

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644

Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче

Самвел Володяевич Саргсян, Вера Валерьевна Агафонова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные требования по повышению энергетической эффективности жизнедеятельности и снижению энергопотребления зданий в целом диктуют разработку новых конструкций, имеющих одновременно высокие теплозащитные и прочностные характеристики. К числу конструкций такого типа относятся многослойные стеновые панели с наполнителем из различных высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Проведен анализ эффективности принятых решений по использованию минераловатных наполнителей в двухслойной стеновой панели при различной толщине слоя наружного утеплителя.

Материалы и методы. Используются действующие нормативные документы в части обеспечения тепловой защиты ограждающих конструкций. Расчеты проводились с помощью численного моделирования в среде программного комплекса (ПК) COMSOL Multiphysics, а также инженерно-аналитическим методом расчета, представленным в нормативной литературе.

Результаты. Рассмотрены варианты устройства фасадной стены с различными толщинами слоя наружного утеплителя в сочетании с двухслойной стеновой панелью. Путем численного моделирования установлен характер распределения температур по толщине рассматриваемой конструкции стеновой панели. Выполнен анализ влияния неоднородных теплотехнических включений на эквивалентное сопротивление теплопередаче двухслойной стеновой панели.

Выводы. Результаты проведенного инженерно-аналитического расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, а также численного моделирования в среде ПК COMSOL Multiphysics позволяют получить уточненную величину сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, что способствует определению минимальной толщины слоя наружного утеплителя в зависимости от климатической зоны строительства. Применение наполнителей из минераловатных плит в конструкции двухслойных стеновых панелей увеличивает эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. Приведен пример расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели, позволяющей более точно определить минимальную толщину слоя наружного утеплителя. Предлагаемая методика расчета дает возможность существенно снизить затраты на единицу площади стеновой панели при организации утепления фасада жилого здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многослойная ограждающая конструкция, двухслойная стеновая панель, сопротивление теплопередаче, теплопроводность, плитный утеплитель, минераловатная плита, фасадная конструкция, теплопроводное включение, численное моделирование

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за замечания по стилю изложения и по научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саргсян С.В., Агафонова В.В. Учет влияния неоднородностей в стеновой панели на величину сопротивления теплопередаче // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 631–644. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644

Автор, ответственный за переписку: Вера Валерьевна Агафонова, agafonovavv@mgsu.ru.

Consideration of the effect of inhomogeneities in the wall panel on the value of heat transfer resistance

Samvel V. Sargsyan, Vera V. Agafonova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern requirements for improving the energy efficiency of life and reducing energy consumption of buildings in general dictate the development of new modern structures with high thermal protection and strength characteristics. Structures of this type include multilayer wall panels with a filler made of various highly effective thermal insulation materials. The analysis of the effectiveness of the decisions taken on the use of mineral wool fillers in a two-layer wall panel with different thickness of the outer insulation layer is carried out.

Materials and methods. The current regulatory documents regarding the provision of thermal protection of enclosing structures were used. The calculations were carried out using numerical modelling in the COMSOL Multiphysics software package, as well as by the analytical calculation method presented in the normative literature.

Results. The variants of the facade wall arrangement with different thicknesses of the external insulation layer in combination with a two-layer wall panel are considered. By conducting numerical modelling, the character of temperature distribution along the thickness of the wall panel structure under consideration is established. The analysis of the influence of inhomogeneous thermal inclusions on the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel is carried out.

Conclusions. The results of the engineering and analytical calculation of the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel, as well as numerical modelling in the COMSOL Multiphysics software package, allow to obtain an updated value of the heat transfer resistance of a two-layer wall panel, which helps to determine the minimum thickness of the outer insulation layer depending on the climatic zone of construction. The use of mineral wool fillers in the construction of double-layer wall panels increases the equivalent heat transfer resistance of the enclosing structure. An example of calculation of the equivalent heat transfer resistance of a two-layer wall panel is given, which makes it possible to determine more accurately the minimum thickness of the outer insulation layer. The proposed calculation method allows to reduce significantly the cost per unit area of the wall panel when organizing the insulation of the facade of a residential building.

KEYWORDS: multilayer enclosing structure, two-layer wall panel, heat transfer resistance, thermal conductivity, slab insulation, mineral wool slab, facade structure, thermal conductive inclusion, numerical modelling

Acknowledgements. The authors thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, contributing to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Sargsyan S.V., Agafonova V.V. Consideration of the effect of inhomogeneities in the wall panel on the value of heat transfer resistance. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):631-644. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.631-644 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Agafonova, agafonovavv@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в отечественной и зарубежной практике промышленного и гражданского строительства получили многослойные наружные ограждающие конструкции. Среди них выделяют железобетонные стеновые панели, средний слой которых выполнен из материала, имеющего низкую теплопроводность: минераловатные плиты, экструдированный пенополистирольный наполнитель, ячеистый бетон и т.д. Отличительной особенностью таких конструкций является малый вес, простота транспортировки и монтажа. Кроме того, многослойные стеновые панели отличаются повышенной энергоэффективностью за счет использования высококачественных наполнителей.

Двухслойные и трехслойные стеновые панели могут применяться как часть крупногабаритного модуля повышенной заводской готовности¹ при строительстве быстровозводимых жилых, общественных и административных зданий, складских помещений и промышленных зданий [1, 2].

Применение многослойных стеновых панелей позволяет в кратчайшие сроки возводить здания, что играет важную роль при восстановлении жилья в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [3]. Так, в одном из регионов страны здание временной больницы на 1000 мест и изолятор на 10 000 коек были возведены всего за 51 сут, при этом использовались модули заводского изготовления, состоящие из двухслойных стеновых панелей с эффективным утеплителем.

Вопросу использования на практике многослойных ограждающих конструкций посвящено

достаточное количество публикаций [4–6]. В работе [4] проведен сравнительный анализ энергоэффективности наружных ограждающих конструкций, выполненных как из традиционных материалов — кирпича, монолитного железобетона, так и новых типов конструкций — трехслойных стеновых панелей с наполнителем из ячеистого теплоизоляционного строительного материала. Сделан вывод о пониженных теплопотерях и, как следствие, снижении затрат на отоплении при использовании трехслойных стеновых панелей в каркасно-панельном домостроении.

Возможность применения сэндвич-панелей при строительстве в климатических условиях Сибири была обоснована численными расчетами [5]. Проведены подробные исследования динамики изменения теплофизических характеристик двухслойной стеновой панели с композитным наполнителем применительно к климатическим условиям Аляски [6]. Получены результаты, указывающие на повышение энергосбережения здания в целом при использовании многослойных стеновых панелей.

Для сокращения потребности энергии необходимо принятие решений, приводящих к снижению энергопотребления зданий в целом, повышению энергетической эффективности жизнедеятельности и энергосбережению [7–20]. Обоснованные расчеты по определению толщины теплоизоляционного слоя фасадной конструкции — один из важных шагов в этом направлении.

Совмещение в двухслойных стеновых панелях одновременно теплозащитных и прочностных характеристик — характерная особенность этой конструкции. Двухслойная стеновая панель в сложном многослойном ограждении фасадной конструкции наружной стены является одним из слоев, где

¹ СП 501.1325800.2021. Здания из крупногабаритных модулей.

