

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.13 + 699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237

EDN: PQTKAL

## **РОЛЬ ТРАНСМИССИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА ЗДАНИЙ С ГРУНТОВЫМИ ОСНОВАНИЯМИ В ФОРМИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ В РЕАЛЬНЫХ ВНЕШНИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Евгений Владимирович Левин, Александр Юрьевич Окунев**

*Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук,  
г. Москва, Россия*

*Аннотация.* Актуальность. Одной из задач при строительстве и эксплуатации жилых и общественных зданий является обеспечение нормативных требований к тепловому микроклимату помещений. Его текущее состояние зависит от теплообмена здания с внешней средой и от используемого климатического оборудования. При этом теплообмен с внешней средой зависит от постоянно меняющихся внешних условий: температуры воздуха, прямой и рассеянной солнечной радиации, лучистого теплообмена с окружающими объектами, а также от нестационарного теплопереноса через грунтовые основания. Все это необходимо учитывать при эксплуатации инженерных климатических систем с целью обеспечения требуемых показателей теплового микроклимата помещений.

*Цель работы:* сравнение теплопотерь в течение годового цикла эксплуатации здания через ограждающие конструкции помещений, контактирующих и не контактирующих с грунтовыми основаниями. Задачей данных исследований являлось определение вклада величины теплопотерь через грунтовые основания в общие теплопотери через несвето-прозрачные ограждающие конструкции.

*Методы.* Исследования проведены постановкой вычислительных экспериментов с определением нестационарных величин теплообмена помещений с окружающей средой. Использована краевая задачи нестационарного теплопереноса, записанная в параметрическом виде и содержащая варьируемые критерии подобия.

*Результаты.* Исследования выполнены с использованием архивных метеорологических данных для г. Москвы за 2011 г. Установлено влияние теплообмена с грунтовым основанием на общий нестационарный теплообмен помещения для различных календарных сезонов, а также для различной ориентации наружной ограждающей конструкции помещения по сторонам света. Показано, что контакт помещения с грунтовым основанием приводит к увеличению средних за календарные сезоны теплопотерь, причем независимо от ориентации по сторонам света и параметров ограждающих конструкций. Минимальное увеличение относительных тепловых потерь (не более 18 %) имеет место зимой. Максимальное влияние контакта помещений с грунтовым основанием имеет место в летний период. Теплопотери по сравнению с не контактирующими с грунтом помещениями увеличиваются до 4 раз, и в зависимости от типа ограждающей конструкции на южном фасаде они могут оказаться до 2 раз выше, чем на северном. Для помещений, кон-

тактирующих с грунтовыми основаниями, средние за сезоны амплитуды суточных изменений теплопотерь снижаются для всех типов ограждающих конструкций.

**Ключевые слова:** здания, микроклимат помещений, нестационарный теплообмен с внешней средой, грунтовые основания, тепловые потоки, численное моделирование, критерии подобия

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук.

**Благодарности:** авторы благодарят коллектив Научно-исследовательского института строительной физики за участие в постановке проблемы, на решение которой направлены проведенные исследования.

**Для цитирования:** Левин Е.В., Окунев А.Ю. Роль трансмиссионного теплообмена зданий с грунтовыми основаниями в формировании теплового микроклимата помещений в реальных внешних метеорологических условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 222–237. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237. EDN: PQTKAL

## ORIGINAL ARTICLE

### TRANSMISSION HEAT EXCHANGE OF BUILDINGS ON SOIL FOUNDATIONS IN INDOOR MICROCLIMATE IN REAL EXTERNAL METEOROLOGICAL CONDITIONS

**Evgeny V. Levin, Alexander Yu. Okunev**

*Research Institute of Building Physics RAACS, Moscow, Russia*

**Abstract.** One of the tasks in the construction and operation of residential and public buildings is to meet the requirements for indoor microclimate. Current thermal microclimate depends on the building heat exchange with the external environment and on the climate control equipment. At the same time, the heat exchange with the external environment depends on constantly changing external conditions: air temperature, direct and diffuse solar radiation, radiant heat exchange with surrounding objects, and non-stationary heat transfer through ground foundations. All this must be taken into account by engineering climate systems in order to ensure rooms with the appropriate microclimate.

