

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.022.32

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83

Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий

Ольга Александровна Туснина, Валентина Матвеевна Туснина*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проектная документация на строительство капитального объекта включает раздел, в котором обосновывается энергетическая эффективность проектируемого здания, подтверждаемая соответствием теплотехнических показателей нормам, установленным на территории России. Одним из таких теплотехнических показателей является сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций здания, характеризующее их тепловую эффективность. Нормативная методика определения этого показателя, основанная на результатах теплотехнического расчета двухмерного теплового поля, не позволяет корректно оценить тепловую эффективность конструкции, так как не позволяет учесть все проблемные места по потерям тепла из здания, имеющие место в неоднородных ограждающих конструкциях и в их узловых сопряжениях.

Материалы и методы. Рассмотрено конструктивное решение фасадной системы монолитного жилого здания с поджиями, спроектированного для строительства в г. Москве. Наружные стены выполнены из монолитного железобетона и газобетонных блоков с применением навесной вентилируемой фасадной системы. Оценка тепловой эффективности исследуемого ограждения здания проводилась на основе теплотехнического расчета трехмерного температурного поля с использованием вычислительного комплекса TEPL.

Результаты. Приведены результаты анализа распределения температур на поверхностях теплообмена, которые позволили установить зоны излишних тепловых потерь в исследуемых конструкциях. Предложены варианты дополнительного утепления конструкций здания. С помощью программного комплекса TEPL вычислены величины приведенного сопротивления теплопередаче исследуемых ограждающих конструкций, позволившие достоверно оценить тепловую эффективность проектного конструктивного решения наружного ограждения (до утепления) и утепленных конструкций.

Выводы. Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждающих конструкций следует производить на основе численного расчета трехмерного температурного поля, позволяющего не только точно определить величину приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, но и выявить все имеющиеся в конструкции «мостики холода» для их устранения в конструктивном решении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ограждающие конструкции, тепловая эффективность, сопротивление теплопередаче, температурное поле, тепловые потери, численный метод теплотехнического расчета

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснина О.А., Туснина В.М. Оценка тепловой эффективности наружных вертикальных ограждений зданий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 67–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Туснина, TusninaOA@mgsu.ru.

Assessment of the thermal efficiency of external vertical building enclosures

Olga A. Tusnina, Valentina M. Tusnina*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The project documentation for the construction of a permanent structure contains a section justifying the building's energy efficiency. This justification is based on the compliance of its thermal performance parameters with the norms in force in Russia. A key parameter is the thermal of the external building envelope, which serves as a measure of its thermal effectiveness. However, the normative calculation method for this parameter, which relies on a two-dimensional heat transfer analysis, is inadequate for accurately evaluating true thermal performance. Its primary shortcoming is the inability to model all critical heat loss areas — specifically, thermal bridges present in non-uniform envelope assemblies and at structural junctions.

Materials and methods. The paper presents an analysis of the facade system design implemented in a monolithic residential building with balconies, intended for construction in Moscow. The exterior walls are constructed from monolithic reinforced concrete and autoclaved aerated concrete blocks within a ventilated facade system. Thermal performance was assessed via 3D heat transfer modelling using TEPL software.

Results. The analysis of temperature distribution on surfaces has identified specific areas of excessive heat loss within the structures. Corresponding measures for additional insulation have been developed. Calculations performed with the TEPL software package determined the design thermal resistance of the building envelope assemblies. These results provide a verified assessment of the thermal efficiency for both the original design and the proposed insulated solutions.

Conclusions. The findings advocate for a paradigm shift in practice, proposing that the thermal evaluation of external vertical enclosures should be based on 3D numerical modelling. Such an analysis provides a reliable value for the equivalent thermal resistance and, crucially, maps all thermal bridges, informing necessary design corrections to mitigate them.

KEYWORDS: enclosing structures, thermal efficiency, thermal resistance, temperature field, heat loss, numerical heat transfer analysis method

FOR CITATION: Tushina O.A., Tushina V.M. Assessment of the thermal efficiency of external vertical building enclosures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):67-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.67-83 (rus.).

Corresponding author: Olga A. Tushina, TushinaOA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Наружные вертикальные ограждения современных зданий, формирующие их фасады, являются многослойными, неоднородными по материалу, конструктивными системами. При оценке тепловой эффективности таких ограждений ввиду многообразия их конструкций и узловых сопряжений с несущими конструктивными элементами зданий проектировщикам для каждого конкретного проектного решения необходимо выполнять теплотехнический расчет. Однако, как показывает сегодня практика проектирования и строительства зданий, корректно оценить тепловую эффективность сложных фасадных систем с теплопроводными включениями с использованием методических рекомендаций нормативных документов^{1, 2} невозможно. В теплотехническом расчете по нормативной методике, основанном на представлении фрагмента теплозащитной оболочки здания, состоящей из независимых элементов, которые влияют на тепловые потери, удельные потери теплоты, происходящие через линейную теплотехническую неоднородность, определяются по результатам расчета двухмерного температурного поля ограждающей конструкции. Приведенное сопротивление теплопередаче ограждения, полученное в результате такого расчета, ведет к значительным погрешностям в оценке тепловой эффективности многослойных неоднородных ограждений, так как не позволяет учесть влияние локальных теплопроводных включений, имеющих место в этих конструкциях.

Оценку тепловой эффективности сложных фасадных систем с теплопроводными включениями следует производить на основе численных расчетов трехмерных температурных полей с применением компьютерного моделирования. Такая методика теплотехнического расчета [1–3], в отличие от упрощенных нормативных методов, предостав-

ляет возможность не только выполнить корректный теплотехнический расчет, выявив все проблемные места по потерям тепла из здания, но и дать предложения по их устранению [4–6].

Численный метод теплотехнического расчета трехмерного температурного поля ограждения позволяет увидеть распределение температуры в конструкции на поверхностях теплообмена и установить зоны излишних тепловых потерь в ограждении, что особенно важно для многослойных конструкций наружных стен зданий, имеющих балконы, лоджии, эркеры, террасы и другие подобные помещения. Сравнительный анализ численного расчета с экспериментом в исследованиях тепловой эффективности наружных стен здания с окнами, проведенных в НИУ МГСУ [4], продемонстрировал качественную сходимость их результатов. При этом численный расчет выявил возможность снижения потерь тепла из здания на 28 % за счет утепления откосов окон. Это дало возможность почти в два раза повысить приведенное сопротивление теплопередаче стены, исключить образование конденсата на внутренней поверхности и тем самым повысить ее эксплуатационную надежность.

Корректность оценки тепловой эффективности ограждающих конструкций зданий с использованием численных методов теплотехнического расчета подтверждена многочисленными исследованиями. Авторы работы [5], разработавшие расчетную модель визуального программирования для проектирования зданий, определили эффективность численного расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Созданию энергетических трехмерных моделей зданий на основе компьютерного моделирования посвящены публикации [6, 7]. В трудах [8, 9] представлены результаты численного анализа повышения тепловой защиты здания с пассивным солнечным теплоснабжением за счет интеграции элементов активных солнечных батарей в поглощающий слой аккумулирующей ограждающей конструкции. Исследования тепловой эффективности навесной фасадной системы [10] наглядно продемонстрировали корректность результатов численного расчета конструкции, что было подтверждено данными эксперимента. Численные исследования тепловой эффективности ограж-

¹ СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. М. : Минстрой России, 2024.

² СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. М. : Минстрой России, 2015.

дающих конструкций [11] позволили выбрать наиболее оптимальные конструктивные решения наружных стен для реконструкции зданий. В статье [12] приводятся результаты численного расчета температурного поля фрагмента стеновой панели с металлическим каркасом методом конечных элементов (МКЭ). Эффективность теплотехнических расчетов трехмерных температурных полей в оценке теплотехнических свойств неоднородных конструкций ограждений подтверждают исследования, приведенные в работе [13]. Результаты численных исследований влияния геометрической формы фасадов с двойной обшивкой на теплообмен в высотных зданиях изложены в статье [14], в которой рассматриваются две модели фасадной системы — с плоскими и криволинейными поверхностями наружных стен. Численному анализу влияния тепловых мостов на сопротивление теплопередаче наружных стен посвящена публикация [15], в которой подчеркивается, что на этапе проектирования здания это влияние не следует игнорировать, так как потери тепла через эти конструктивные элементы могут быть существенными и увеличивать эксплуатационные расходы на потребление энергии. В работе [16] приведены результаты численных исследований тепловой эффективности композитных конструкций стен с воздушным зазором на основе разработанного авторами расчетного модуля с использованием MATLAB.

Вопросам точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей посвящена работа [17]. Автором анализируются особенности расчетов температурных полей. Оценка допустимых погрешностей при расчетах температурных полей приводится для конечно-разностного метода. Отмечены примеры завышения точности в нормативных документах, которые могут давать неверные результаты в оценке тепловой эффективности ограждающих конструкций здания при их проектировании. Повышению точности численных теплотехнических расчетов на основе метода конечных элементов посвящена работа [18], в которой рассма-

триваются вопросы, связанные с оценкой погрешности, вызванной дискретизацией конструкций, и предлагаются методы повышения точности результатов.

Цель настоящего исследования — оценка тепловой эффективности неоднородной конструкции наружной стены монолитного здания с лоджиями на основе теплотехнического расчета трехмерного температурного поля с использованием вычислительного комплекса (ВК) TEPL [2].

Задачи исследования:

- разработка расчетной модели исследуемой конструкции;
- численный расчет трехмерного стационарного температурного поля для рассматриваемой конструкции;
- анализ картин распределения температуры в конструкциях;
- определение приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен на основе результатов расчета трехмерного температурного поля;
- сравнительный анализ оценки тепловой эффективности конструкции стены по результатам численного расчета и расчета по нормативной методике, выполненного специалистами в расчетном обосновании энергетической эффективности проектируемого здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовалась конструкция неоднородной наружной стены монолитного жилого здания с лоджиями, спроектированного для строительства в г. Москве. Конструктивное решение стены, выполненной из газобетонных блоков с применением вентилируемой фасадной системы, изображено на рис. 1.