теплозащитную функцию обеспечивает наружный теплоизоляционный слой².

Расчет с целью точного определения сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели дает возможность установить минимальную толщину наружного слоя теплоизоляционного материала, обеспечивающую требование к фасадной конструкции в целом по энергосбережению.

Представлена подробная методика теплотехнического расчета сложной фасадной конструкции со слоями утеплителя и двухслойной стеновой панелью, позволяющая точно определить толщину наружного теплоизоляционного слоя.

Выполнен сравнительный анализ проведенных расчетов двумя методами: инженерно-аналитическим методом расчета, представленным в нормативной литературе, и расчетом с помощью численного моделирования в среде программного комплекса (ПК) COMSOL Multiphysics [21].

Приведен расчет сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели с заданными размерами теплотехнических неоднородностей, с учетом которого установлена минимально допустимая величина толщины слоя наружного утеплителя стеновой панели жилого здания для условий проектирования и строительства в климатическом районе г. Москвы.

² СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.

Цель исследования — определение возможности уменьшения слоя наружного утеплителя двухслойной стеновой панели в крупногабаритном модуле на предмет теплопроводности и сокращения слоя утеплителя при устройстве фасадного пирога; изучение теплофизических характеристик двухслойных стеновых панелей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемая в работе двухслойная стеновая панель представляет собой конструкцию, выполненную из бетона класса В70, толщиной 0,16 м с заполнителем межреберного пространства из жестких минераловатных плит толщиной 0,1 м. С целью обеспечения необходимых теплоизолирующих свойств стеновых панелей используется дополнительный наружный утеплитель из минераловатных плит с меньшей плотностью. Общий вид и разрез стеновой панели представлены на рис. 1.

Стеновая панель показана на рис. 2. Выделены три регулярных элемента стеновой панели А, Б и В с характерными размерами по отдельным сечениям: А — однородный участок стеновой панели, состоящий из слоя железобетона; Б и В — неоднородные участки, состоящие из слоя железобетона с минераловатными плитами в качестве заполнителя.

Расчеты проведены в условиях климатического района строительства г. Москвы, объектом исследо-

