} = 0.$$

Let us express the temperature at node A1 from the equation:

$$t_{A1} = \frac{1.71 \cdot k_{A1-A2} t_{A2} + k_{A1-B1} t_{B1} + k_{A1-o} t_o}{1.71 \cdot k_{A1-A2} + k_{A1-B1} + k_{A1-o}}. \quad (3)$$

Substituting the values of heat transfer coefficients, we obtain:

$$t_{A1} = \frac{1.71 \cdot 0.009 t_{A2} + 27.474 t_{B1} + 16.629 t_o}{1.71 \cdot 0.009 + 27.474 + 16.629} = 0.0003 t_{A2} + 0.623 t_{B1} + 0.377 t_o.$$

RESEARCH RESULTS

Thus, the calculation of the temperature field of an inhomogeneous insulated exterior wall with a monolithic reinforced concrete frame is reduced to solving the following equations:

$$\begin{aligned} t_{A1} &= 0.003 t_{A2} + 0.623 t_{B1} + 0.377 t_o; \\ t_{A2} &= 0.002 t_{A1} + 0.623 t_{B2} + 0.0002 t_{A3} + 0.377 t_o; \\ t_{A3} &= 0.002 t_{A2} + 0.623 t_{B3} + 0.0002 t_{A4} + 0.377 t_o; \\ t_{A4} &= 0.002 t_{A3} + 0.623 t_{B4} + 0.0002 t_{A5} + 0.377 t_o; \\ t_{A5} &= 0.002 t_{A4} + 0.623 t_{B5} + 0.0002 t_{A6} + 0.377 t_o; \\ t_{A6} &= 0.002 t_{A5} + 0.623 t_{B6} + 0.0002 t_{A7} + 0.377 t_o; \\ t_{A7} &= 0.002 t_{A6} + 0.623 t_{B7} + 0.0002 t_{A8} + 0.377 t_o; \\ t_{A8} &= 0.002 t_{A7} + 0.623 t_{B8} + 0.0002 t_{A9} + 0.377 t_o; \\ t_{A9} &= 0.002 t_{A8} + 0.623 t_{B9} + 0.0002 t_{A10} + 0.377 t_o; \\ t_{A10} &= 0.002 t_{A9} + 0.623 t_{B10} + 0.0002 t_{A11} + 0.377 t_o; \\ t_{A11} &= 0.002 t_{A9} + 0.623 t_{B10} + 0.377 t_o; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{B1} &= 0.992 t_{A1} + 0.0007 t_{B2} + 0.007 t_{C1}; \\ t_{B2} &= 0.992 t_{A2} + 0.0004 t_{B1} + 0.0004 t_{B3} + 0.007 t_{C2}; \\ t_{B3} &= 0.992 t_{A3} + 0.0004 t_{B2} + 0.0004 t_{B4} + 0.007 t_{C3}; \\ t_{B4} &= 0.992 t_{A4} + 0.0004 t_{B3} + 0.0004 t_{B5} + 0.007 t_{C4}; \\ t_{B5} &= 0.992 t_{A5} + 0.0004 t_{B4} + 0.0004 t_{B6} + 0.007 t_{C5}; \\ t_{B6} &= 0.993 t_{A6} + 0.0003 t_{B5} + 0.0003 t_{B7} + 0.007 t_{C6}; \\ t_{B7} &= 0.993 t_{A7} + 0.0003 t_{B6} + 0.0003 t_{B8} + 0.007 t_{C7}; \\ t_{B8} &= 0.993 t_{A8} + 0.003 t_{B7} + 0.003 t_{B9} + 0.007 t_{C8}; \\ t_{B9} &= 0.993 t_{A9} + 0.0003 t_{B8} + 0.0003 t_{B10} + 0.007 t_{C9}; \\ t_{B10} &= 0.993 t_{A10} + 0.0003 t_{B9} + 0.0003 t_{B11} + 0.007 t_{C10}; \\ t_{B11} &= 0.993 t_{A11} + 0.0007 t_{B10} + 0.007 t_{C11}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{C1} &= 0.046t_{B1} + 0.099t_C + 0.024t_{C2} + 0.831t_{D1}; \\