Теплотехнический расчет выполнен с помощью ВК TEPL [2], предназначенного для расчета трехмерных температурных полей, который позволяет определить температуру на внутренней поверхности ограждения с учетом особенностей его конструктивного решения. В данном программном комплексе

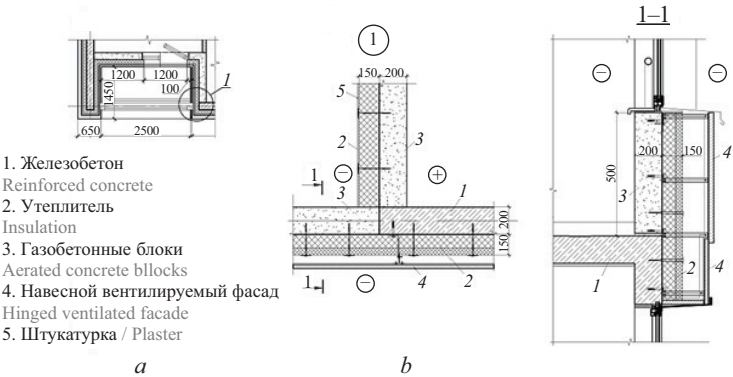


Рис. 1. Конструктивное решение наружной стены: а — фрагмент плана здания в месте расположения лоджии; б — конструкции узлов

Fig. 1. Structural design of the exterior wall: а — fragment of the building plan at the location of the balcony; б — details of the junctions

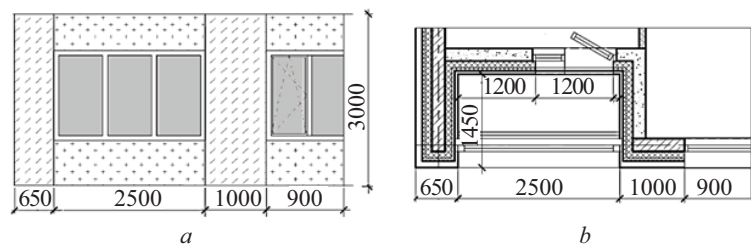
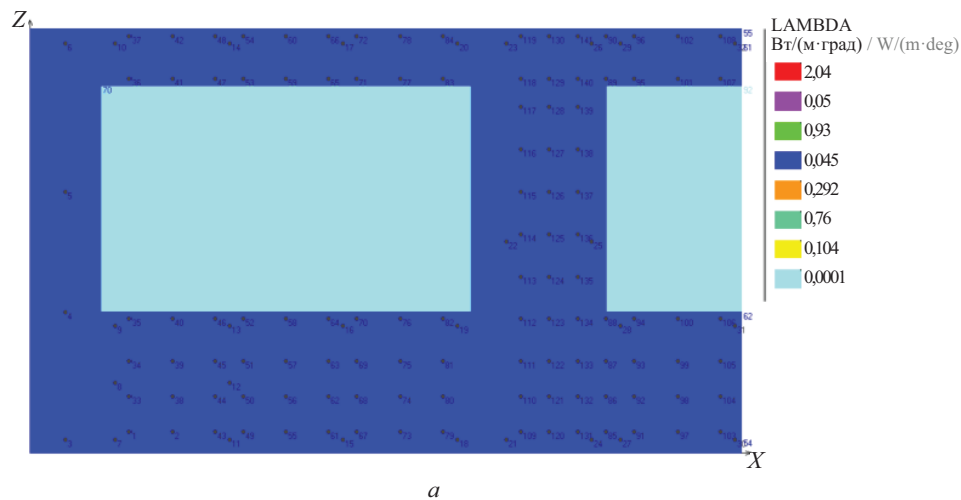


Рис. 2. Рассматриваемый участок конструкции, включенный в расчетную модель: *a* — вид на фасаде; *b* — вид на плане
Fig. 2. The analyzed structural segment incorporated into the calculation model: *a* — facade view; *b* — plan view

Табл. 1. Расчетные теплотехнические показатели строительных материалов конструкций
Table 1. Design thermal properties of construction materials

Материал Material	Теплопроводность λ , Вт/(м ² ·°C) Thermal conductivity λ , W/(m ² ·°C)	Цветовая маркировка материалов в расчетной схеме Colour marking of materials in the calculation scheme
Железобетонные стены и плиты перекрытия Reinforced concrete walls and floor slabs	2,04	
Кладка из газобетонных блоков D600 Masonry from D600 aerated concrete blocks	0,292	
Утеплитель Rockwool Венти Баттс Rockwool Venti Batts insulation	0,045	
Утепляющие вкладыши в плите перекрытия Insulating inserts in the floor slab	0,05	
Окна и балконная дверь ($R_o = 0,58$ (м ² ·°C)/Вт) Windows and balcony door ($R_o = 0.58$ (m ² ·°C)/W)	$\lambda = \frac{\delta}{R_o} = \frac{0,06}{0,58} = 0,104$	
Штукатурная клеевая смесь СТ190 ($\delta = 10$ мм) Plaster adhesive mixture ST190 ($\delta = 10$ mm)	0,93	
Витражное остекление лоджии ($\delta = 6$ мм) Stained glass glazing for a loggia ($\delta = 6$ mm)	0,76	
Воздух Air	0,0001	



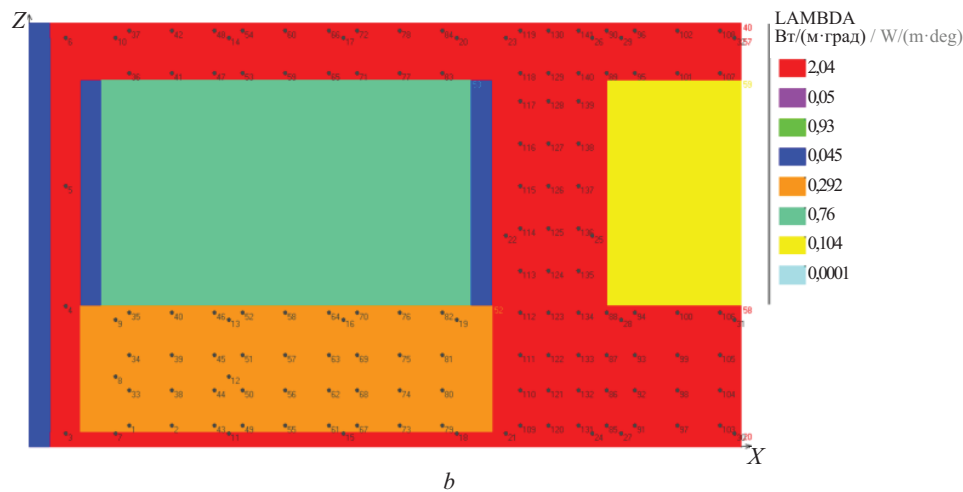


Рис. 3. Расчетная схема. Вид на наружную грань продольной наружной стены: *a* — по утеплителю; *b* — под утеплителем

Fig. 3. Calculation model. Outer surface of the longitudinal external wall: *a* — over the insulation layer; *b* — beneath the insulation layer

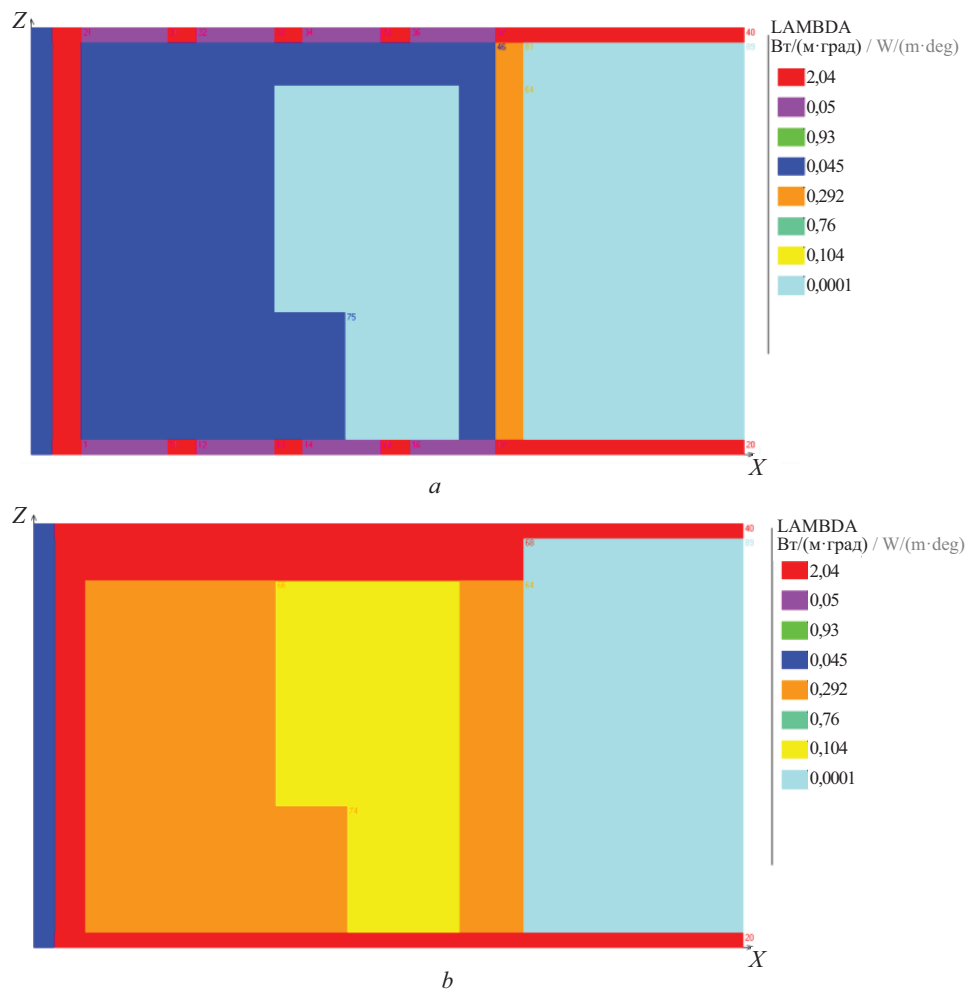


Рис. 4. Расчетная схема. Вид на наружную грань продольной стены лоджии: *a* — по утеплителю; *b* — под утеплителем