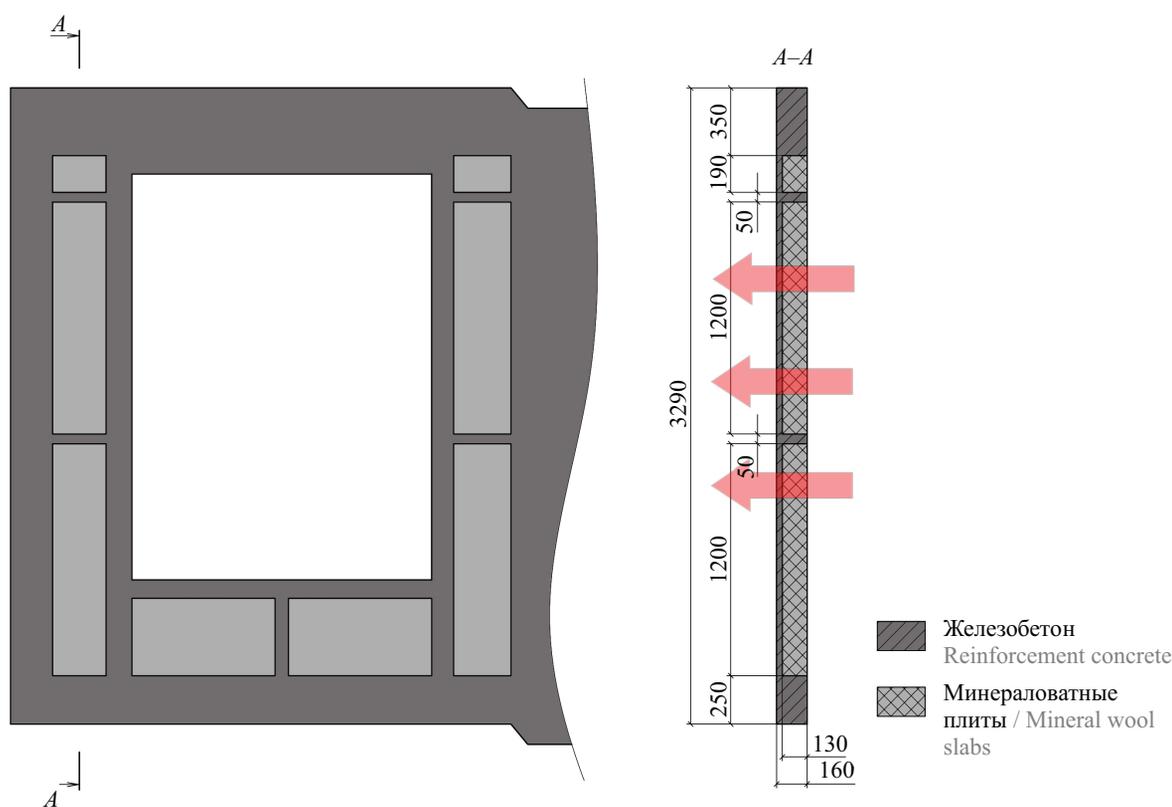


Рис. 1. Конструкция двухслойной стеновой панели

Fig. 1. Two-layer wall panel design

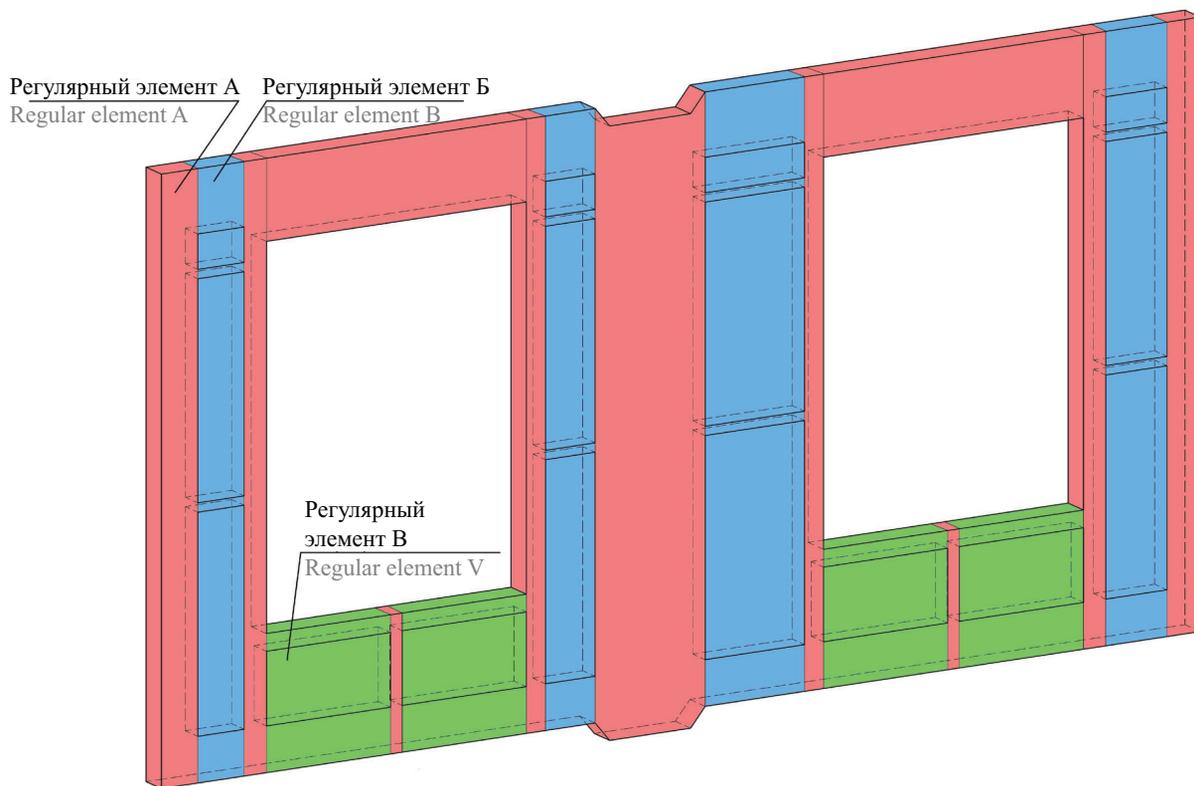


Рис. 2. Схема разбивки двухслойной стеновой панели на регулярные элементы

Fig. 2. Scheme of dividing a two-layer wall panel into regular elements

вания стала сборная железобетонная стеновая панель для жилого здания.

Условная величина сопротивления теплопередаче многослойной конструкции ограждения R_0 в наиболее общем случае:

$$R_0 = 1/\alpha_{в} + R_1 + R_2 + R_{вн} + \dots + R_i + 1/\alpha_{н}, \quad (1)$$

где $\alpha_{в}$, $\alpha_{н}$ — коэффициенты теплоотдачи соответственно внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C); $1/\alpha_{в} = R_{в}$, $1/\alpha_{н} = R_{н}$ — сопротивление теплопередаче соответственно внутренней и наружной поверхности ограждения; R_1, R_2, \dots, R_i — термическое сопротивление отдельного i -го слоя ограждающей конструкции, м²·°C/Вт, определяемое как:

$$R_i = \delta_i / \lambda_i,$$

где δ_i — толщина i -го слоя конструкции, м; λ_i — расчетный коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции, Вт/(м·°C); $R_{вн}$ — термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки¹, м²·°C/Вт.

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, в которых материал неоднороден как в параллельном, так и в перпендикулярном к тепловому потоку направлениях, устанавливается следующей последовательностью [10]:

- плоскостями, параллельными направлению теплового потока, ограждающая конструкция разделяется на характерные в теплотехническом отношении участки, состоящие из одного или нескольких

слоев. Определяется термическое сопротивление теплопередаче $R_{пар}$:

$$R_{пар} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \dots + \frac{A_n}{R_n}}, \quad (2)$$

где A_1, A_2, \dots, A_n — площади отдельных участков по поверхности ограждающей конструкции при разбиении ее плоскостями, параллельными тепловому потоку, м²; R_1, R_2, \dots, R_n — термическое сопротивление отдельных участков ограждающей конструкции, но без сопротивления теплоотдаче $R_{н}, R_{в}$, м²·°C/Вт;

- плоскостями, перпендикулярными к направлению теплового потока, ограждающая конструкция разделяется на однородные и разнородные слои. Термическое сопротивление однородных слоев вычисляется по формуле (1) без учета сопротивления теплоотдаче $R_{н}, R_{в}$, неоднородных — по формуле (2). Термическое сопротивление $R_{пер}$ устанавливается как сумма термических сопротивлений однородных и неоднородных слоев;

- окончательно действительное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется как:

$$R = \frac{R_{пар} + 2 \cdot R_{пер}}{3}. \quad (3)$$

Термическое сопротивление ограждающих конструкций, у которых $R_{пар}$ более чем на 25 % пре-

вышает $R_{пер}$, определяют расчетом их температурных полей.

Результаты расчета сопротивления теплопередаче регулярных элементов стеновой панели, определенных инженерно-аналитическим способом [10], представлены в табл. 1.

Окончательно определяется эквивалентное значение сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели:

$$R_{эк} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (4)$$

Проведенный анализ по установлению аналитическим способом сопротивления теплопередаче рассматриваемой двухслойной стеновой панели показал, что сопротивление теплопередаче двухслойной стеновой панели (без учета наружного утеплителя) составляет $R_{эк} = 0,39 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, а требуемое сопротивление теплопередаче конструкции наружной стены — $R_{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Следовательно, при уменьшении толщины наружного утеплителя до значения $\delta_{ут} = 0,12 \text{ м}$, $\lambda_{ут} = 0,042 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ будет выполняться требование:

$$R_0^{np1} \geq R_0^{тр}.$$

Неоднородный участок, состоящий из слоя железобетона с заполнителем из минераловатных плит:

$$R_0^{np1} = 0,39 + \frac{0,12}{0,042} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_0^{np1} = 3,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \geq R_0^{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Однородный участок, состоящий из слоя железобетона:

$$R_0^{np2} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,16}{2,04} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,12}{0,042} + \frac{1}{12} = 3,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_0^{np2} = 3,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} \geq R_0^{тр} = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Аналитический расчет термического сопротивления двухслойной стеновой панели с заполнителем из минераловатных плит показал допустимость уменьшения слоя наружного утеплителя стеновой панели до значения $\delta_{ут} = 0,12 \text{ м}$.

С целью проведения анализа теплопроводности двухслойной стеновой панели на предмет уменьшения слоя утеплителя при устройстве фасадного пирога выполнено численное моделирование в ПК COMSOL Multiphysics. Была рассмотрена двух-

Табл. 1. Сопротивление теплопередаче регулярных элементов стеновой панели

Table 1. Heat transfer resistance of regular wall panel elements

Зона стеновой панели с регулярным элементом Wall panel area with a regular element	Площадь стеновой панели с сечением, аналогичным сечению регулярного элемента, м ² The area of a wall panel with a cross section similar to that of a regular element, m ²	Сопротивление теплопередаче R, м ² ·°C/Вт Heat transfer resistance R, m ² ·°C/W
А A	6,58	0,298
Б B	5,09	0,52
В V	2,26	0,37

Табл. 2. Теплотехнические показатели материалов слоев двухслойной стеновой панели

Table 2. Thermal characteristics of the materials of the layers of a two-layer wall panel

Материал слоя Layer material	Плотность материала ρ, кг/м ³ The density of the material ρ, kg/m ³	Теплопроводность λ _в , Вт/м·°C Thermal conductivity λ _в , W/m·°C	Толщина слоя δ, м Layer thickness δ, m	Удельная теплоемкость с, кДж/кг·°C Specific heat capacity c, kJ/kg·°C
Наружный утеплитель из минераловатных плит External insulation made of mineral wool slabs	130	0,042	0,15/0,13/0,12/0,1	0,84
Заполнитель из минераловатных плит Filler made of mineral wool slabs	150	0,046	0,1	0,84
Железобетон Reinforced concrete	2500	2,04	0,03 0,03	0,84
Внутренняя отделка Interior decoration	1800	0,93	0,02	0,88

слойная стеновая панель с наполнителем из минераловатных плит для различных толщин фасадного утеплителя снаружи:

- без наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,0$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,15$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,13$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,12$ м;
- толщина наружного утеплителя $\delta_{ут} = 0,11$ м.