t_{C2} &= 0.085t_{B2} + 0.038t_{C1} + 0.038t_{C3} + 0.839t_{D2}; \\
t_{C3} &= 0.085t_{B3} + 0.038t_{C2} + 0.038t_{C4} + 0.839t_{D3}; \\
t_{C4} &= 0.085t_{B4} + 0.038t_{C3} + 0.038t_{C5} + 0.839t_{D4}; \\
t_{C5} &= 0.044t_{B5} + 0.019t_{C4} + 0.053t_{C6} + 0.884t_{D5}; \\
t_{C6} &= 0.030t_{B6} + 0.035t_{C5} + 0.035t_{C7} + 0.899t_{D6}; \\
t_{C7} &= 0.046t_{B7} + 0.051t_{C6} + 0.016t_{C8} + 0.887t_{D7}; \\
t_{C8} &= 0.087t_{B8} + 0.030t_{C7} + 0.030t_{C9} + 0.854t_{D8}; \\
t_{C9} &= 0.046t_{B9} + 0.016t_{C8} + 0.051t_{C10} + 0.887t_{D9}; \\
t_{C10} &= 0.030t_{B10} + 0.035t_{C9} + 0.035t_{C11} + 0.899t_{D10}; \\
t_{C11} &= 0.045t_{B11} + 0.052t_{C10} + 0.017t_C + 0.886t_{D11}; \\
\\
t_{D1} &= 0.071t_{C1} + 0.009t_D + 0.002t_{D2} + 0.918t_{E1}; \\
t_{D2} &= 0.068t_{C2} + 0.003t_{D1} + 0.003t_{D3} + 0.926t_{E2}; \\
t_{D3} &= 0.068t_{C3} + 0.003t_{D2} + 0.003t_{D4} + 0.926t_{E3}; \\
t_{D4} &= 0.068t_{C4} + 0.003t_{D3} + 0.003t_{D5} + 0.926t_{E4}; \\
t_{D5} &= 0.072t_{C5} + 0.002t_{D4} + 0.005t_{D6} + 0.922t_{E5}; \\
t_{D6} &= 0.077t_{C6} + 0.003t_{D5} + 0.003t_{D7} + 0.920t_{E6}; \\
t_{D7} &= 0.072t_{C7} + 0.004t_{D6} + 0.001t_{D8} + 0.922t_{E7}; \\
t_{D8} &= 0.068t_{C8} + 0.002t_{D7} + 0.002t_{D9} + 0.927t_{E8}; \\
t_{D9} &= 0.072t_{C9} + 0.001t_{D8} + 0.004t_{D10} + 0.922t_{E9}; \\
t_{D10} &= 0.077t_{C10} + 0.003t_{D9} + 0.003t_{D11} + 0.920t_{E10}; \\
t_{D11} &= 0.050t_{C11} + 0.003t_{D10} + 0.001t_{E10} + 0.946t_{E11}; \\
\\
t_{E1} &= 0.873t_{D1} + 0.0006t_E + 0.0002t_{E2} + 0.126t_{Ei}; \\
t_{E2} &= 0.801t_{D2} + 0.0002t_{E1} + 0.0002t_{E3} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E3} &= 0.801t_{D3} + 0.0002t_{E2} + 0.0002t_{E4} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E4} &= 0.801t_{D4} + 0.0002t_{E3} + 0.0002t_{E5} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E5} &= 0.884t_{D5} + 0.0001t_{E4} + 0.0003t_{E6} + 0.116t_{Ei}; \\
t_{E6} &= 0.916t_{D6} + 0.0002t_{E5} + 0.0002t_{E7} + 0.083t_{Ei}; \\
t_{E7} &= 0.881t_{D7} + 0.0003t_{E6} + 0.0001t_{E8} + 0.119t_{Ei}; \\
t_{E8} &= 0.801t_{D8} + 0.0002t_{E7} + 0.0002t_{E9} + 0.199t_{Ei}; \\
t_{E9} &= 0.881t_{D9} + 0.0001t_{E8} + 0.0003t_{E10} + 0.119t_{Ei}; \\
t_{E10} &= 0.916t_{D10} + 0.0002t_{E9} + 0.0002t_{E11} + 0.083t_{Ei}; \\
t_{E11} &= 0.882t_{D11} + 0.0003t_{E10} + 0.0001t_E + 0.118t_{Ei}.
\end{aligned}$$