Fig. 4. Calculation model. External face of the balcony’s longitudinal wall: *a* — over the insulation layer; *b* — beneath the insulation layer

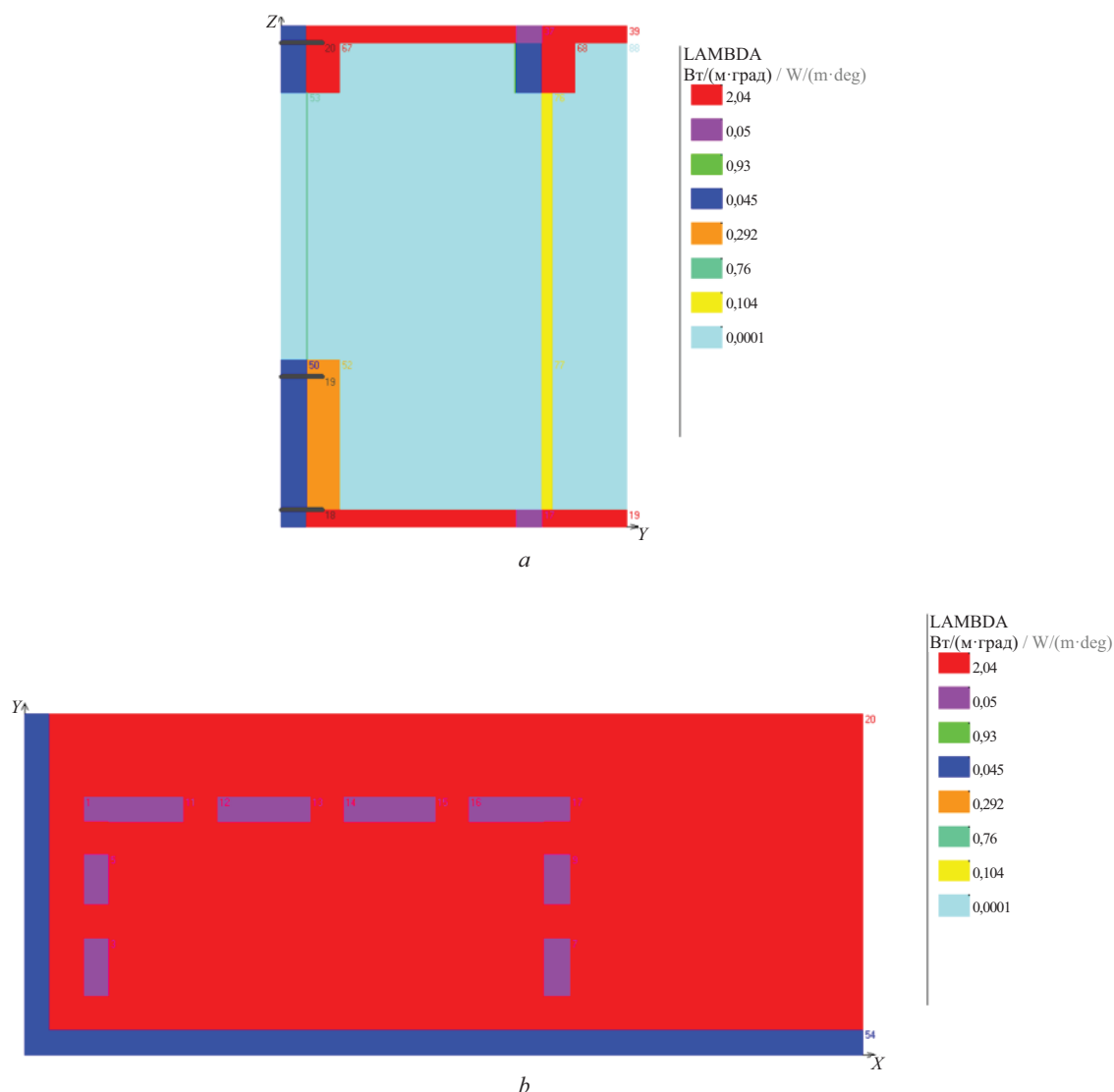


Рис. 5. Расчетная схема: *a* — поперечный разрез по балконной двери; *b* — горизонтальное сечение в пределах толщины плиты перекрытия

Fig. 5. Calculation model: *a* — cross-section through the balcony door; *b* — horizontal section within the thickness of the floor slab

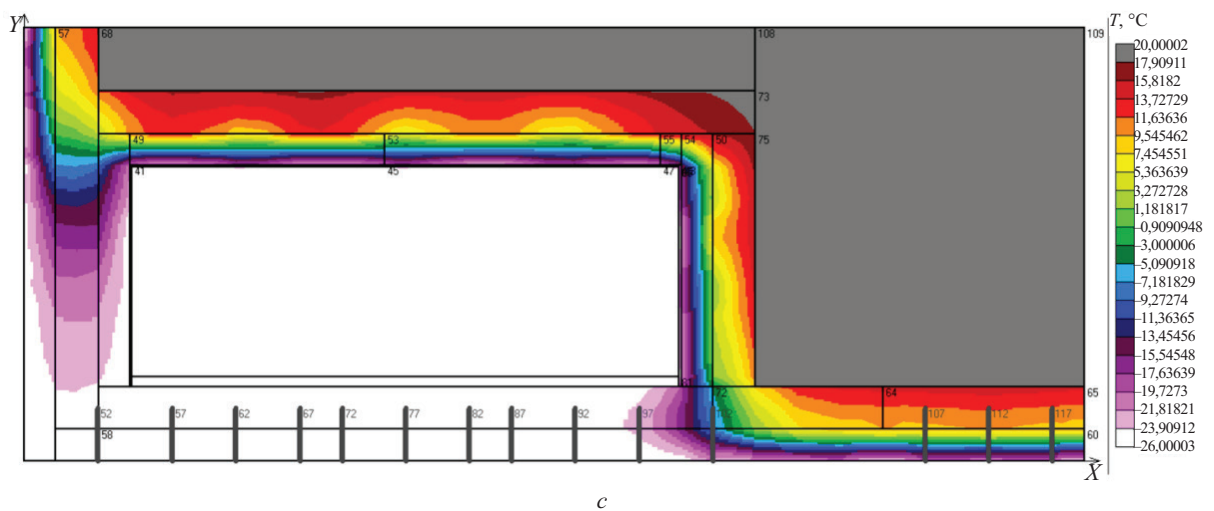
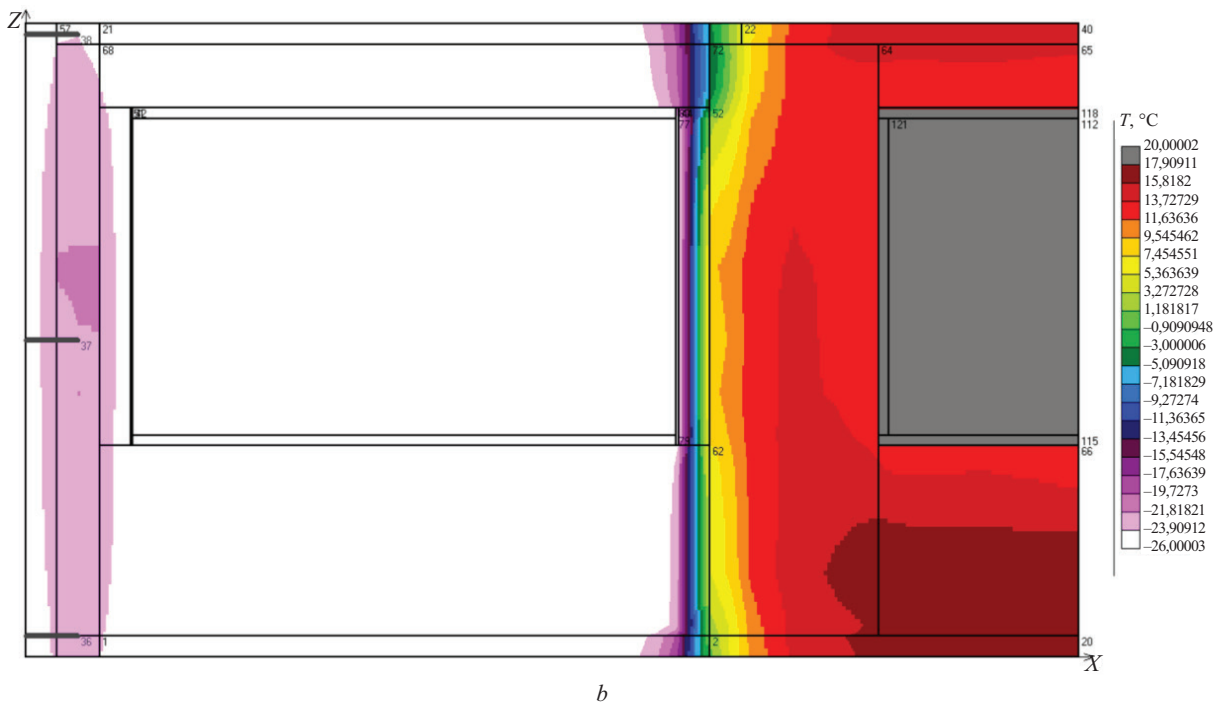
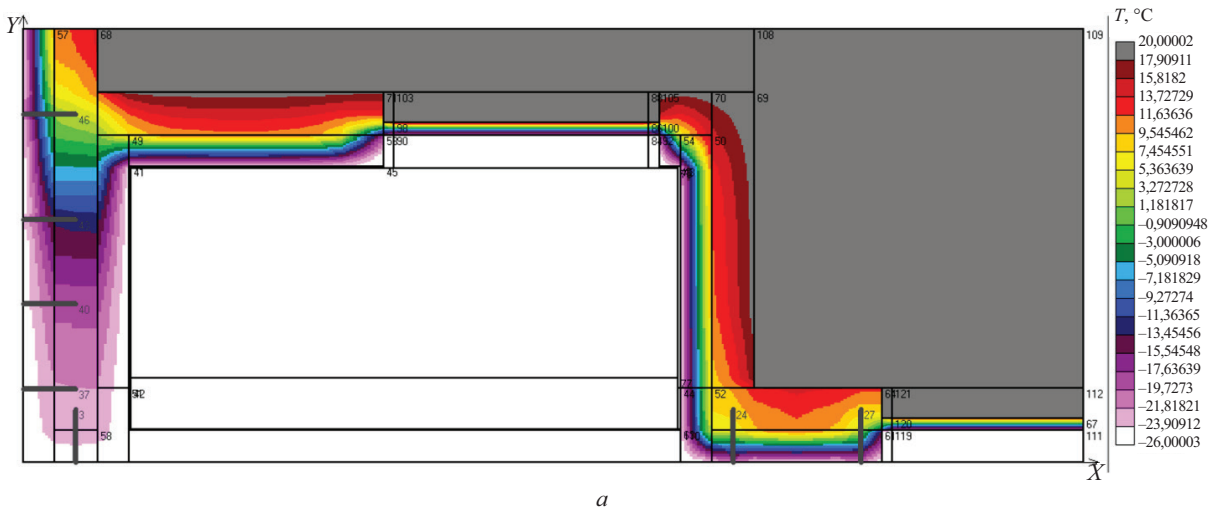
реализовано численное решение дифференциального уравнения трехмерной стационарной теплопроводности.