Теплотехнические показатели материалов слоев рассматриваемой двухслойной стеновой панели представлены в табл. 2.

Расчет выполнен для холодного периода года, как наиболее опасный с точки зрения возможности выпадения конденсата в толще наружной ограждающей конструкции. При моделировании процесса теплопередачи задача решена в стационарной трехмерной постановке.

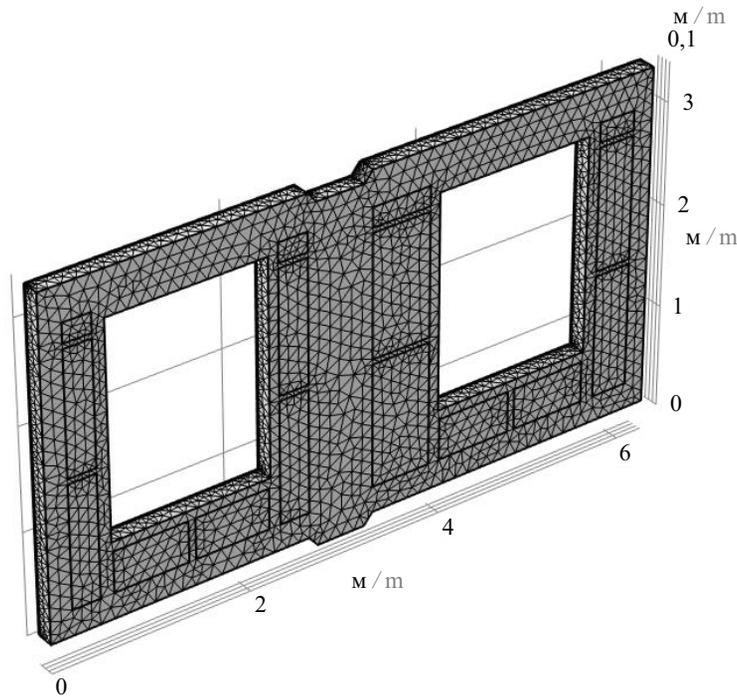


Рис. 3. Конечно-элементная модель расчетной области

Fig. 3. Finite element model of the computational domain

Табл. 3. Климатические условия района строительства

Table 3. Climatic conditions of the construction area

Параметры Parameters	Значение параметров The value of the parameters	Нормативный документ Regulatory document
Район строительства Construction area	Москва Moscow	
Средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 The average temperature of the coldest five-day period with a probability of 0.92	-26 °C	СП 131.13330.2020 SP 131.13330.2020
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период Average outdoor temperature during the heating period	-2,7 °C	
Продолжительность отопительного периода Duration of the heating period	209 суток 209 days	
Влажностный режим помещения Humidity conditions of the room	Нормальный Normal	СП 50.13330.2012 SP 50.13330.2012
Условия эксплуатации ограждающих конструкций Operating conditions of enclosing structures	Б B	
Расчетная температура внутреннего воздуха для жилых помещений Estimated indoor air temperature for residential premises	+20 °C	ГОСТ 30494–2011 GOST 30494–2011

Определены параметры наружного воздуха для условий проектирования и строительства жилого здания в климатическом районе г. Москвы, для которого средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 составляет $t_{\text{н}} = -26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹.

При расчете исследуемая конструкция изображалась в виде трехмерных твердых тел с заданными теплотехническими характеристиками. На поверхностях конструкции задавались граничные условия III рода — расчетная температура наружного и внутреннего воздуха, коэффициенты теплоотдачи: $t_{\text{н}} = -26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\text{н}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Исходная твердотельная 3D-модель стеновой панели выполнена в среде ПК COMSOL Multiphysics. Конечно-элементная модель двухслойной стеновой панели представлена на рис. 3.

Климатические условия района строительства представлены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенной серии численных расчетов при различных вариантах толщины наружного утеплителя получены следующие результаты:

- установлен характер распределения температуры по толщине рассматриваемой конструкции;
- определены минимальные значения температуры на внутренней поверхности стеновой панели для различных вариантов расчета.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 4–8. На рис. 4, 5 показаны температурные поля на внутренней и наружной поверхностях двухслойной стеновой панели для двух вариантов расчета: без наружного утеплителя и с наружным утеплителем толщиной 0,12 м. На данных

рисунках справа представлена температурная шкала t , $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 6 приведены изотермы в плоскости стеновой панели, проходящей через участок с теплоизоляционными включениями из минераловатных плит (регулярный элемент Б). Также на рис. 6 показаны сечения 1 и 2, используемые для анализа характера распределения температур по толщине конструкции.

На рис. 7 представлены графики изменения температуры: по сечению 1 — через слой с теплоизоляционными включениями, по сечению 2 — через однородный участок стеновой панели.

Результаты проведенного численного моделирования в среде ПК COMSOL Multiphysics с различными вариантами толщины наружного утеплителя представлены в табл. 4 и на рис. 8.

Результат расчета показал, что участки стеновой панели без вкладышей из минераловатных плит являются теплопроводными включениями. Температура на внутренней поверхности стены по сечению 1 (слой железобетона с заполнителем из минераловатных плит) составляет $t_{\text{в.пов.сечение 1}} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура на внутренней поверхности стены по сечению 2 (слой железобетона) составляет $t_{\text{в.пов.сечение 2}} = 4,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Так как нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции для жилых зданий не должен превышать $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹, необходимо предусмотреть наружный утеплитель совместно с двухслойными стеновыми панелями.

Данные результатов численного расчета, представленные в табл. 3 и на рис. 8, позволяют исключить возможность применения двухслойной стеновой панели без наружного утеплителя. Для расчетных вариантов с толщиной наружного утеплителя

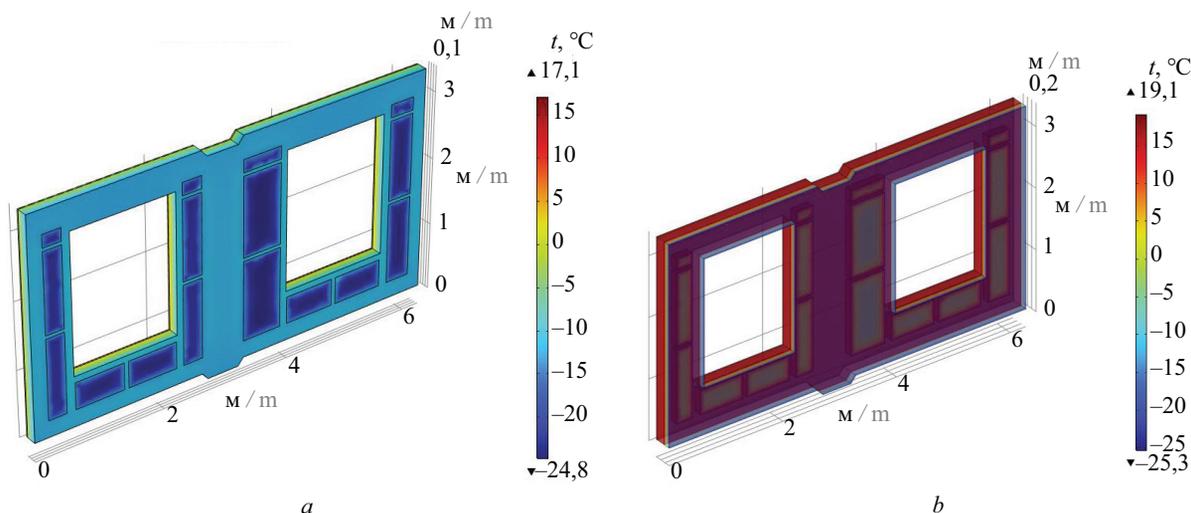


Рис. 4. Температурные поля двухслойной стеновой панели: *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м (вид на наружную поверхность)