Calculations are carried out by iteration method (successive approximation) in tabular form. For the first approximation, the temperature values are found using the equation of heat transfer through a flat wall. For this purpose, we calculate the cross sections of the wall along the coordinate axes 3, 6.

For calculations we set the value of the internal air temperature at 18 °C and take the outside air temperature equal to the temperature of the coldest five-day period for Penza (according to CP 131.13330.2020 "Building Climatology" is equal to -27 °C).

Let's calculate the cross-section of the wall along axis 3:

$$R_0 = \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.45 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};$$

$$R_0 = \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};$$

$$\begin{aligned}
t_E &= t_i - (t_i - t_o) \frac{\Sigma R}{R_0} = \\
&= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7}\right)}{4.45} = 16.84^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_D &= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7}\right)}{4.45} = \\
&= 16.55^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_C &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64}\right)}{4.45} = 12.60^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_B &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039}\right)}{4.45} = -26.30^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_A &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76}\right)}{4.45} = -26.56^\circ\text{C}.
\end{aligned}$$

These values are taken for axes 2, 3, 4, 8.

Let's calculate the cross-section of the wall along axis 6:

$$\begin{aligned}
R_0 &= \frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{0.7} + \frac{0.25}{0.64} + \frac{0.15}{0.039} + \\
&+ \frac{0.02}{0.76} + \frac{1}{23} = 4.17 \text{ W/(m}^\circ\text{C)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_E &= t_i - (t_i - t_o) \frac{\Sigma R}{R_0} = \\
&= 18 - (18 - (-27)) \cdot \frac{\left(\frac{1}{8.7}\right)}{4.17} = 16.76^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_D &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92}\right)}{4.45} = 16.73^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_C &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92}\right)}{4.45} = 15.42^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_B &= 18 - (18 - (-27)) \times \\
&\times \frac{\left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039}\right)}{4.45} = -23.48^\circ\text{C};
\end{aligned}$$

$$t_A = 18 - (18 - (-27)) \times \left(\frac{\frac{1}{8.7} + \frac{0.02}{1.92} + \frac{0.25}{1.92} + \frac{0.15}{0.039} + \frac{0.02}{0.76}}{4.45} \right) = -23.74 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

These values are taken for axes 6, 10.

The temperature values for axes 1, 5, 7, 9, 11 are found as the arithmetic mean between the values for axes 3 and 6:

$$t_E = \frac{16.84 + 16.76}{2} = 16.8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_D = \frac{16.55 + 16.73}{2} = 16.64 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_C = \frac{12.60 + 15.42}{2} = 14.01 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_B = \frac{-26.30 - 23.48}{2} = -24.89 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_A = \frac{-26.56 - 23.74}{2} = -25.15 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Further calculation is summarized in a tabular form (Table 1–12). We stop the calculation process at the approximation in which temperatures differ from the previous approximation by no more than 0.1 °C.

The discrepancy between the temperature values of proximity 11 and proximity 10 does not exceed 0.1 °C, the calculation is over.

Based on the obtained temperatures at the nodes of the wall envelope, we determine the exact value of the heat transfer resistance. For this purpose, we calculate the value of the average heat flux through the enclosure structure, W/m²:

$$q_{av} = \frac{q_i + q_o}{2}, \quad (4)$$

where q_i is the heat flux passing through the inner surface of the enclosure, W/m²; q_o is the heat flux passing through the outer surface of the enclosure, W/m²;

$$q_i = \alpha_i(t_i - t_{iav}), \quad (5)$$

where α_i — heat transfer coefficient of the internal surface of the enclosing structure, W/(m²·°C); t_i — temperature of the internal air, °C; t_{iav} — average temperature of the internal surface of the enclosing structure, °C;

$$q_o = \alpha_o(t_o - t_{oav}), \quad (6)$$

where α_o — heat transfer coefficient of the external surface of the enclosing structure, W/(m²·°C); t_o — outside air temperature, °C; t_{oav} — average temperature of the external surface of the enclosing structure, °C.

