

Расчёт удельных потерь теплоты посредством моделирования трёхмерного температурного поля

Рецензия эксперта на статью получена 16.06.2025 [The expert review of the article was received on June 16, 2025]

Энергосбережение в зданиях является одной из основных задач в современном строительстве. Согласно государственному докладу о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2021 год [1], для обеспечения тепловых потребностей расходуется до третьей части всех потребляемых энергетических ресурсов в России. Данный показатель остаётся практически неизменным в течение шести лет, что говорит о недостаточности предпринятых мер по вопросу энергосбережения в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

Следовательно, проектирование зданий с учётом экономного расхода энергии для обеспечения оптимального теплового режима жилых помещений соответствует приоритетным направлениям развития науки в стране.

В связи с этим ограждающие конструкции современных зданий имеют ряд отличительных признаков: многослойность, наличие различного рода теплотехнических неоднородностей (теплопроводных включений) в виде перфораций, углов и откосов здания, изменение сечения конструкций и т.п. [2].

В крупнопанельном домостроении существует проблема теплопотерь через межпанельные швы. Укрупнённые по высоте панели на два этажа снижают влияние данной теплотехнической неоднородности на удельную теплозащитную характеристику здания за счёт уменьшения количества стыков (фото 1).

Крупногабаритные панели с опиранием плиты перекрытия на несущий слой по двум высотным отметкам реализованы, например, концерном «КРОСТ» в городе Москве на объекте, расположенном на проезде Черепанова.

В ходе проектирования возник вопрос необходимости дополнительного соеди-

нения наружного и внутреннего слоёв в виде балок в зоне опирания плит перекрытия (платформенного стыка) для предупреждения разрушения при складировании, монтаже и эксплуатации строительной конструкции.

Данное соединение является линейной теплотехнической неоднородностью. Шаг перфорации влияет на приведённое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции и на теплопотери через оболочку здания.

Ограждающие конструкции современных зданий имеют ряд отличительных признаков: многослойность, наличие различного рода теплотехнических неоднородностей (теплопроводных включений) в виде перфораций, углов и откосов здания, изменение сечения конструкций и т.п.

На рис. 1 изображена трёхмерная модель исследуемого узла. Серым цветом обозначен минераловатный утеплитель, фиолетовым цветом — железобетон. В исследуемой теплотехнической неоднородности ширина утеплителя меняется по вертикали, в горизонтальном сечении наблюдается перфорация.

Для уточнения трёхмерной модели ниже представлены вертикальный и горизонтальный разрезы исследуемого узла (рис. 2).

В настоящее время расчёт удельных потерь теплоты похожих узлов не осуществляется в СП 230.1325800.2015 [3].

Цель работы — выполнить расчёт удельных потерь теплоты через линейную теплотехническую неоднородность платформенного стыка укрупнённой по высоте трёхслойной железобетонной панели.

УДК 662.613.4. Научная специальность: 2.1.3.

Расчёт удельных потерь теплоты посредством моделирования трёхмерного температурного поля

Егор Вадимович Пахоменко, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ «МГСУ»)

Основные потери теплоты происходят через ограждающие конструкции. Благодаря многообразию материалов и архитектурно-конструктивных решений по их применению при строительстве появляются новые, ранее неизученные теплотехнические неоднородности, в результате появляются большое количество узлов с изменением распределения температуры в трёх направлениях. В настоящей статье приводится расчёт тепловых потерь через платформенный стык укрупнённой по высоте панели. Расчёт сводится к моделированию трёхмерных температурных полей с последующей математической обработкой полученных результатов.

Ключевые слова: трёхслойная стеновая панель, линейная теплотехническая неоднородность, сопротивление теплопередаче, трёхмерное температурное поле, удельные потери теплоты, микроклимат помещений.

UDC 662.613.4. Scientific specialty number: 2.1.3.

Calculation of specific heat losses by modeling a three-dimensional temperature field

Egor V. Pakhomenko, PhD student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (NRU MGSU)

The main heat losses occur through enclosing structures. Due to the variety of materials and architectural and design solutions for their use in construction, new previously unexplored thermal heterogeneities appear, resulting in a large number of nodes with a change in temperature distribution in three directions. This article provides a calculation of heat losses through the platform joint of a height-enlarged panel. The calculation is reduced to modeling three-dimensional temperature fields with subsequent mathematical processing of the obtained results.

Key words: three-layer wall panel, linear thermal heterogeneity, heat transfer resistance, three-dimensional temperature field, specific heat loss, indoor microclimate.