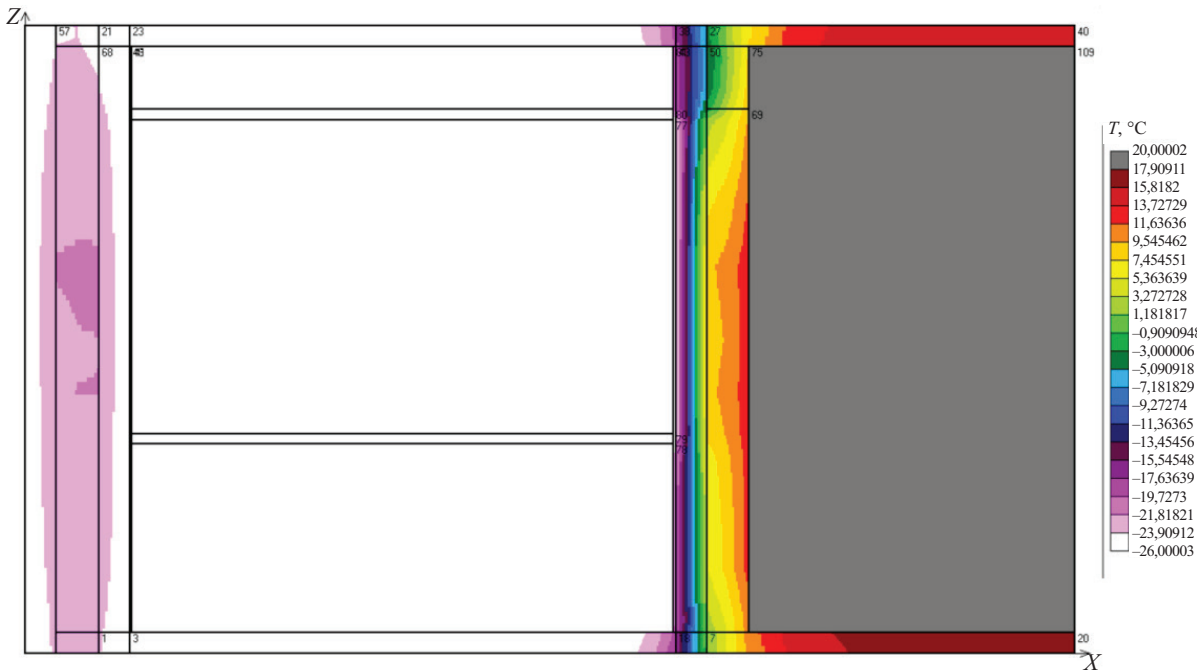
Расчетная модель включает в себя лоджию и прилегающие ограждающие конструкции здания в пределах одного этажа (рис. 2).

Граничные условия заданы в виде теплового потока, равного 0 на плоскостях, по которым рассматриваемый в составе расчетной модели участок здания отделен от остальной части: в продольном направлении — по оси симметрии окна в наружной стене, в поперечном направлении — на расстоянии 300 мм от внутренней поверхности газобетонных блоков, отделяющих лоджию от внутреннего помещения, и по высоте — от середины толщины плиты перекрытия верхнего этажа до середины толщины плиты перекрытия нижнего этажа.

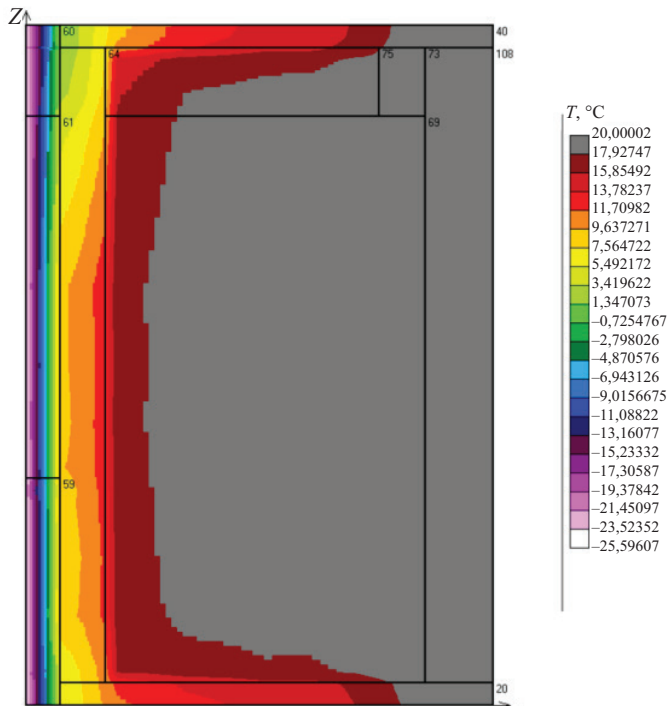
Расчет выполнен в соответствии с нормативными требованиями тепловой защиты зданий. Расчетная температура внутреннего воздуха принята +20 °C (по минимальным значениям оптимальной температуры для жилых зданий (ГОСТ 30494)). Расчетная температура наружного воздуха принята равной температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, что для Москвы составляет –26 °C (табл. 3.1 СП 131.13330³). Температура воздуха в пределах лоджии принята равной температуре наружного воздуха. В табл. 1 приведены расчетные теплотехнические характеристики материалов конструкций с их цветовой маркировкой, заданные в расчетной модели.

³ СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. М. : Минстрой России, 2025.





d



e

Рис. 6. Распределение температур: в наружных стенах на высоте 1,5 м от пола (a); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (b); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (c); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (d); на внутренней поверхности стены лоджии (e)

Fig. 6. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (a); of the external wall at the balcony wall junction (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (e)