Fig. 4. Temperature fields of a two-layer wall panel: *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick (view of the outer surface)

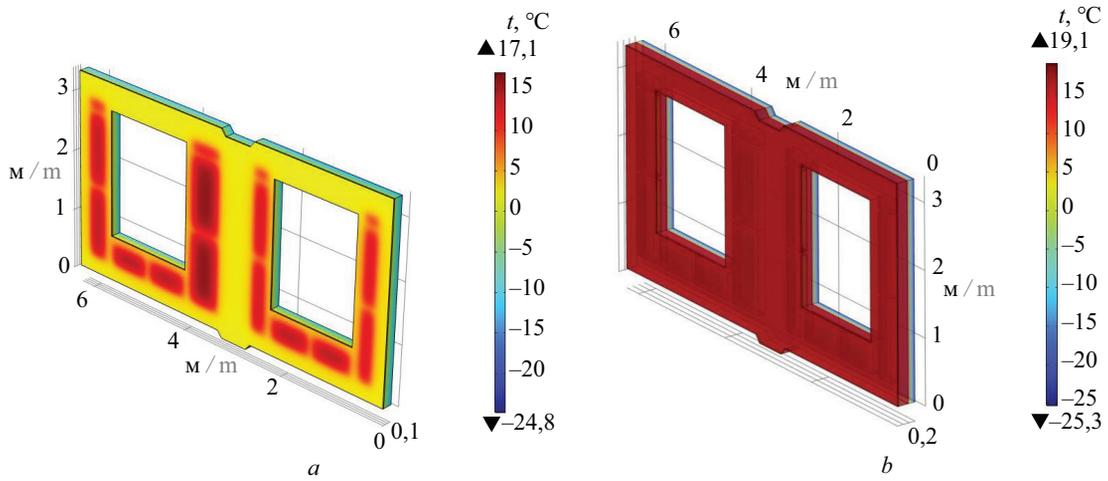


Рис. 5. Температурные поля двухслойной стеновой панели: *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м (вид на внутреннюю поверхность)

Fig. 5. Temperature fields of a two-layer wall panel: *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick (view of the inside surface)

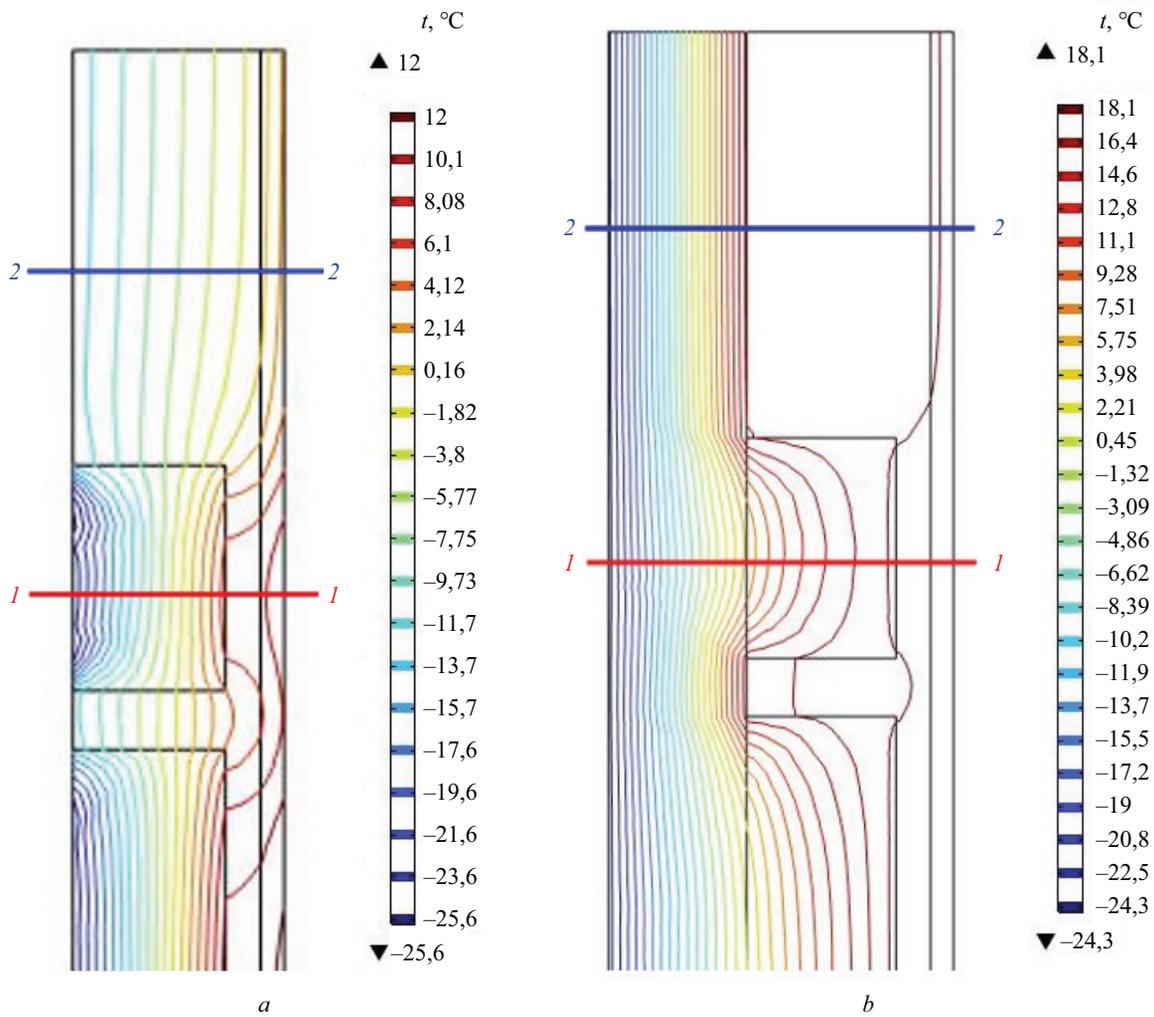


Рис. 6. Изотермы (регулярный элемент Б): *a* — без наружного утеплителя; *b* — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м

Fig. 6. Isotherms (regular element B): *a* — without external insulation; *b* — with external insulation, 0.12 m thick

от $\delta_{\text{ут}} = 0,11$ м до $\delta_{\text{ут}} = 0,15$ м нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности

наружной ограждающей конструкции обеспечивается до $\Delta t = 4$ °С, что допускает применение всех рассмотренных вариантов толщины наружно-