:: Фото 1. Крупногабаритные по высоте панели

Основной характеристикой теплозащиты ограждающих конструкций является приведённое сопротивление теплопередаче R_o^{np} , ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} / \text{Вт}$). Данная характеристика является расчётной и определяется уравнением Г.1, приведённым в Приложении Г СП 50.13330.2024 [4]:

$$R_o^{np} = \frac{1}{\frac{1}{R_o^{ysl}} + \sum_{j=1}^J l_j \psi_j + \sum_{k=1}^K n_k \chi_k}, \quad (1)$$

где l_j — протяжённость линейной неоднородности j -го вида, приходящаяся на 1 м^2 фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, $\text{м}/\text{м}^2$; ψ_j — удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; n_k — количество точечных неоднородностей k -го вида, приходящихся на 1 м^2 фрагмента теплоза-

щитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, $\text{шт}/\text{м}^2$; χ_k — удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, $\text{Вт}/^\circ\text{С}$.

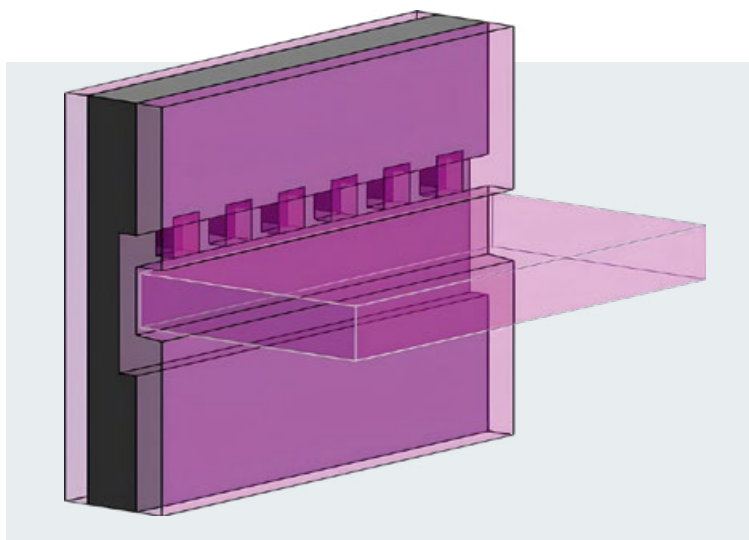
Важно понимать, что реальная тепло-технически неоднородная конструкция «приводится» к условно однородной конструкции, потери теплоты через которую равны суммарным потерям теплоты исходной [2].

Более того, среди научного сообщества обсуждается вопрос целесообразности повышения сопротивления теплопередачи стен [5]. Отчасти это вызвано тем, что фокус внимания сместился на достижение целевых показателей путём увеличения объёма утеплителя в ограждающих конструкциях здания вместо проработки вопроса потерь теплоты через теплотехнические неоднородности.

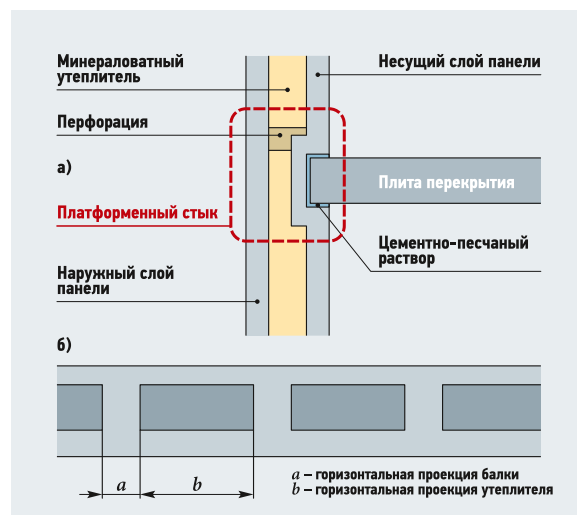
Приведённое сопротивление теплопередаче оказывает влияние на другой, не менее важный показатель — комплексное требование $k_{об}$ [6], влияющее на расчётную удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию q_o^{TP} . Комплексное требование рассчитывается согласно п. 5.5 СП 50.13330.2024 [4].

На текущем этапе развития панельного домостроительства трёхслойные панели могут иметь сложную конфигурацию в плане и на разрезах, могут облицовываться различными материалами.