$$t_{oav} = \frac{\left[\begin{aligned} &-26.47 \cdot 0.4225 + (-26.57) \cdot 0.845 + (-26.57) \cdot 0.845 + \\ &+ (-26.57) \cdot 0.845 + (-26.46) \cdot 0.8725 + (-26.39) \cdot 0.900 + \\ &+ (-26.49) \cdot 0.935 + (-26.79) \cdot 0.970 + (-26.49) \cdot 0.935 + \\ &+ (-26.39) \cdot 0.900 + (-26.49) \cdot 0.450 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ &+ 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{aligned} \right]} = -26.52 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{iav} = \frac{\left[\begin{aligned} &16.82 \cdot 0.4225 + 16.87 \cdot 0.845 + 16.85 \cdot 0.845 + \\ &+ 16.89 \cdot 0.845 + 16.89 \cdot 0.8725 + 16.93 \cdot 0.900 + \\ &+ 16.76 \cdot 0.935 + 16.85 \cdot 0.970 + 16.76 \cdot 0.935 + \\ &+ 16.93 \cdot 0.900 + 17.00 \cdot 0.450 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ &+ 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{aligned} \right]} = 16.86 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$q_i = 8.7(18 - 16.86) = 9.92 \text{ W/m}^2;$$

$$q_o = 23(-26.52 - (-27)) = 11.04 \text{ W/m}^2;$$

$$q_{av} = \frac{9.92 + 11.04}{2} = 10.48 \text{ W/m}^2.$$

Table 1. Preliminarily accepted values of temperatures in nodes

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.15	-26.56	-26.56	-26.56	-25.15	-23.74	-25.15	-26.56	-25.15	-23.74	-25.15
B	-24.89	-26.30	-26.30	-26.30	-24.89	-23.48	-24.89	-26.30	-24.89	-23.48	-24.89
C	14.01	12.60	12.60	12.60	14.01	15.42	14.01	12.60	14.01	15.42	14.01
D	16.64	16.55	16.55	16.55	16.64	16.73	16.64	16.55	16.64	16.73	16.64
E	16.8	16.84	16.84	16.84	16.8	16.76	16.8	16.84	16.8	16.76	16.8

Table 2. 1st approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.69	-26.57	-26.57	-26.57	-25.69	-24.81	-25.69	-26.57	-25.69	-24.81	-25.69
B	-24.87	-26.28	-26.28	-26.28	-24.87	-23.48	-24.89	-26.44	-24.89	-23.48	-24.89
C	14.51	12.66	12.61	12.66	14.67	15.32	14.60	12.69	14.60	15.32	14.64
D	16.60	16.55	16.55	16.55	16.62	16.71	16.58	16.53	16.58	16.71	16.66
E	16.81	16.85	16.85	16.85	16.80	16.83	16.81	16.85	16.81	16.83	16.81

Table 3. 2nd approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-25.68	-26.56	-26.56	-26.56	-25.68	-24.81	-25.69	-26.66	-25.69	-24.81	-25.69
B	-25.40	-26.29	-26.29	-26.29	-25.40	-24.54	-25.42	-26.44	-25.42	-24.54	-25.42
C	14.47	12.68	12.61	12.69	14.65	15.34	14.55	12.69	14.55	15.34	14.65
D	16.65	16.56	16.56	16.56	16.66	16.76	16.63	16.55	16.63	16.76	16.70
E	16.77	16.85	16.85	16.85	16.79	16.81	16.76	16.83	16.76	16.81	16.82