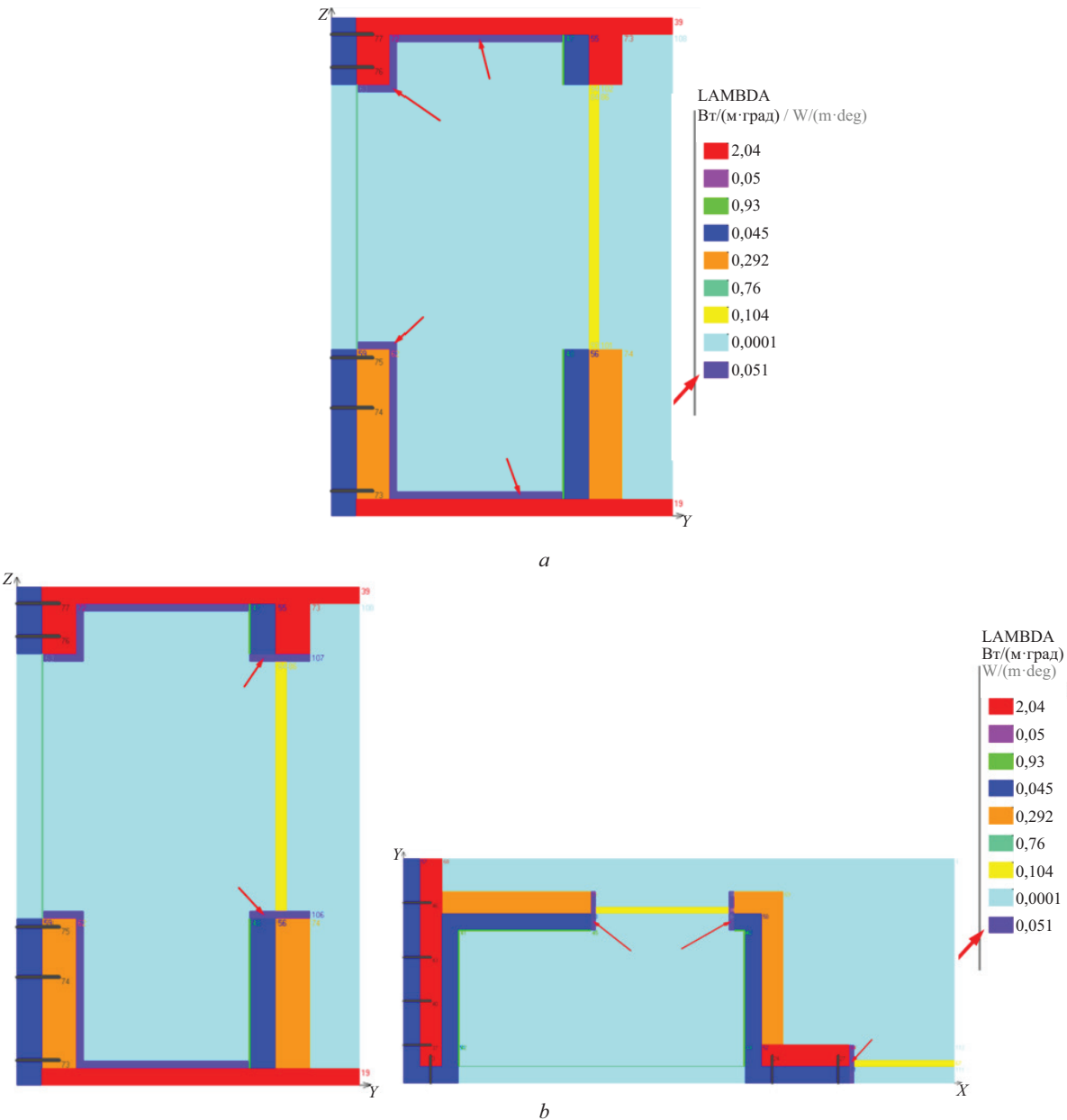
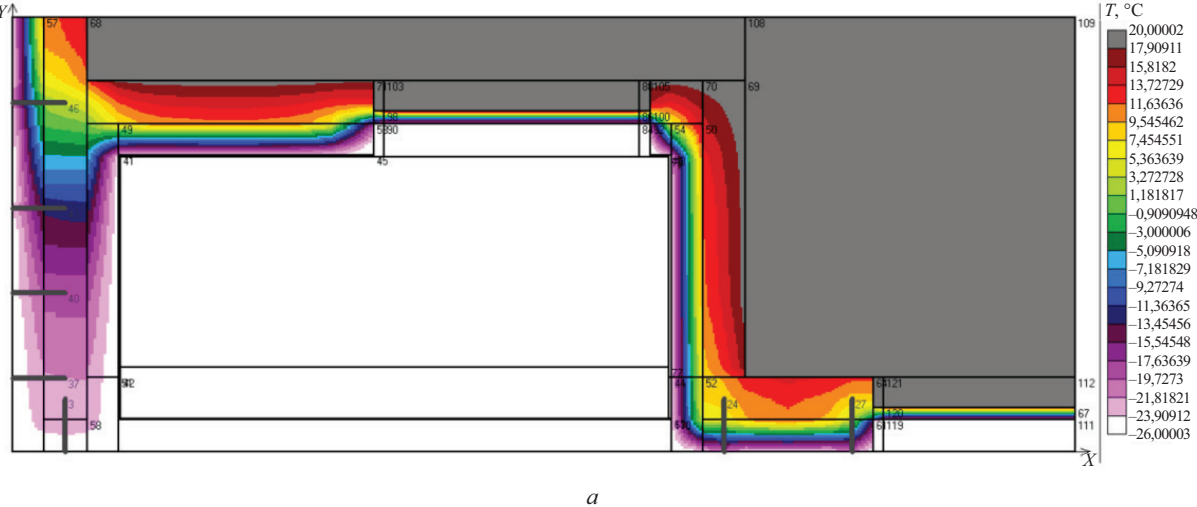
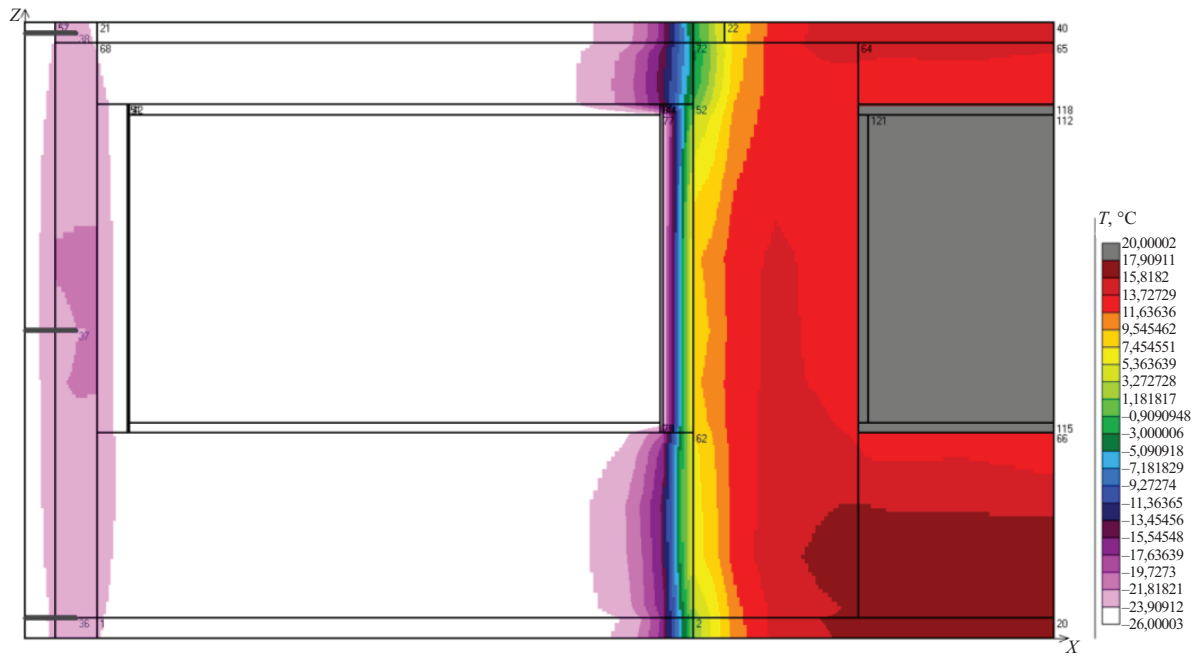


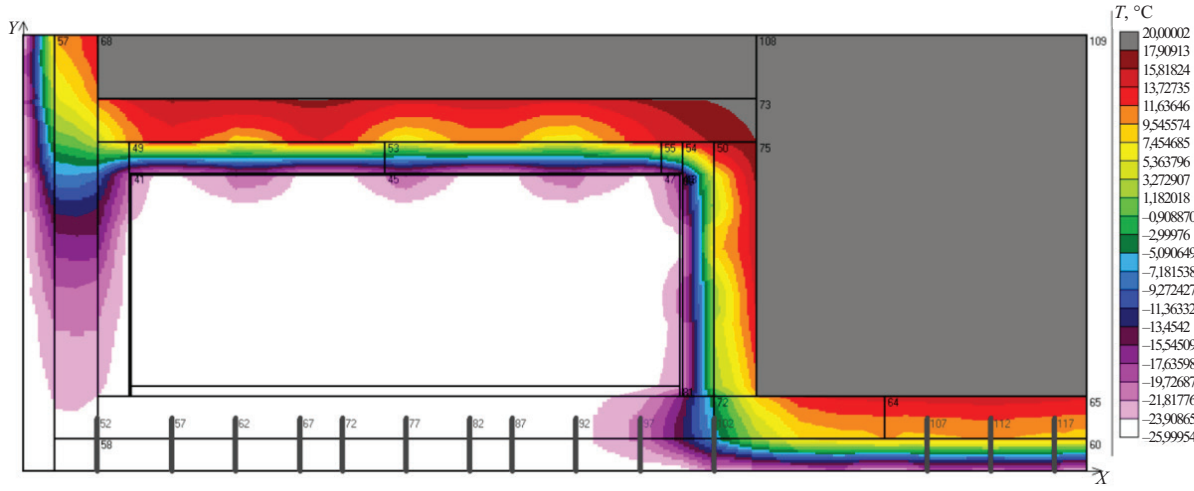
Рис. 7. Расчетные схемы конструкции с дополнительным утеплением: *a* — вариант 1: утепление пола, потолка и перемычки над окном в лоджии; *b* — вариант 2: дополнительное утепление откосов окон и балконной двери

Fig. 7. Calculation models of the structure with added insulation: *a* — option 1: insulation applied to the balcony floor, ceiling, and lintel; *b* — option 2: additional insulation of window and balcony door jambs