Решение задач теплопроводности сводится к интегрированию дифференциальных уравнений Фурье [7]. Так как изменение температуры происходит в нескольких направлениях, то расчёт теплового потока производился путём моделирования температурных полей.



:: Рис. 1. Объёмная модель теплотехнической неоднородности



:: Рис. 2. Вертикальный разрез трёхслойной панели с опиранием плиты перекрытия на несущий слой (а) и условная схема перфорации (б): горизонтальный разрез

Расчёты удельных потерь теплоты платформенного стыка

Для расчёта использовался программный комплекс ELCUT Professional, предоставленный ООО «Тор». При расчёте по стационарным условиям теплопередачи можно определить потери теплоты зданием для определения мощности системы отопления [8]. Данная теплотехническая неоднородность предполагает изменение теплофизических свойств ограждающей конструкции по вертикали и шага перфорации по горизонтали, представляет собой двумерные неоднородности в двух разных плоскостях. Уменьшение сечение утеплителя в зоне платформенного стыка приводит к огибанию тепловым потоком перфорации. В этом случае необходимо строить трёхмерное температурное поле.

По результатам моделирования трёхмерного температурного поля возможно вычислить удельные потери теплоты.

Описание конструкции, выбранной для расчёта: стеновая панель представляет собой трёхслойную конструкцию, в которой толщина внутреннего несущего слоя составляет 120 мм, наружного слоя — 100 мм, толщина утеплителя — 230 мм. Схема узла представлена на рис. 2–4.

Рассмотрим алгоритм расчёта:

1. После определения геометрии объёмной модели исследуемой конструкции необходимо задать граничные условия: температуры на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции, коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей.

Согласно табл. 1 СП 131.13330.2020 [9] и табл. 1 ГОСТ 30494–2011 [10], были приняты следующие граничные условия для города Москвы:

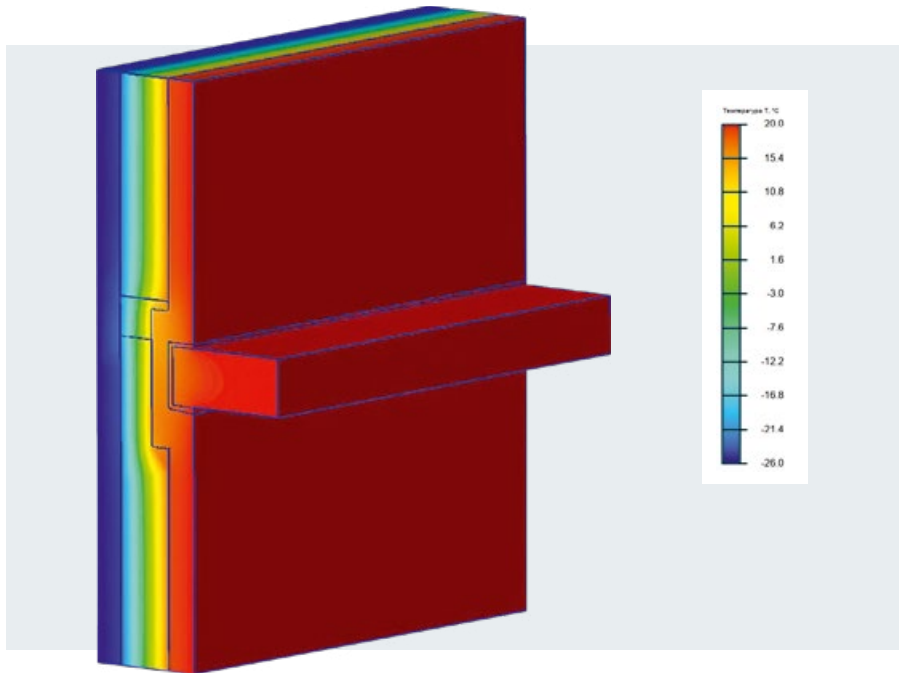
- температура на наружной поверхности $t_n = -26^\circ\text{C}$;
- коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_n = 23$;
- температура на внутренней поверхности $t_b = +20^\circ\text{C}$;
- коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности $\alpha_b = 8,7$.

2. Необходимо задать теплопроводность материалов исследуемой конструкции следующим образом.