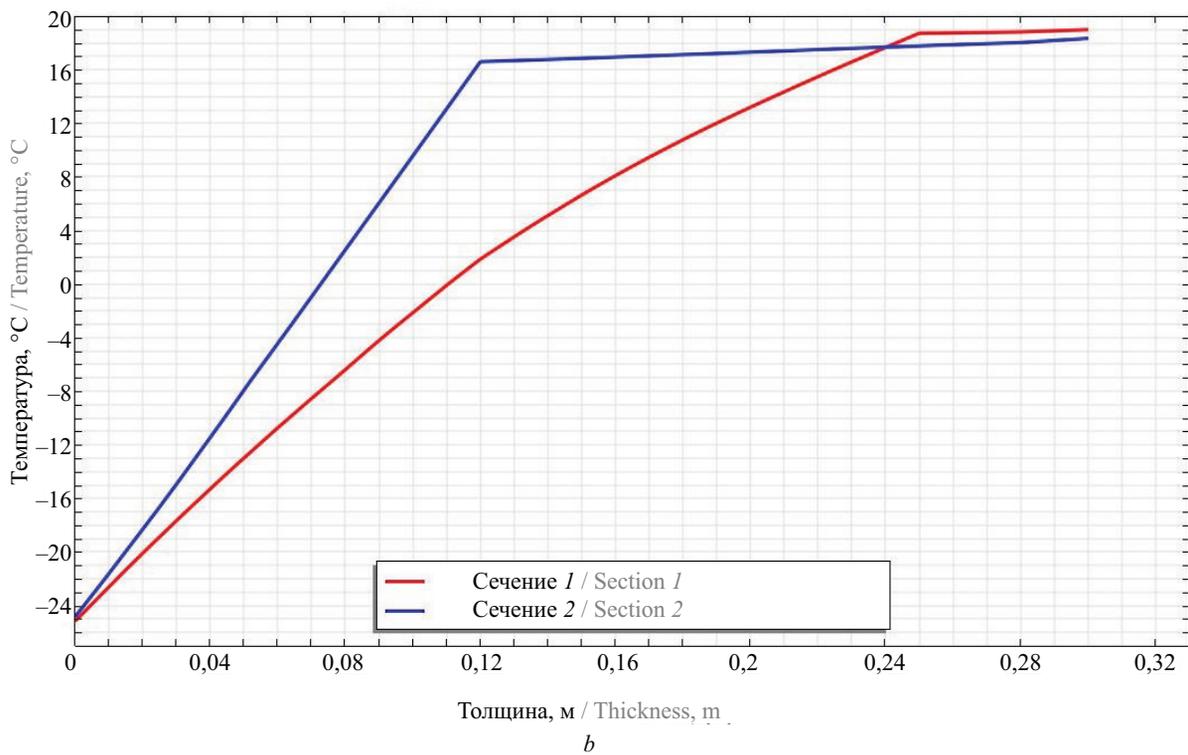
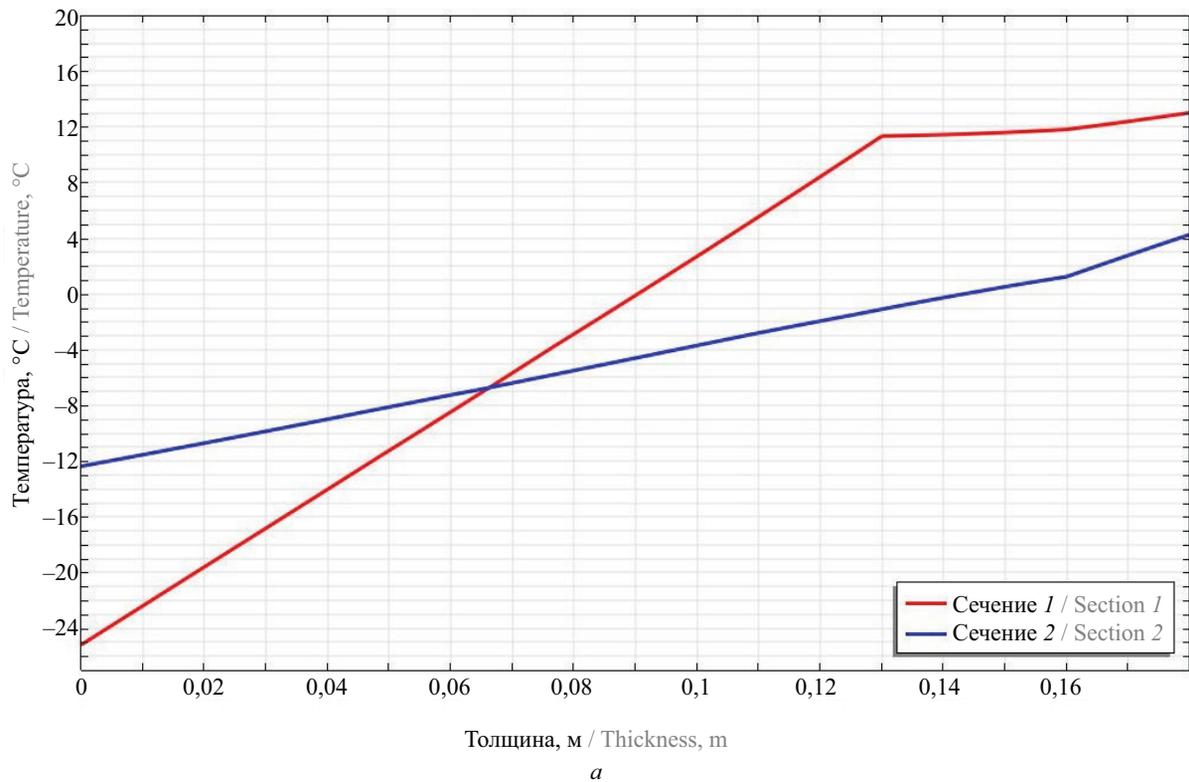


Рис. 7. График изменения температуры по сечениям 1 и 2 двухслойной стеновой панели: а — без наружного утеплителя; б — с наружным утеплителем, толщиной 0,12 м

Fig. 7. Graph of temperature changes across sections 1 and 2 of a two-layer wall panel: a — without external insulation; b — with external insulation, 0.12 m thick