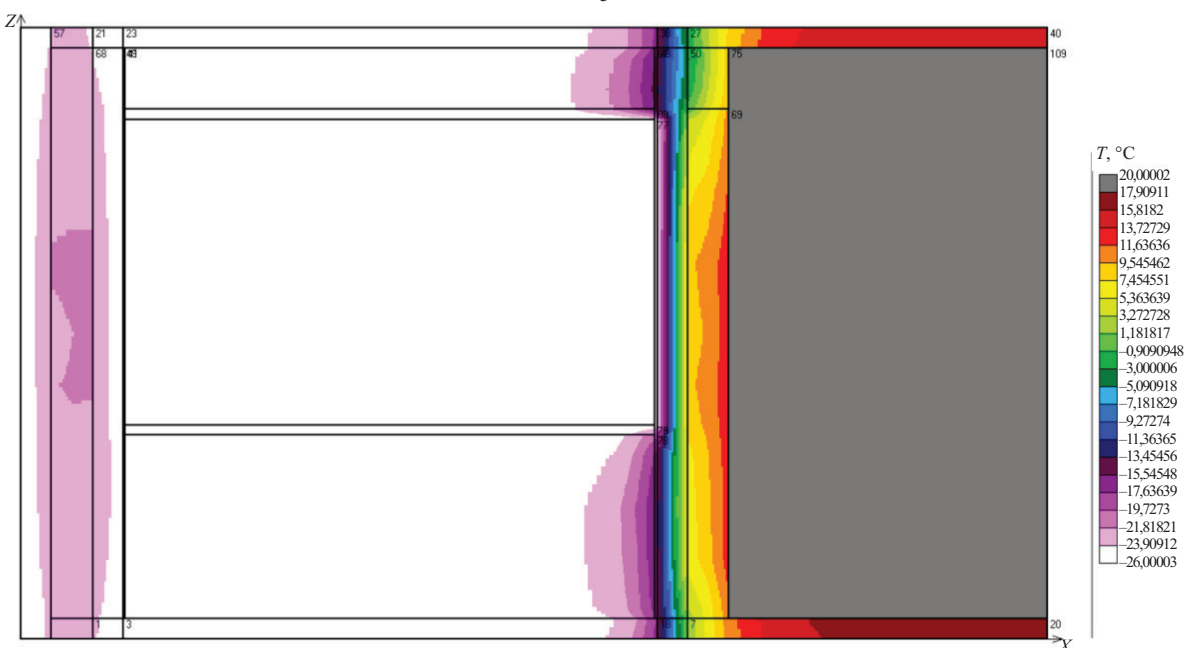




b



c



d

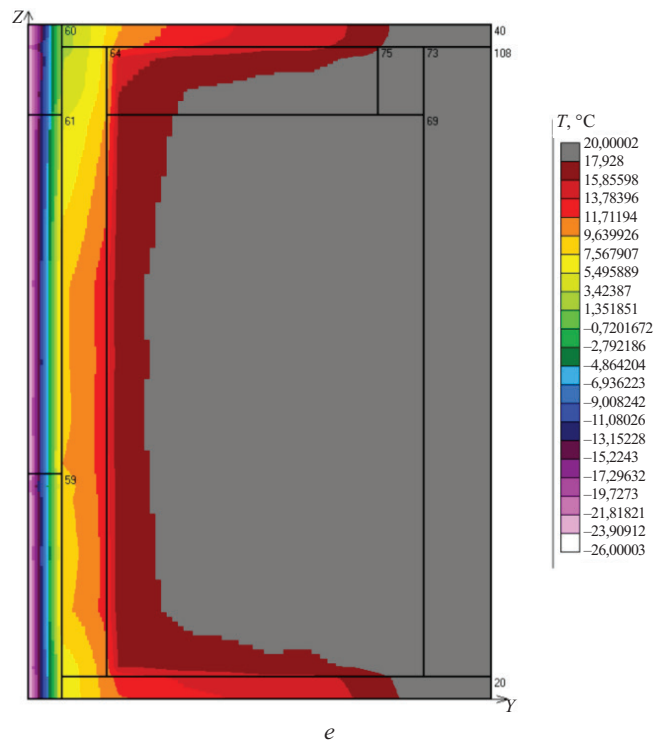


Рис. 8. Распределение температур в конструкциях, утепленных по первому варианту: в наружной стене на высоте 1,5 м от пола (a); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (b); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (c); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (d); на внутренней поверхности стены лоджии (e)

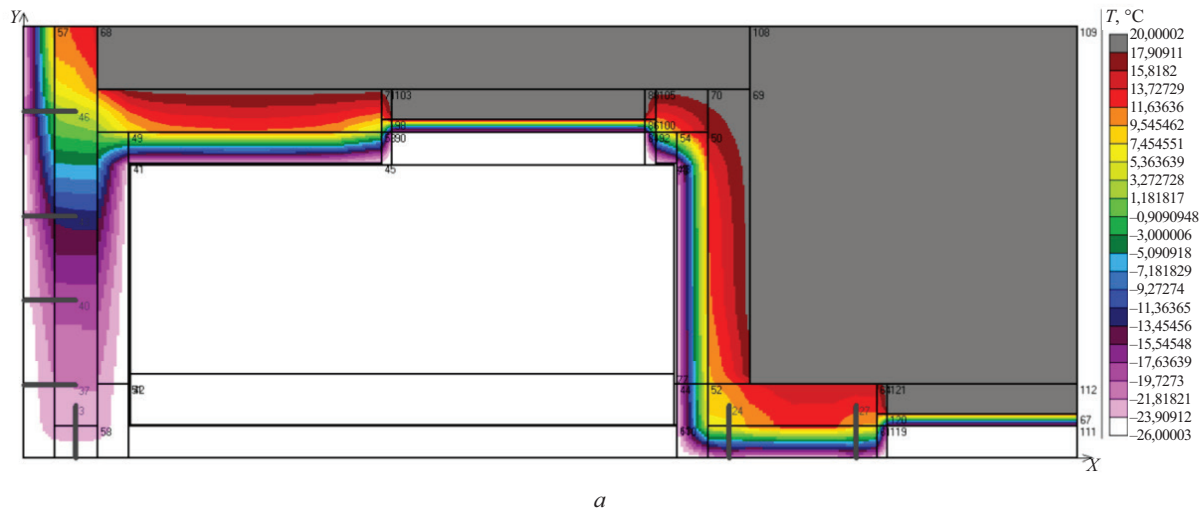
Fig. 8. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (insulation option 1) (a); temperature distribution pattern on the interior surface of the external wall at the balcony wall junction (insulation option 1) (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (insulation option 1) (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (insulation option 1) (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (insulation option 1) (e)

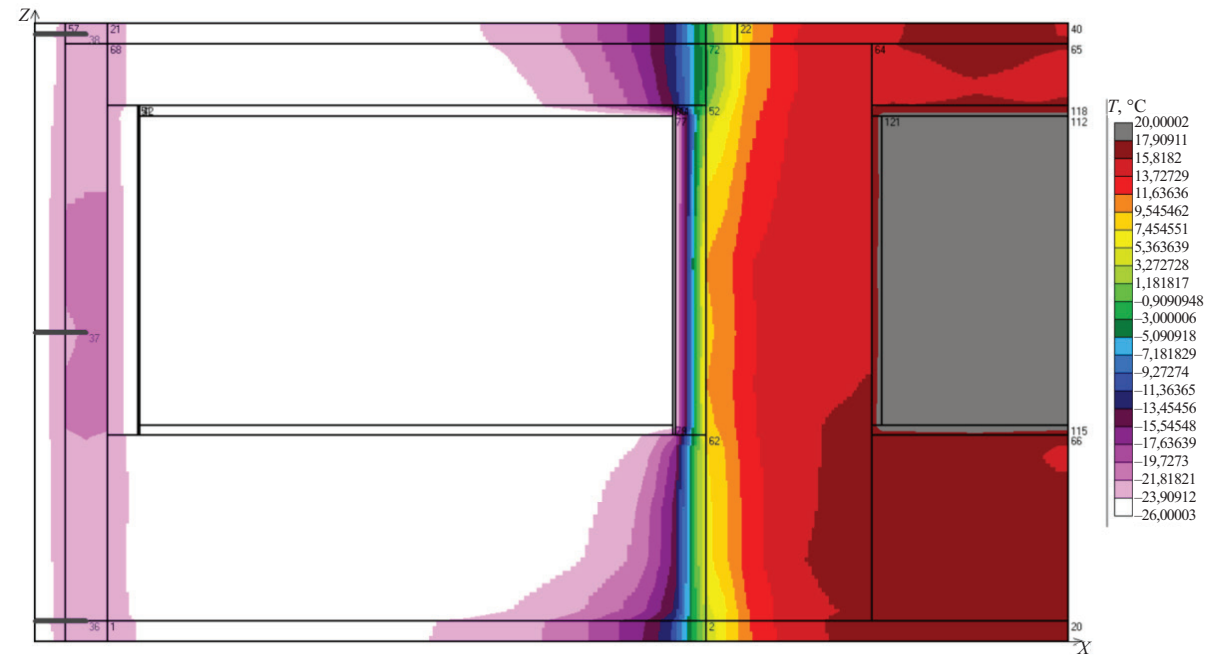
Учитывался теплообмен на поверхностях, граничащих с воздухом. Для поверхностей, граничащих с внутренним воздухом, коэффициент теплоотдачи задан $\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; для плоскостей, граничащих с наружным воздухом, — $\alpha_{н} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Крепежные детали в навесной фасадной системе (несущие кронштейны), а также дюбели для кре-

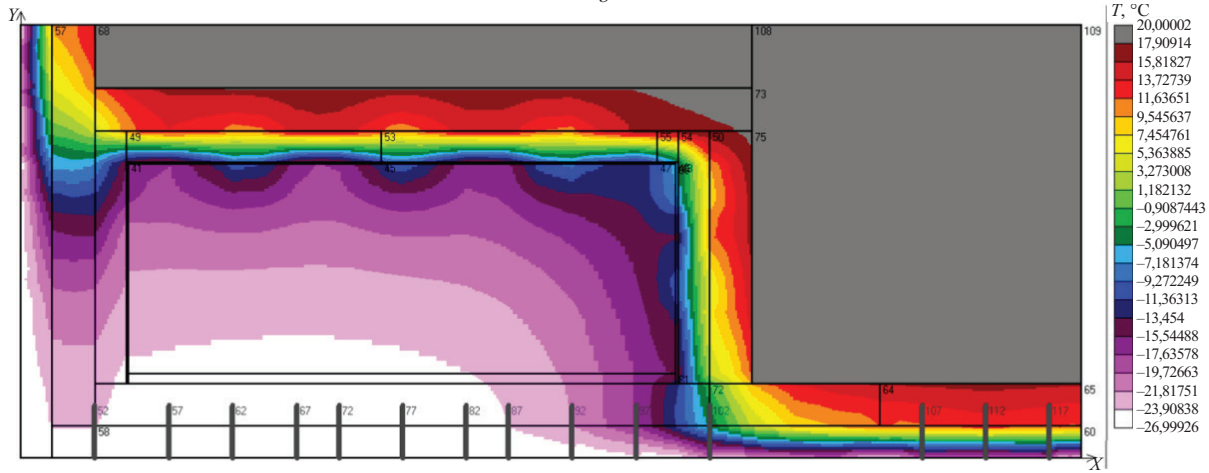
пления плит утеплителя, являющиеся точечными теплопроводными включениями, в расчетной схеме задавались как стержневые элементы с площадями, равными 222 и 78,5 мм² соответственно.