При условиях эксплуатации ограждающих конструкций Б для жилых помещений были приняты следующие теплопроводности материалов λ по табл. Т1 из СП 50.13330.2024 [4]:

- для утеплителя — $0,043 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$;
- для цементно-песчаного раствора — $0,93 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$;
- для железобетона — $2,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Полученные данные моделирования трёхмерных температурных полей зане-



:: Рис. 3. Распределение температуры в теле и по поверхности ограждающей конструкции

сены в соответствующие табл. 1–4. Этих условий достаточно для моделирования трёхмерного температурного поля.

Шаг перфорации в данном исследовании — это отношение, характеризующее чередование длины железобетонного участка в горизонтальной плоскости ограждающей конструкции и длины утеплителя в той же плоскости (рис. 26). Таким образом, шаг перфорации «1/2» означает, что длина проекции утеплителя на горизонтальную плоскость больше проекции длины железобетонного участка в два раза.

На рис. 3 представлено распределение температуры при шаге перфорации «1/1» исследуемой теплотехнической неоднородности при соединении наружного и внутреннего слоёв балками высотой, равной 150 мм, и длиной проекции на горизонтальную плоскость, равной 150 мм. Распределение температуры имеет схожие закономерности, поэтому представлено только одно изображение трёхмерного температурного поля.

Распределение температуры по поверхности ограждающей конструкции позволяет определить поток теплоты.

:: Интегральные значения теплового потока через линейную теплотехническую неоднородность Q [Вт/м²]

табл. 1

Способ перфорации	150/150 (1/1)	150/300 (1/2)	150/450 (1/3)	200/200 (1/1)	200/400 (1/2)	200/600 (1/3)
	89,9	77,7	73,0	90,3	85,0	74,0
Длина объёмной модели L , м	1,95	2,1	2,25	1,8	2,2	2,2

:: Интегральные значения теплового потока на 1 п.м. через линейную теплотехническую неоднородность Q_l^T [Вт/м]

табл. 2

Способ перфорации	150/150 (1/1)	150/300 (1/2)	150/450 (1/3)	200/200 (1/1)	200/400 (1/2)	200/600 (1/3)
	46,1	37,00	32,4	50,2	38,6	33,6

:: Интегральные значения дополнительных потерь теплоты через линейную теплотехническую неоднородность ΔQ_{jl} [Вт/м²]

табл. 3

Способ перфорации	150/150 (1,1)	150/300 (1/2)	150/450 (1/3)	200/200 (1/1)	200/400 (1/2)	200/600 (1/3)
	27,4	18,3	13,8	31,5	20,0	15,0

:: Удельные потери теплоты через теплотехническую неоднородность ψ_j [Вт/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})]

табл. 4

Способ перфорации	150/150 (1/1)	150/300 (1/2)	150/450 (1/3)	200/200 (1/1)	200/400 (1/2)	200/600 (1/3)
	0,596	0,399	0,299	0,685	0,434	0,325

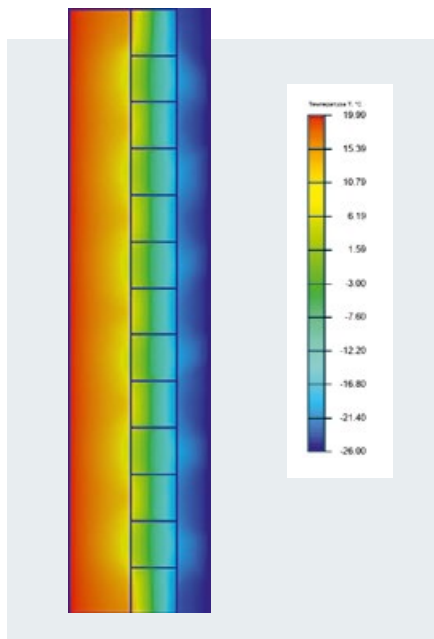


Рис. 4. Распределение температурных полей по горизонтальному сечению перфорации 1/1

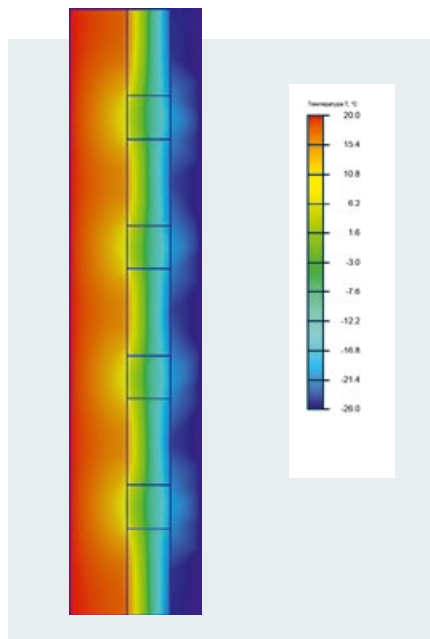


Рис. 5. Распределение температурных полей по горизонтальному сечению перфорации 1/2

3. Результатом расчёта трёхмерного температурного поля в данном исследовании являются значения теплового потока для разных способов перфорации, которые сведены в табл. 1.