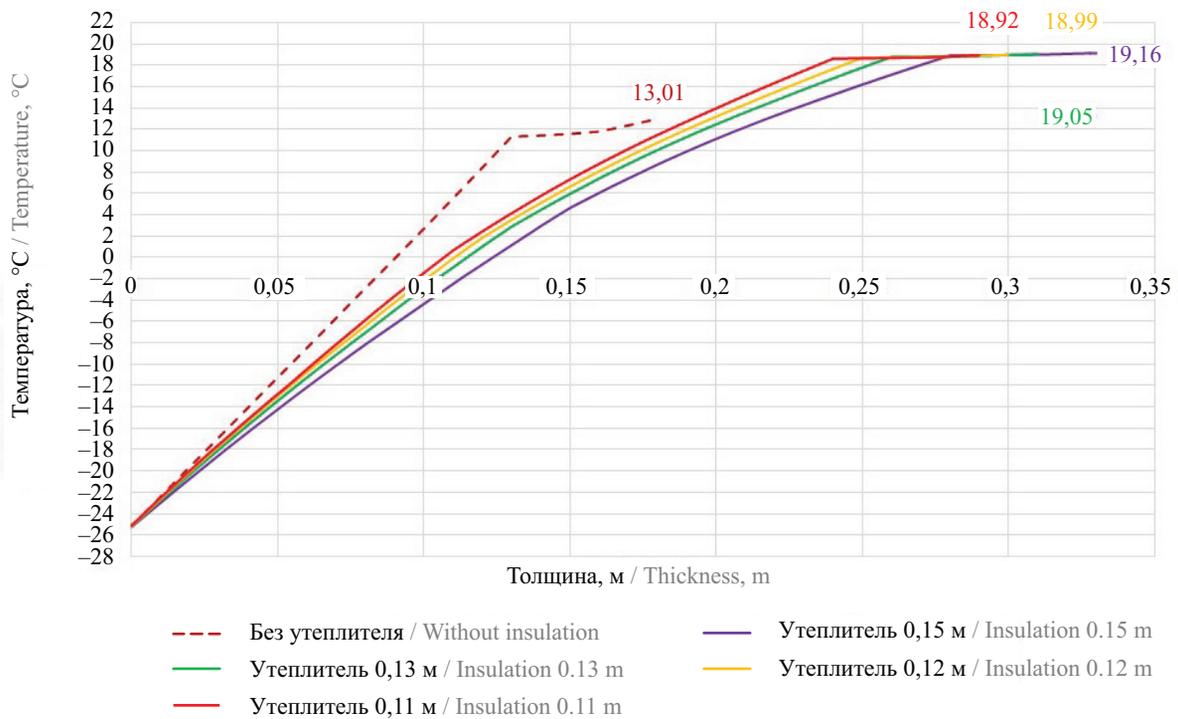


Рис. 8. Распределение температуры по толщине сечения l двухслойной стеновой панели с различными вариантами толщины наружного утеплителя

Fig. 8. Temperature distribution along the thickness of section l of a two-layer wall panel with different thicknesses of external insulation

Табл. 4. Минимальные значения температуры на внутренней поверхности двухслойной стеновой панели при различных вариантах толщины наружного утеплителя в сечениях l и 2

Table 4. Minimum temperature values on the inner surface of a two-layer wall panel for different thicknesses of external insulation in sections l and 2

Вариант расчета Calculation option	$t_{\text{в.пов сечение 1}}^{\circ\text{C}}$ $t_{\text{v.sur section 1}}^{\circ\text{C}}$	$t_{\text{в.пов сечение 2}}^{\circ\text{C}}$ $t_{\text{v.sur section 2}}^{\circ\text{C}}$
Без наружного утеплителя Without external insulation	13	4,26
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,15$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.15$ m	19,15	18,62
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,13$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.13$ m	19,06	18,45
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,12$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.12$ m	18,99	18,33
Наружный утеплитель из минераловатных плит толщиной $\delta_{\text{пл.мн}} = 0,11$ м External insulation made of mineral wool slabs with a thickness of $\delta_{\text{pl.mn}} = 0.11$ m	18,92	18,21

го утеплителя в конструкции фасадной системы с двухслойной стеновой панелью. Анализ расчетов по двум методикам показал, что целесообразная толщина наружного утеплителя составляет $\delta_{\text{ут}} = 0,12$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При инженерном расчете по определению эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели получено, что выполнение требования $R_0^{\text{нр1}} \geq R_0^{\text{тп}}$ обеспечивается

при минимальной величине толщины слоя наружного утеплителя фасадной системы $\delta_{\text{ут}} = 0,12$ м.

Результаты проведенной серии численных расчетов при различных величинах толщины слоя наружного утеплителя (варианты: без наружного утеплителя; толщина наружного утеплителя 0,15 м; толщина наружного утеплителя 0,13 мм; толщина наружного утеплителя 0,12 м; толщина наружного утеплителя 0,11 м) показали, что снижение толщины наружного утеплителя до 0,12 м достаточно для обеспечения нормируемых параметров темпе-

ратур на внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции (рассматриваемой стеновой панели).

Результующую величину толщины утеплителя наружного слоя стеновой панели по результатам инженерно-аналитического и численного расчетов для стеновой панели жилого здания с представленными в работе характеристиками, проектируемого в климатическом районе г. Москвы, рекомендуется принять не менее 0,12 м.

На основании исследования можно сделать следующие выводы:

- фактические величины сопротивления теплопередаче, в том числе распределение температур в толще рассматриваемых конструкций, определены для стационарного режима;
- анализ численного расчета в ПК COMSOL Multiphysics подтверждает результаты, полученные в ходе проведенного инженерно-аналитического расчета;
- теплопроводные включения на участках стеновой панели без вкладышей из минераловатных плит оказывают влияние на снижение температуры на внутренней поверхности стеновых панелей;
- результаты выполненного инженерно-аналитического расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели,

а также численного моделирования в ПК COMSOL Multiphysics позволяют получить уточненную величину сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели и способствуют определению минимальной толщины слоя наружного утеплителя в зависимости от климатического района проектирования и строительства жилого здания;

- применение заполнителей из минераловатных плит в конструкции двухслойных стеновых панелей увеличивает эквивалентное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции;
- приведен пример расчета эквивалентного сопротивления теплопередаче двухслойной стеновой панели заданных размеров по предлагаемой в статье методике, позволяющий более точно определить минимальную толщину слоя наружного утеплителя для конкретного климатического региона проектирования и строительства жилого здания;
- предлагаемая методика расчета позволяет существенно снизить затраты на единицу площади стеновой панели при организации утепления фасада жилого здания;
- для подтверждения результатов аналитических расчетов и численных исследований требуется обязательная верификация физической модели объекта исследования в климатической камере специализированной лаборатории.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмина Т.К., Аветисян Р.Т., Мирзаханова А.Т. Особенности строительства зданий из крупногабаритных модулей (часть 1) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 95–101. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-95-102. EDN RISDVD.
2. Shi Y., Zhang Y., Ni K., Liu W., Luo Y. Research and practices of large composite external wall panels for energy saving prefabricated buildings // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 289. P. 10012. DOI: 10.1051/mateconf/201928910012
3. Chen Z., Jiang L., Xiao M., Hu Y., Huang S. Rapid construction of modular buildings for emergencies: a case study from Hong Kong, China // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering. 2023. Vol. 176. Issue 2. Pp. 65–72. DOI: 10.1680/jcien.22.00172
4. Смолий В.А., Косарев А.С., Яценко Е.А. Эффективность применения энергосберегающих трехслойных панелей для жилых и общественных объектов каркасно-панельного домостроения // Центральный научный вестник. 2018. Т. 3. № 15–16 (56–57). С. 47–50. EDN XYOFLV.
5. Семикин П.В., Должиков В.Н. Эффективные энергосберегающие стеновые панели // Творче-

- ство и современность. 2016. № 1 (1). С. 65–76. EDN YURSCX.
6. Khaleghi H., Karatas A. Arctic architectures: unleashing energy efficiency and resilience in extreme cold regions // Proceedings of International Structural Engineering and Construction. 2023. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.14455/ISEC.2023.10(1).SUS-24
7. Матвеев А.В., Овчинников А.А. Разработка энергоэффективных крупнопанельных ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 19–23. EDN STWXOX.
8. Назиров Р.А., Белов Т.В. Влияние сопротивления теплопередаче утеплителя на распределение температурных полей в стеновых ограждениях с навесными вентилируемыми фасадами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 2. С. 207–213. EDN SBYPBF.
9. Давидюк А.А. Оценка влияния теплопроводных включений на приведенное сопротивление теплопередаче наружных многослойных стен на основе легких бетонов на стекловидных заполнителях // Жилищное строительство. 2014. № 7. С. 24–27. EDN SHORXZ.
10. Щекин Р.В., Корневский С.М., Бем Г.Е. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга

вторая. Вентиляция и кондиционирование воздуха. 4-е изд., перераб. и доп. Киев : Будівельник, 1976. 416 с.