Table 4. 3rd approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.01	-26.57	-26.57	-26.57	-26.01	-25.47	-26.02	-26.66	-26.02	-25.47	-26.02
B	-25.39	-26.28	-26.28	-26.28	-25.39	-24.54	-25.42	-26.54	-25.42	-24.54	-25.42
C	14.49	12.69	12.62	12.70	14.66	15.35	14.57	12.71	14.57	15.35	14.67
D	16.61	16.56	16.56	16.57	16.65	16.75	16.58	16.53	16.58	16.75	16.71
E	16.82	16.85	16.85	16.85	16.82	16.85	16.80	16.85	16.80	16.85	16.86

Table 5. 4th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.00	-26.56	-26.56	-26.56	-26.00	-25.47	-26.02	-26.72	-26.02	-25.47	-26.02
B	-25.72	-26.29	-26.29	-26.29	-25.72	-25.20	-25.75	-26.54	-25.75	-25.20	-25.75
C	14.46	12.69	12.62	12.71	14.66	15.35	14.52	12.68	14.52	15.35	14.68
D	16.65	16.57	16.56	16.57	16.68	16.78	16.62	16.55	16.62	16.78	16.75
E	16.78	16.85	16.85	16.86	16.81	16.84	16.76	16.83	16.76	16.84	16.87

Table 6. 5th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.21	-26.57	-26.57	-26.57	-26.21	-25.88	-26.23	-26.72	-26.23	-25.88	-26.23
B	-25.71	-26.28	-26.28	-26.28	-25.71	-25.20	-25.75	-26.60	-25.75	-25.20	-25.75
C	14.48	12.70	12.62	12.70	14.67	15.35	14.54	12.70	14.54	15.35	14.70
D	16.61	16.57	16.56	16.58	16.67	16.77	16.58	16.53	16.58	16.77	16.76
E	16.82	16.86	16.85	16.86	16.84	16.87	16.79	16.85	16.79	16.87	16.90

Table 7. 6th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	-26.20	-26.56	-26.56	-26.56	-26.20	-25.88	-26.23	-26.76	-26.23	-25.88	-26.23
B	-25.92	-26.29	-26.29	-26.29	-25.92	-25.61	-25.96	-26.60	-25.96	-25.61	-25.96
C	14.44	12.70	12.63	12.71	14.66	15.34	14.51	12.67	14.51	15.34	14.70
D	16.65	16.58	16.56	16.58	16.70	16.80	16.61	16.55	16.61	16.80	16.79
E	16.78	16.86	16.85	16.87	16.83	16.86	16.76	16.83	16.76	16.86	16.91

Table 8. 7th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.34	–26.57	–26.57	–26.57	–26.33	–26.14	–26.36	–26.76	–26.36	–26.14	–26.36
B	–25.91	–26.28	–26.28	–26.28	–25.91	–25.61	–25.96	–26.64	–25.96	–25.61	–25.96
C	14.47	12.70	12.62	12.71	14.68	15.36	14.52	12.69	14.52	15.36	14.72
D	16.61	16.58	16.56	16.59	16.69	16.79	16.58	16.53	16.58	16.79	16.80
E	16.82	16.87	16.85	16.87	16.86	16.89	16.78	16.85	16.78	16.89	16.94

Table 9. 8th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.33	–26.56	–26.56	–26.56	–26.33	–26.14	–26.36	–26.78	–26.36	–26.14	–26.36
B	–26.05	–26.29	–26.29	–26.29	–26.04	–25.87	–26.09	–26.64	–26.09	–25.87	–26.09
C	14.44	12.71	12.63	12.72	14.67	15.35	14.50	12.67	14.50	15.35	14.73
D	16.65	16.58	16.56	16.59	16.72	16.82	16.60	16.55	16.60	16.82	16.83
E	16.78	16.87	16.85	16.88	16.85	16.88	16.76	16.83	16.76	16.88	16.95

Table 10. 9th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.42	–26.57	–26.57	–26.57	–26.41	–26.30	–26.44	–26.78	–26.44	–26.30	–26.44
B	–26.04	–26.28	–26.28	–26.28	–26.04	–25.87	–26.09	–26.66	–26.09	–25.87	–26.09
C	14.46	12.70	12.63	12.72	14.69	15.37	14.51	12.69	14.51	15.37	14.75
D	16.61	16.59	16.56	16.60	16.71	16.81	16.58	16.53	16.58	16.81	16.84
E	16.82	16.87	16.85	16.88	16.88	16.91	16.77	16.85	16.77	16.91	16.97