Рассмотрим несколько вариантов: перфорацию «1/1» и «1/2» при высоте сечения балки 150 мм. На рис. 4 и 5 представлены распределения температур в горизонтальном сечении рассматриваемого узла. Теплотехническая неоднородность изменяет температурное поле вокруг себя.

Влияние теплотехнических неоднородностей на распределение температуры в этой конструкции зависит от расстояния между отдельными неоднородностями (в данном случае железобетонными балками).

4. Значения теплового потока необходимо представить на один погонный метр (1 п.м.), для этого необходимо значения теплового потока поделить на длину модели. Разная длина возникла ввиду разного шага перфорации. Значения теплового потока на 1 п.м. приведены в табл. 2.

5. Согласно методике [4, 5] необходимо найти дополнительные потери теплоты через линейную теплотехническую неоднородность j -го вида, приходящиеся на 1 п.м., определяемые по формуле:

$$\Delta Q_j^I = Q_j^I - Q_{j,1}, \text{ Вт/м}, \quad (2)$$

где Q_j^I — потери теплоты через расчётную область с линейной теплотехнической неоднородностью j -го вида, приходящиеся на 1 п.м. стыка и являющиеся результатом расчёта трёхмерного температурного поля, Вт/м; $Q_{j,1}$ — потери теплоты через плоскую трёхслойную стенку без линейной теплотехнической неоднородности, приходящиеся на 1 п.м., Вт/м.

Полученные значения по формуле (2) являются величиной дополнительного теплового потока (табл. 3).

6. Удельные потери теплоты можно определить по формуле [4, 5]:

$$\psi_j = \frac{\Delta Q_j^I}{t_b - t_n}, \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}, \quad (3)$$

Таким образом, поделив значения дополнительного потока теплоты на разницу температур на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции, были получены значения удельных потерь теплоты, которые приведены в табл. 4.

Заключение

На величину потока теплоты влияет не только габарит неоднородности. При изменении шага перфорации меняется распределение температур в конструкции, а вместе с ним и значение теплового потока. При увеличении шага перфорации, а вместе с ним и расстояния между температурными включениями уменьшается влияние отдельно взятой неоднородности на удельные потери теплоты. Наибольшее снижение удельных потерь теплоты происходит при шаге перфорации «1/2».

При задании конструкции теплопроводных включений двухмерными полями они воспринимаются как бесконечные по длине. Преимуществом моделирования трёхмерных температурных полей является полная картина распределения температуры, полученная за счёт описания реальных размеров конструкции, что впоследствии позволяет производить более точные расчёты. Также описанный метод позволяет избежать дополнительных математических действий по обработке двухмерных температурных полей,

таких как необходимость определения размеров зоны влияния теплопроводного включения, тем самым уменьшая погрешность расчёта.

Недостатком описанного метода является трудоёмкость процесса, требующего высокой квалификации проектировщика и наличия времени. При современных темпах проектирования исполнитель не располагает большим количеством времени для выполнения таких трудоёмких расчётов. Это приводит к ошибкам при расчёте тепловых потерь здания или к намеренному упрощению расчёта удельных потерь теплоты, что снижает точность полученных значений.

Также стоит отметить, что на данный момент построение трёхмерных моделей ведётся в программах расчёта, так как нет возможности использовать тот же формат файлов, что и в популярных программах по BIM-проектированию зданий, что повышает трудоёмкость работы, так как отсутствует возможность использования готовых трёхмерных моделей из проекта.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности использования данного метода для нахождения удельных потерь теплоты через линейные теплотехнические неоднородности для новых архитектурных форм посредством моделирования трёхмерного температурного поля в узлах с изменением распределения температур в трёх направлениях. ●