На рис. 3–5 изображены характерные виды и сечения конструкций, смоделированных в расчетной схеме исследуемого фрагмента фасада здания, на ко-

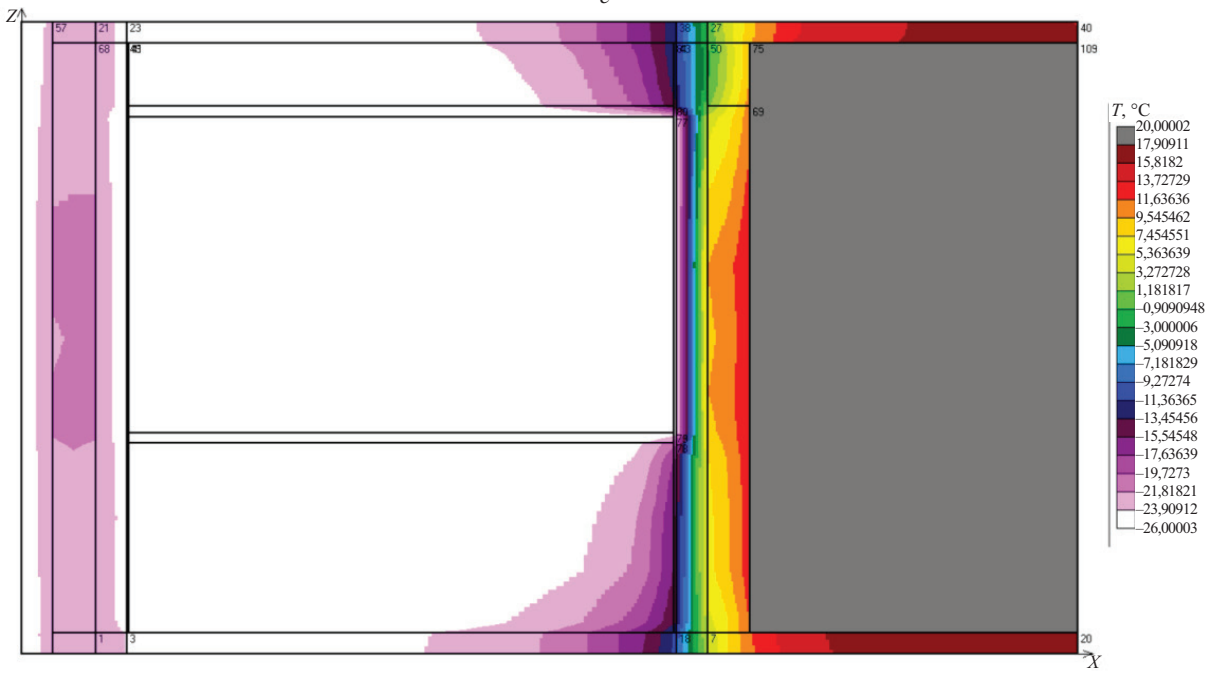




b



c



d

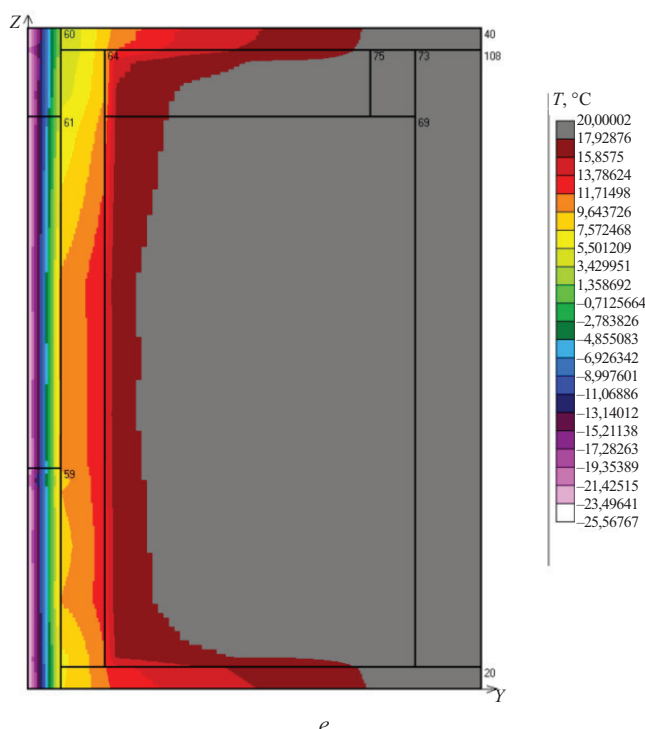


Рис. 9. Распределение температур в конструкциях, утепленных по второму варианту: в наружной стене на высоте 1,5 м от пола (а); на внутренней поверхности наружной стены в месте примыкания к стене лоджии (б); в наружных стенах в месте контакта с верхней плитой перекрытия (с); в месте контакта стены лоджии с наружной стеной (д); на внутренней поверхности стены лоджии (е)

Fig. 9. Temperature distribution pattern in the exterior walls at a height of 1.5 m from the floor (insulation option 2) (a); temperature distribution pattern on the interior surface of the external wall at the balcony wall junction (insulation option 2) (b); temperature distribution pattern in the exterior walls at the contact point with the upper floor slab (insulation option 2) (c); temperature distribution pattern at the contact point between the balcony wall and the external wall (insulation option 2) (d); temperature distribution pattern on the internal surface of the balcony wall (insulation option 2) (e)

торых разным цветом показаны конструктивные элементы, обладающие различными коэффициентами теплопроводности (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования тепловой эффективности вертикальных ограждающих конструкций монолитного жилого здания с лоджиями проводились с целью проверки расчетного сопротивления теплопередаче наружной стены строящегося в Москве объекта и выявления наличия «мостиков холода» в ее конструктивном решении.

По результатам численного расчета с использованием программного комплекса (ПК) THERL получены трехмерные картины распределения температур в исследуемой конструкции, анализ которых наглядно продемонстрировал места с пониженными температурами, свидетельствующими о наличии в этих зонах «мостиков холода». Такими местами являются: выступающий (наружный) угол здания (в месте устройства лоджии), откосы оконных проемов, а также и, главным образом, область контакта монолитной железобетонной плиты перекрытия с балкой, выпол-

няющей функцию перемычки над витражом в лоджии (рис. 6).

Необходимо отметить, что температура на внутренней поверхности стены в этих местах опускается до +9,5 °C, а в месте сопряжения железобетонной плиты с перемычкой до +7,5 °C (рис. 6, е), что ниже температуры точки росы для жилых зданий, равной +10,7 °C. Такая температура свидетельствует о конденсации водяного пара на внутренней поверхности стены и возможном ее намокании, которое может привести к возникновению плесени, грибка и ухудшению эксплуатационной надежности ограждающей конструкции.

Для исключения выявленных «мостиков холода» в исследуемом конструктивном решении наружного ограждения здания были рассмотрены два варианта утепления конструкций. Первый вариант включал утепление железобетонных конструкций пола, потолка и перемычки над окном в лоджии (рис. 7, а), а второй состоял в дополнительном утеплении откосов окон и балконной двери (рис. 7, б).

Картины распределения температур в конструкциях, утепленных по первому варианту, представлены на рис. 8; по второму варианту — на рис. 9.

Табл. 2. Результаты теплотехнического расчета с использованием ПК TEPL
Table 2. Results of the thermal analysis performed using TEPL software

Показатели Indicators	Неутепленные конструкции Non-insulated structures	Утепленные конструкции Insulated structures	
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Расчетная площадь поверхностей ограждения A_R , м ² Estimated surface area of the fencing A_R , m ²	13,38	13,38	14,01
Общий поток тепла через поверхности Q , Вт Total heat flux through surfaces Q , W	563,35	560,38	405,29
Поток тепла через расчетные поверхности, Вт Heat flow through the calculated surfaces, W	375,28	372,94	319,92
Поток тепла через откосы, пол и потолок, Вт Heat flow through slopes, floor and ceiling, W	188,07	187,44	85,37
Средняя плотность потока тепла, Вт/м ² Average heat flux density, W/m ²	42,11	41,89	28,93
Приведенное сопротивление теплопередаче R_o , (м ² ·°C)/Вт Reduced thermal resistance R_o , (m ² ·°C)/W	1,0924	1,0982	1,5899

Сравнительный анализ картин распределения температур в конструкциях после их утепления показал, что утепление пола, потолка и перемычки над окном в лоджии (вариант 1) позволило повысить температуру на внутренней поверхности наружной стены до +10 °С, а дополнительное утепление откосов окон и балконной двери (вариант 2) — до +12 °С и тем самым исключить возможное образование конденсата на ее поверхности.

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче исследуемых конструкций произведен с использованием ПК TEPL на основе величин потока тепла, определенных в результате решения трехмерной задачи стационарной теплопроводности.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определялось по формуле:

$$R_o = \frac{\Delta t \cdot A_R}{Q},$$

где Δt — температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности ограждения, °С; A_R — расчетная площадь ограждающей конструкции, м²; Q — суммарные потери тепла, происходящие через поверхности ограждающей конструкции, а также примыкающие к ней конструкций (откосы, поверхности плит перекрытий, балок, и т.д.), Вт.

В данной задаче анализировалась величина приведенного сопротивления теплопередаче непосредственно наружного стенового ограждения (без окон). Учитывались тепловые потери Q через стены, откосы оконных проемов и балконной двери, пол и потолок. При этом в расчетную площадь ограждения A_R включались только площади проекций стен на вертикальную плоскость.

Результаты теплотехнического расчета рассматриваемого участка конструкций приведены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, можно отметить высокую эффективность утепления откосов окон-

ных и дверных проемов: поток тепла через ограждающие конструкции снизился на 28 %, благодаря чему приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен увеличилось на 45 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численный анализ тепловой эффективности исследуемых конструкций ограждения показал, что значительные потери тепла происходят через откосы окон и балконной двери. Так, общий поток тепла через конструкцию с теплоизоляцией на откосах снизился на 28 % по сравнению с потоком тепла через неутепленную конструкцию, соответствующую проектному решению рассматриваемого жилого здания. При этом утепление пола, потолка и перемычки над окном в лоджии позволило сократить общий поток тепла через ограждение всего на 1 %.

Величина приведенного сопротивления, определенная на основе данных трехмерного расчета температурных полей, вычисленная с помощью ПК TEPL, получена с учетом всех потерь тепла на поверхностях теплообмена исследуемой конструкции ограждения без утепления и составила 1,0924 (м²·°C)/Вт, после утепления откосов — 1,5899 (м²·°C)/Вт. Однако нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, определяемого по формуле (5.1) СП 50.13330, для данного района строительства равно 1,88 (м²·°C)/Вт, превышает расчетное значение сопротивления, что недопустимо. Это говорит о том, что теплозащитные свойства наружных ограждающих конструкций здания недостаточны.