Table 11. 10th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.41	–26.56	–26.56	–26.56	–26.41	–26.30	–26.44	–26.79	–26.44	–26.30	–26.44
B	–26.13	–26.29	–26.29	–26.29	–26.12	–26.02	–26.17	–26.66	–26.17	–26.02	–26.17
C	14.43	12.71	12.63	12.73	14.68	15.36	14.49	12.67	14.49	15.36	14.76
D	16.65	16.58	16.56	16.60	16.74	16.84	16.59	16.55	16.59	16.84	16.86
E	16.78	16.88	16.85	16.89	16.87	16.90	16.76	16.83	16.76	16.90	16.98

Table 12. 11th approximation

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	–26.47	–26.57	–26.57	–26.57	–26.46	–26.39	–26.49	–26.79	–26.49	–26.39	–26.49
B	–26.12	–26.28	–26.28	–26.28	–26.12	–26.02	–26.17	–26.67	–26.17	–26.02	–26.17
C	14.46	12.70	12.63	12.73	14.70	15.38	14.50	12.68	14.50	15.38	14.77
D	16.61	16.59	16.56	16.61	16.73	16.83	16.58	16.53	16.58	16.83	16.87
E	16.82	16.87	16.85	16.89	16.89	16.93	16.76	16.85	16.76	16.93	17.00

Knowing the value of the heat flux through the enclosure, we find the heat transfer resistance of the enclosure from the formula:

$$R_0^{giv} = \frac{t_i + t_o}{q_{av}};$$
$$R_0^{giv} = \frac{(18 - (-27))}{10.48} = 4.29 \text{ }^{\circ}\text{C/W}.$$

(7)

To check whether the structure meets the thermal protection requirements or not, we find the standardized value of heat transfer resistance for the wall and compare it with the value obtained in the calculation.

Determine the degree days of the heating period:

$$\text{HDD} = (t_i - t_{op}) \cdot Z_{op} = (18 - (-3.9)) \cdot 201 =$$
$$= 4,402 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{day},$$

where t_i — indoor air temperature, $^{\circ}\text{C}$; t_{op} — average

temperature of the heating period with average daily air temperature not exceeding 8 °C; Z_{op} — number of days of the heating period with average daily air temperature not exceeding 8 °C, days.

Let's calculate the basic value of the required heat transfer resistance:

$$R_0^{req} = a \cdot HDD + b = 0.00035 \cdot 4,402 + 1.4 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}, \quad (8)$$

where a , b are the values to be taken for the respective groups of buildings (determined according to CP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings").

We determine the coefficient n_t :

$$n_t = \frac{t_i^* - t_{op}^*}{t_i - t_{op}} = \frac{18 - (-3.9)}{18 - (-3.9)} = 1. \quad (9)$$

Multiply the base value of the required heat transfer resistance by the coefficient n_t :

$$R_0^{req} = R_0^{req} \cdot n_t = 2.941 \cdot 1 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}. \quad (10)$$

Calculate the standardized value of the reduced value

of the heat transfer resistance of the enclosing structure:

$$R_0^{norm} = R_0^{req} \cdot m_t = 2.941 \cdot 1 = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}, \quad (11)$$

where $m_t = 1$ is a coefficient that takes into account the region of construction.

$$R_0^{norm} = 2.941 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} < R_0^{giv} = 4.29 \text{ °C/W}.$$

The reduced resistance to heat transfer is greater than the standard, therefore, the wall construction meets the thermal requirements. Let's determine the heat transfer coefficient of the enclosing structure:

$$k = \frac{1}{R_0^{giv}} = \frac{1}{4.29} = 0.233 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}. \quad (12)$$

Let us compare the obtained results with respect to the values taken for calculations beforehand (see Table 1, 12).