11. Пастушков П.П., Гагарин В.Г., Павленко Н.В. Методическое пособие по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. М. : ФАУ «ФЦС», 2019.

12. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 57–64. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63. EDN SDSOJK.

13. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 28–31. EDN YUNG SX.

14. Самарин О.Д., Полякова М.З. Зависимость теплотехнической однородности наружных стен жилых зданий от их геометрических характеристик и климатических параметров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 3 (219). С. 52–54. EDN KJAEYL.

15. Grünbauer H.J.M., Bicerano J., Clavel P., Daussin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J. et al. Rigid Polyurethane Foams // Polymeric Foams. 2004. DOI: 10.1201/9780203506141.ch7

16. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергооберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 7–9. EDN QIOMJZ.

17. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions — Properties, requirements and possibilities // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 10. Pp. 2549–2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015

18. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Влияние климатических особенностей района строительства на экономически выгодный уровень тепловой защиты офисных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 11 (743). С. 89–99. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-743-11-89-99. EDN LSCNCN.

19. Дацюк Т.А., Гримитлин А.М., Анисимов С.М., Цыганков А.В. Трансмиссионные и инфильтрационные теплотери жилых зданий // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 115–120. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120. EDN FAMYON.

20. Xing D., Li N. Three-dimensional heat transfer of globe thermometers in indoor environments controlled by radiant systems // Building and Environment. 2021. Vol. 188. P. 107505. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107505

21. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2019. № 4 (208). С. 74–79. EDN SOJABE.

Поступила в редакцию 7 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2024 г.

Одобрена для публикации 22 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Самвел Володяевич Саргсян — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция» (НОЦ «ТГВ»); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru;

Вера Валерьевна Агафонова — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 532445, Scopus: 57204528191, ORCID: 0000-0001-5839-0556; agafonovavv@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Саргсян С.В. — научное руководство, обзор современного состояния вопроса, концепция исследования, разработка программы исследований и ее реализация, написание исходного текста, итоговые выводы.

Агафонова В.В. — обзор современного состояния вопроса, участие в разработке программы исследований и реализация, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuzmina T.K., Avetisyan R.T., Mirzakhanova A.T. Features of the construction of buildings from large-sized modules. *Proceedings of the TSU*. 2022; 5:95-101. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-5-95-102. EDN RISDVD. (rus.).
2. Shi Y., Zhang Y., Ni K., Liu W., Luo Y. Research and practices of large composite external wall panels for energy saving prefabricated buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:10012. DOI: 10.1051/mateconf/201928910012
3. Chen Z., Jiang L., Xiao M., Hu Y., Huang S. Rapid construction of modular buildings for emergencies: a case study from Hong Kong, China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Civil Engineering*. 2023; 176(2):65-72. DOI: 10.1680/jci.22.00172
4. Smoliy V.A., Kosarev A.S., Yatsenko E.A. Efficiency of using energy-saving three-layer panels for residential and public frame-panel housing construction. *Central Scientific Bulletin*. 2018; 3(15-16):(56-57):47-50. EDN XYOFLV. (rus.).
5. Semikin P.V., Dolzhikov V.N. Efficient energy-saving wall panels. *Creativity and Modernity*. 2016; 1(1):65-76. EDN YURSCX. (rus.).
6. Khaleghi H., Karatas A. Arctic architectures: unleashing energy efficiency and resilience in extreme cold regions. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. 2023; 10(1). DOI: 10.14455/ISEC.2023.10(1).SUS-24
7. Matveev A.V., Ovchinnikov A.A. Development of energy-efficient large-panel enclosing structures. *Housing Construction*. 2014; 10:19-23. EDN STWXOX. (rus.).
8. Nazirov R.A., Belov T.V. Influence resistance heat insulant distribution of temperature fields in wall fences ventilated facades. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014; 7(2):207-213. EDN SBYPBF. (rus.).
9. Davidyuk A.A. Assessment of the influence of heat-conducting inclusions on the reduced heat transfer resistance of external multilayer walls based on lightweight concrete with glassy fillers. *Housing Construction*. 2014; 7:24-27. EDN SHORXZ. (rus.).
10. Shchekin R.V., Korenevsky S.M., Bem G.E. *Handbook of heat supply and ventilation. Book two. Ventilation and air conditioning. 4th ed., revised and additional*. Kyiv, Budivel'nik, 1976; 416. (rus.).
11. Pastushkov P.P., Gagarin V.G., Pavlenko N.V. *Methodological manual for assigning calculated thermal performance indicators of building materials and products*. Moscow, FAU "FCS", 2019. (rus.).
12. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Construction Materials*. 2019; 4:57-64. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63. EDN SDSOJK. (rus.).
13. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Changes in the time of thermal conductivity of gas-filled polymer thermal insulation materials. *Construction Materials*. 2017; 6:28-31. EDN YUNGXS. (rus.).
14. Samarin O.D., Polyakova M.Z. Dependence of thermal uniformity of external walls of residential buildings on their geometric characteristics and climatic parameters. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2020; 3(219):52-54. EDN KJAEYL. (rus.).
15. Grünbauer H.J. M., Bicerano J., Clavel P., Dausin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J. et al. Rigid Polyurethane Foams. *Polymeric Foams*. 2004. DOI: 10.1201/9780203506141.ch7
16. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Quantitative assessment of the energy efficiency of energy-saving measures. *Construction Materials*. 2013; 6:7-9. EDN QIOMJZ. (rus.).
17. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions — Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011; 43(10):2549-2563. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015
18. Malyavina E.G., Frolova A.A. The influence climate features of the construction area on the economically favorable level thermal protection in office buildings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 11(743):89-99. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-743-11-89-99. EDN LSCNCN. (rus.).
19. Datciuk T.A., Grititlin A.M., Anisimov S.M., Tsygankov A.V. Transmission and infiltration heat losses of residential buildings. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 6(89):115-120. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-115-120. EDN FAMYON. (rus.).
20. Xing D., Li N. Three-dimensional heat transfer of globe thermometers in indoor environments controlled by radiant systems. *Building and Environment*. 2021; 188:107505. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107505
21. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. Modeling in COMSOL Multiphysics energy losses of housing and communal services structures depending on operating conditions. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2019; 4(208):74-79. EDN SOJABE. (rus.).

Received January 7, 2024.

Adopted in revised form on January 12, 2024.

Approved for publication on January 22, 2024.

BIODOTES: Samvel V. Sargsyan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru;

Vera V. Agafonova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 532445, Scopus: 57204528191, ORCID: 0000-0001-5839-0556; agafonovavv@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Samvel V. Sargsyan — scientific guidance, review of the current state of the issue, research concept, development of a research program and its implementation, writing the source text, final conclusions.

Vera V. Agafonova — review of the current state of the issue, participation in the development of the research program and implementation, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.