1. О состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации: государственный доклад [Электр. ресурс]. Минэкономразвития России; ЦСР. Режим доступа: economy.gov.ru. Дата обраш.: 16.06.2024.
2. Кривошеин А.Д., Фёдоров С.В. К вопросу о расчёте приведённого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Инженерно-строительный журнал, 2010. №8. С. 21–27.
3. СП 230.1325800.2015. Ограждающие конструкции зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей (с Изм. №1–2) / Дата введ.: 30.04.2015.
4. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий / Дата введ.: 16.06.2024.
5. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О требованиях к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» // Вестник МГСУ, 2011. №7. С. 59–65.
6. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // Журнал АВОК, 2010. №4. С. 52–60.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 5-е, пересм. / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. — М.: АВОК-Пресс, 2006. 256 с.
8. ELCUT: Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6: Руководство пользователя / ООО «Тор». — Екатеринбург: Издательские решения, 2023. 290 с.
9. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (с Изм. №1–2) / Дата введ.: 25.06.2021.
10. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (с Попр., с Изм. №1) / Дата введ.: 01.01.2013.

References — see page 80.

Calculation of specific heat losses by modeling a three-dimensional temperature field. Pp. 72–75.

Egor V. Pakhomenko, PhD student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (NRU MGSU)

1. *O sostoyanii energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti v Rossijskoj Federatsii: gosudarstvennyj doklad* [On the state of energy conservation and improvement of energy efficiency in the Russian Federation: The state report]. *Minekonomrazvitiya Rossii* [Ministry of Economic Development of the Russian Federation]; TsSR [Center for Strategic Research (CSR)]. Web-source: economy.gov.ru. Data of impl.: June 16, 2024. [In Russian]
2. A.D. Krivoshein, S.V. Fedorov. *K voprosu o raschete privedennogo soprotivleniya teplopere-dache ograzhdayushchikh konstruksij* [On the issue of calculating the reduced heat-trans-fer resistance of enclosing structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Journal of Civil En-gineering]. 2010. No. 8. Pp. 21–27. [In Russian]
3. *SP 230.1325800.2015* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 230.1325800.2015]. *Konstruksii ograzhdayushchie zdaniy. Khara-akteristiki teplotekhnicheskikh neodnorodnostej (s Izm. No. 1–2)* [Building Enclosing Struc-tures. Characteristics of Thermal Inhomogeneities (with Amendments No. 1–2)]. Date of impl.: April 30, 2015. [In Russian]
4. *SP 50.13330.2024* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Prac-tice of Russia) No. 50.13330.2024]. *Teplovaya zashchita zdaniy* [Thermal Protection of Buildings]. Date of impl.: June 16, 2024. [In Russian]
5. V.G. Gagarin, V.V. Kozlov. *O trebovaniyakh k teplozashchite i energeticheskoy effektivnos-ti v proekte aktualizirovannoj redaktsii SNiP "Teplovaya zashchita zdaniy"* [On the require-ments for thermal protection and energy efficiency in the draft updated version of the "Thermal Protection of Buildings" Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia)]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engi-neering]. 2011. No. 7. Pp. 59–65. [In Russian]
6. V.G. Gagarin, V.V. Kozlov. *O kompleksnom pokazatele teplovoj zashchity obolochki zdaniya* [On the integrated index of thermal protection of the building envelope]. *ABOK* [Journal of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)]. 2010. No. 4. Pp. 52–60. [In Russian]
7. K.F. Fokin. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastej zdaniy* [Construction thermal engineering of building envelopes]. 5th edition, rev. Edited by Yu.A. Tabunsh-chikov, V.G. Gagarin. Moscow. *ABOK-Press* [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Ther-mal Physics ("ABOK-Press")]. 2006. 256 p. [In Russian]
8. *ELCUT: Modelirovanie elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh polej metodom konech-nykh elementov. Versiya 6.6: Rukovodstvo pol'zovatelya* [ELCUT: Finite element simula-tion of electromagnetic, thermal, and elastic fields. Version 6.6: User's Manual]. *OOO "Tor"* ["Thor", LLC]. Yekaterinburg. Izdatel'skie resheniya ["Publishing solutions" Publishers]. 2023. 290 p. [In Russian]
9. *SP 131.13330.2020* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Prac-tice of Russia) No. 131.13330.2020]. *Stroitel'naya klimatologiya (c Izm. No. 1–2)* [Construc-tion climatology (with Amendments No. 1–2)]. Date of impl.: June 25, 2021. [In Russian]
10. *GOST 30494–2011* [The State Industry Standard of Russia No. 30494–2011]. *Zdaniya zh-ilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomescheniyakh (s Popr., s Izm. №1)* [Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters (with Modification, with Amendment No. 1)]. Date of impl.: January 1, 2013. [In Russian]