To calculate the flat temperature field, we determine the discrepancy between the obtained value of the heat transfer coefficient of the envelope structure and the heat transfer coefficient obtained by calculation using the values from Table 1:

$$t_{ov}^* = \frac{\begin{bmatrix} -25.15 \cdot 0.4225 + (-26.56) \cdot 0.845 + (-26.56) \cdot 0.845 + \\ + (-26.56) \cdot 0.845 + (-25.15) \cdot 0.8725 + (-23.74) \cdot 0.900 + \\ + (-25.15) \cdot 0.935 + (-26.56) \cdot 0.970 + (-25.15) \cdot 0.935 + \\ + (-23.74) \cdot 0.900 + (-25.15) \cdot 0.450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ + 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{bmatrix}} = -25.42 \text{ °C};$$

$$t_{iav}^* = \frac{\begin{bmatrix} 16.8 \cdot 0.4225 + 16.84 \cdot 0.845 + 16.84 \cdot 0.845 + \\ + 16.84 \cdot 0.845 + 16.8 \cdot 0.8725 + 16.76 \cdot 0.900 + \\ + 16.8 \cdot 0.935 + 16.84 \cdot 0.970 + 16.8 \cdot 0.935 + \\ + 16.76 \cdot 0.900 + 16.8 \cdot 0.450 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0.4225 + 0.845 + 0.845 + 0.845 + 0.8725 + 0.900 + \\ + 0.935 + 0.970 + 0.935 + 0.900 + 0.450 \end{bmatrix}} = 16.81 \text{ °C};$$

$$q_i^* = 8.7(18 - 16.81) = 10.35 \text{ W/m}^2;$$

$$q_{av}^* = \frac{10.35 + 36.34}{2} = 23.35 \text{ W/m}^2;$$

$$R_0^{giv} = \frac{(18 - (-27))}{23.35} = 1.93 \text{ °C/W};$$

$$k^* = \frac{1}{1.93} = 0.518 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}.$$

Let's determine the inconsistency of the values between k and k^* :

$$\frac{0.518 - 0.233}{0.518} \cdot 100 = 55 \text{ \%}.$$

CONCLUSION AND DISCUSSION

Within the framework of the conducted study, it can be stated that this non-convexity characterizes an increase in the accuracy of heat transfer coefficient calculation by the temperature field method by 55 % for the given envelope structure.

We also determine the non-convexity of the temperature values at the nodes.

As can be seen from Table 13, the discrepancy between the temperatures calculated by the flat temperature field method and those taken initially has the highest value at nodes where heat transfer to neighbouring nodes takes

Table 13. Uncertainty of temperature values in nodes, %

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	5.2	0.04	0.04	0.04	5.2	11.2	5.3	0.9	5.3	11.2	5.3
B	4.9	0.1	0.1	0.1	4.9	10.8	5.1	1.4	5.1	10.8	5.1
C	3.2	0.8	0.2	1.0	4.9	0.3	3.5	0.6	3.5	0.3	5.4
D	0.2	0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.4	0.1	0.4	0.6	1.4
E	0.1	0.2	0.1	0.3	0.5	1.0	0.2	0.1	0.2	1.0	1.2

place through several materials, in other words, at nodes where there is the greatest heterogeneity in the structure.

Based on this, it can be concluded that the use of the temperature field method for calculating the heat transfer coefficient of an inhomogeneous structure is justified if

the greatest calculation accuracy is required. The method of temperature fields should be used to determine the temperatures in the thickness of the structure, especially in places of the greatest inhomogeneity, as it significantly increases the accuracy of the calculation.

REFERENCES

1. Korniyenko S.V. Improving methods of temperature and humidity calculation in enclosing structures. *Alfa-Build*. 2020; 1(13):1-6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH. (rus.).

2. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012017. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017

3. Myskin S.M., Koroleva T.I., Ivachev M.A. Investigation of the moisture conditions of the building envelope of sand-lime brick walls insulated with expanded polystyrene of various grades. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2758:020013. DOI: 10.1063/5.0145492

4. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Mel'nikov I.E. Study of the moisture status of heterogeneous structures of exterior enclosing. *Regional Architecture and Engineering*. 2018; 2(35):159-166. EDN USRREO. (rus.).

5. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Greysukh G.I., Mel'nikov I. E., Ratushaia L.G. Study of humidity conditions for wall's envelopes of lime-sand bricks insulated with different polystyrene foams. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(23). (rus.).

6. Myskin S., Koroleva T., Ivachev M. Humidity conditions of brick enclosures heat-insulated by polystyrene foam from various manufacturers. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403:03010. DOI: 10.1051/e3sconf/202340303010

7. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Melnikov I.E. The study on moisture fields in thickness of lightweight enclosing structure. *Regional Architecture and Engineering*. 2019; 1(38):177-186. EDN HARVQE. (rus.).

8. Koroleva T.I., Melnikov I.E. *Investigation of the humidity regime of wall enclosing structures : monograph*. Penza, 2019; 136. EDN LJJGL. (rus.).

9. Petrov A.S., Yuzmuhametov A.M., Kupriianov V.N., Andreitseva K.S. Determination of the nature of humidification of enclosing structures by experimental method of color indication. *Construction Materials*. 2019; 6:24-28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28. EDN WLBNFW. (rus.).

10. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012016. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016

11. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 753(2):022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046

12. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002

13. Kornienko S.V. Specification of indoor climate design parameters at the assessment of moisture protective properties of enclosing structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 11:132-145. DOI: 10.22227/1997-0935. 2016.11.132-145 (rus.).

14. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Determination of humidity conditions of enclosing structures by the color indicator method. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 463:022064. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064

15. Koroleva T.I., Arzhaeva N.V. Study on the condensation of water vapor in the thicker multi-layer exterior enclosing. *Regional Architecture and Engineering*. 2018; 2(35):152-158. EDN XRQMEX. (rus.).

16. Koroleva T.I., Myskin S.M. Methods for calculating the humidity regime in the enclosing structures of buildings. *Problems of energy saving and ecology in in-*

dustrial and housing and communal complexes : collection of articles of the XXII International Scientific and Practical Conference. 2021; 64-71. EDN ULTJRK. (rus.).

17. Kornienko S.V. *Improving the energy efficiency of buildings by improving methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures : dis. ... doctor of technical sciences*. Volgograd, 2018; 380. EDN OSTDTZ. (rus.).

18. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):484-495. DOI: 10.22227/1997-0935. 2019.4.484-495. EDN ZGXMTR. (rus.).

19. Korniyenko S.K., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):34-54. EDN WEFRDD. (rus.).

20. Loganina V.I., Ryzhov A.D., Frolov M.V. Impact thermal insulation plaster on the basis of lime-perlite composition on moisture conditions of outside walls of buildings. *Regional Architecture and Engineering*. 2016; 1(26):44-47. EDN VSXMPP. (rus.).

21. Korniyenko S.V. Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 8(52):25-37. DOI: 10.5862/MCE.52.4. EDN TBVUHB. (rus.).

Received August 26, 2024.

Adopted in revised form on August 26, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S : **Sergei M. Myskin** — postgraduate student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 480028, Russian Federation; ID RSCI: 2396-2314; Scopus: 58303420600; ORCID: 0000-0002-0388-2729; myskin.sergei@yandex.ru;

Tamara I. Koroleva — Candidate of Economic Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 480028, Russian Federation; professor of the Department Fire Safety; **Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University)**; build. 12, 11a Gagarin st., Penza, 440039, Russian Federation; korolevatamara@mail.ru;

Mikhail A. Ivachev — Associate Professor of the Department Fire Safety; **Penza Cossack Institute of Technology (branch) of K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University)**; build. 12, 11a Gagarin st., Penza, 440039, Russian Federation; ivacheff2015@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergei M. Myskin — idea, collecting material, material processing, conducting a study, final conclusions, writing and formatting of the article.

Tamara I. Koroleva — scientific guidance, formulation of the research concept and scientific text editing.

Mikhail A. Ivachev — revision of the text, participation in the collection of material.

The authors declare that there is no conflict of interest.