Следует отметить, что величина приведенного сопротивления теплопередаче неутепленной конструкции, полученная в результате расчета по нормативной методике, составила 2,48 (м²·°C)/Вт, что в 2 раза превышает сопротивление теплопередаче, определенное на основе расчета трехмерных температурных полей. Такая разница в результатах объясня-

ется тем, что в расчете по нормативной методике не учитываются потери тепла через окна, их откосы, примыкающие к стенам конструкции перегородок и перекрытий. Как установлено в исследовании [4], в стенах с окнами половина всех потерь тепла происходит через окна, половина через глухую часть стены, при этом через откосы окон теряется до четверти суммарных потерь тепла.

Результаты численной оценки тепловой эффективности конструкции наружной стены монолитного здания с лоджиями на примере строящегося в Москве объекта позволяют заключить:

1. Конструктивное решение наружного вертикального ограждения здания не обеспечивает нормируемой теплозащиты здания, так как $R_{0}^{норм} > R_{0}^{пр}$ и требует утепления отдельных конструктивных элементов.

2. Теплотехнический расчет ограждающих конструкций в соответствии с методиками, изложенными в нормативной литературе, приводит к недопустимым погрешностям в определении приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, что отмечено также в работах [17, 18]. Это может нега-

тивно отразиться при проектировании на выборе конструктивного решения наружных ограждающих конструкций здания, не обеспечивающего требуемую эксплуатационную надежность.

3. Оценку тепловой эффективности наружных вертикальных ограждающих конструкций необходимо производить на основе расчета трехмерного температурного поля, позволяющего не только точно определить величину приведенного сопротивления теплопередаче ограждения, но и выявить имеющиеся в конструкции «мостики холода» для их устранения в конструктивном решении.

4. Для корректной оценки тепловой эффективности многослойных ограждающих конструкций, в том числе наружных стен с окнами, может быть использован ВК ТЕПЛ, с использованием которого выполнено настоящее исследование. Верификация комплекса подтверждена многочисленными исследованиями тепловой эффективности различных конструкций ограждений, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными данными [4] и результатами численных расчетов с применением других вычислительных комплексов [19, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. NY, 1980. 197 p.
2. Туснина О.А., Туснин А.Р. Программный комплекс для теплотехнического расчета строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 4. С. 51–54. EDN SAZOLL.
3. Туснина О.А. Теплотехнический расчет конструкций численными методами // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 91–99. EDN ROWKFB.
4. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103439.
5. Abass F., Ismail L.H., Wahab I.A., Elgadi A.A. Development of a Model for OTTV and RTTV based on BIMVPL to Optimize the Envelope Thermal Performance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 713. Issue 1. P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899x/713/1/012009
6. Najjar M.K., Rosa A.C., Hammad A.W.A., Vazquez E., Evangelista A.C.J., Tam V.W.Y. A regression-based framework to examine thermal loads of buildings // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 292. P. 126021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126021
7. Dino I.G., Sari A.E., Iseri O.K., Akin S., Kal-faoglu E., Erdogan B. et al. Image-based construction of building energy models using computer vision // Automation in Construction. 2020. Vol. 116. P. 103231. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103231
8. Schukina T., Kurasov I., Drapaliuk D., Popov P. Improving the energy efficiency of buildings based on the use of integrated solar wall panels // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009
9. M'ziane M.C., Grine A., Younsi Z., Touhami M.S.K. Modelling and Numerical Simulation of a Passive Wall Incorporating a Phase Change Material // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. Vol. 79. Issue 1. Pp. 169–181. DOI: 10.37934/arfmts.79.1.169181
10. Stonkuvienė A., Bliūdžius R., Burlingis A., Ramanauskas J. The impact of connector's thermal and geometrical characteristics on the energy performance of facade systems // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. P. 102085. DOI: 10.1016/j.job.2020.102085
11. Zhang F., Ju Y., Santibanez Gonzalez E.D.R., Wang A., Dong P., Giannakis M. A new framework to select energy-efficient retrofit schemes of external walls: A case study // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 289. P. 125718. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125718
12. Протасевич А.М., Лешкевич В.В. Расчет температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов // Энергоэффективность. 2013. № 10. С. 16–20.
13. Švajlenka J., Kozlovská M., Vranay F., Pošiváková T., Jámbořová M. Comparison of laboratory and computational models of selected thermal-technical

properties of constructions systems based on wood // *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 12. P. 3127. DOI: 10.3390/en13123127

14. Ghedhab M.E., El Abbassi I., Absi R., Mélinge Y. Numerical study of the effect of DSF walls geometrical shape on heat transfer // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 170. P. 01005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202017001005

15. Al-Sanea S.A., Zedan M.F. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions // *Applied Energy*. 2012. Vol. 98. Pp. 584–593. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.038

16. Shaik S., Nagaraju S., Rizvan S.M., Gorantla K.K. Optimizing Vertical Air Gap Location Inside the Wall for Energy Efficient Building Enclosure Design Based on Unsteady Heat Transfer Characteristics // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 1003–1009. DOI: 10.1007/978-981-15-0035-0_80

17. Козлов В.В. Вопросы точности расчета приведенного сопротивления теплопередаче и температурных полей // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 3 (77). С. 62–74. EDN UTKMBM.

18. Федоров С.В., Терехова И.А. Оценка корректности теплотехнических расчетов ограждающих конструкций методом конечных элементов // *Прикладная математика и фундаментальная информатика*. 2017. Т. 4. № 1. С. 31–42. EDN YZKCZN.

19. Туснина В.М., Файзов Д.Ш. К вопросу теплотехнического расчета неоднородных ограждающих конструкций зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 4. С. 19–24. EDN YKPKDKR.

20. Соловьев А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 2 (46). С. 24–35. DOI: 10.5862/MCE.46.4. EDN RZTSEL.

Поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Александровна Туснина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; TushninaOA@mgsu.ru;

Валентина Матвеевна Туснина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7716-5978, РИНЦ ID: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; TushninaVM@mgsu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. NY, 1980; 197.

2. Tushnina O.A., Tushnin A.R. A computing program for the thermal analysis of building structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 4:51-54. EDN SAZOLL. (rus.).

3. Tushnina O.A. Thermotechnical analysis of the structures by using numerical methods. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 11:91-99. EDN ROWKFB. (rus.).

4. Tushnina V., Tushnin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103439.

5. Abass F., Ismail L.H., Wahab I.A., Elgadi A.A. Development of a Model for OTTV and RTTV based

on BIMVPL to Optimize the Envelope Thermal Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 713(1):012009. DOI: 10.1088/1757-899x/713/1/012009

6. Najjar M.K., Rosa A.C., Hammad A.W.A., Vazquez E., Evangelista A.C.J., Tam V.W.Y. A regression-based framework to examine thermal loads of buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 292:126021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126021

7. Dino I.G., Sari A.E., Iseri O.K., Akin S., Kalfaoglu E., Erdogan B. et al. Image-based construction of building energy models using computer vision. *Automation in Construction*. 2020; 116:103231. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103231

8. Schukina T., Kurasov I., Drapaliuk D., Popov P. Improving the energy efficiency of buildings based

on the use of integrated solar wall panels. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405009

9. M'ziane M.C., Grine A., Younsi Z., Touhami M.S.K. Modelling and Numerical Simulation of a Passive Wall Incorporating a Phase Change Material. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021; 79(1):169-181. DOI: 10.37934arfmts.79.1.169181

10. Stonkuvienė A., Bliūdžius R., Burlingis A., Ramanauskas J. The impact of connector's thermal and geometrical characteristics on the energy performance of facade systems. *Journal of Building Engineering*. 2021; 35:102085. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.102085

11. Zhang F., Ju Y., Santibanez Gonzalez E.D.R., Wang A., Dong P., Giannakis M. A new framework to select energy-efficient retrofit schemes of external walls: A case study. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 289:125718. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125718

12. Protasevich A.M., Leshkevich V.V. Calculation of the temperature field of multilayer enclosing structures with heat-conducting inclusions using the finite element method. *Energy Efficiency*. 2013; 10:16-20. (rus.).

13. Švajlenka J., Kozlovská M., Vranay F., Pošiváková T., Jámbořová M. Comparison of laboratory and computational models of selected thermal-technical properties of constructions systems based on wood. *Energies*. 2020; 13(12):3127. DOI: 10.3390/en13123127

14. Ghedhab M.E., El Abbassi I., Absi R., Mélinge Y. Numerical study of the effect of DSF walls geometrical shape on heat transfer. *E3S Web of Conferences*. 2020; 170:01005. DOI: 10.1051/e3sconf/202017001005

15. Al-Sanea S.A., Zedan M.F. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. *Applied Energy*. 2012; 98:584-593. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.038

16. Shaik S., Nagaraju S., Rizvan S.M., Gorantla K.K. Optimizing Vertical Air Gap Location Inside the Wall for Energy Efficient Building Enclosure Design Based on Unsteady Heat Transfer Characteristics. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1003-1009. DOI: 10.1007/978-981-15-0035-0_80

17. Kozlov V.V. Accuracy of calculation of the resistant resistance of heat transfer and temperature fields. *Building and Reconstruction*. 2018; 3(77):62-74. EDN UTKMBM. (rus.).

18. Fedorov S.V., Terekhova I.A. Evaluation of the correctness of thermal calculations of enclosing structures using the finite element method. *Applied Mathematics and Fundamental Informatics*. 2017; 4(1):31-42. EDN YZKCZN. (rus.).

19. Tushina V.M., Fayzov D.Sh. To the issue of thermo-technical calculation of non-uniform enclosing structures of buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 4:19-24. EDN YKPDKR. (rus.).

20. Solovyev A.K., Tushina O.A. A comparative thermal analysis of systems of the upper daylight (clerestory and daylight guidance system). *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 2(46):24-35. DOI: 10.5862/MCE.46.4. EDN RZTSEL. (rus.).

Received December 2, 2025.

Adopted in revised form on December 5, 2025.

Approved for publication on December 29, 2025.

BIONOTES: **Olga A. Tushina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; TushinaOA@mgsu.ru;

Valentina M. Tushina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor docent, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7716-5978, ID RSCI: 455915, Scopus: 56296961500, ResearcherID: AAD-8968-2022, ORCID: 0000-0003-0328-0848; TushinaVM@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.