**Purpose:** The purpose of the work is to compare annual heat losses of a building through enclosing structures of rooms, both in and not in contact with ground foundations, determine the contribution of heat loss through soil foundations to overall heat losses through opaque enclosing structures.

**Methodology:** The studies include computational experiments to determine an unsteady indoor heat transfer quantities in the surrounding environment. The unsteady heat transfer boundary problem is expressed in parametric form and contains variable similarity criteria.

**Research findings:** Indoor studies are conducted at various parameters, using archival meteorological data for Moscow, 2011. The heat exchange with the soil foundation influence on the overall transient heat exchange is determined for different seasons and different orientations inside the building relative to cardinal directions. It is shown that indoor contact with the soil foundation leads to an increase in the average heat loss over seasons, regardless of the cardinal orientation and parameters of enclosing structures. The minimal increase in relative heat loss (no more than 18 %) occurs in winter. The maximum impact of the contact between rooms and soil foundation occurs in summer. Heat loss increases up to fourfold compared to rooms not in contact with the soil and, depending on the type of the enclosing structure, it can be two times higher on the southern façade than on the northern one. For rooms in contact with soil founda-

tions, the average seasonal amplitudes of daily changes in the heat loss are reduced for all types of enclosing structures.

**Keywords:** building, indoor microclimate, non-stationary heat exchange, external environment, soil foundation, heat flow, numerical modeling

**Funding:** Research was financially supported by grant from the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

**Acknowledgments:** The authors thank the staff of the Research Institute of Building Physics RAACS for their participation in formulating the research problem.

**For citation:** Levin E.V., Okunev A.Yu. Transmission Heat Exchange of Buildings on Soil Foundations in Indoor Microclimate in Real External Meteorological Conditions. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 222–237. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-222-237. EDN: PQTKAL

### Введение

Показатели микроклимата помещений жилых и общественных зданий различного назначения, включая его тепловую составляющую (тепловой микроклимат), являются нормируемыми величинами<sup>1</sup>. Сам тепловой микроклимат формируется за счет постоянно протекающего теплообмена с внешней средой и, в случае необходимости, поддерживается мощностями используемых инженерных систем нагрева и/или охлаждения воздуха.

Теплообмен помещений с внешней средой происходит через светопрозрачные и несветопрозрачные конструкции оболочки, а для первых и заглубленных этажей также через грунтовые основания. Через светопрозрачные конструкции имеют место прямые поступления в помещения солнечной энергии (инсоляция). Через светопрозрачные и несветопрозрачные конструкции также осуществляется трансмиссионный перенос теплоты. Данный вид теплопереноса происходит за счет теплопроводности и конвективного теплопереноса, одной из причин которого является отличие наружной температуры воздуха от температуры внутри помещений. Другими причинами будут изменения тепlopоступлений на поверхность ограждающей конструкции за счет прямого и рассеянного солнечного излучения, лучистого теплообмена с внешними объектами, включая поверхность грунта и небо. Каждый механизм теплообмена является принципиально нестационарным (переменным во времени) и имеет следующие глобальные масштабы: годовой периодически повторяющийся масштаб и масштабы суточных и сезонных изменений. При этом для грунтовых оснований в силу их большой инерционности основным является годовой масштаб времени, а для надземных ограждающих конструкций – преимущественно суточный. Изменения внутреннего теплового микроклимата помещений за счет внешних переменных тепловых воздействий на здания также будут происходить в пределах этих масштабов времени, а системы отопления и кондиционирования должны компенсировать эти изменяющиеся тепловые воздействия.

<sup>1</sup> ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Москва: Стандартинформ, 2011. 15 с.

К настоящему времени однозначного ответа на вопрос, каким образом в уже существующих и проектируемых зданиях должны функционировать на алгоритмическом уровне системы отопления и кондиционирования для поддержания стабильного теплового микроклимата в помещениях в условиях постоянно действующих внешних нестационарных тепловых воздействий, нет. На эту тему выполнено много работ, но все они ограничены только рядом отдельных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, которые в основном относятся к ограниченному спектру используемых на практике ограждающих конструкций зданий [1–8]. В исследованиях также практически не рассматривались различные внешние переменные метеорологические условия, соответствующие действительным.

С использованием современных расчетно-теоретических методов изучения нестационарного теплообмена такие широкомасштабные исследования, применимые к случаям использования в зданиях со значительно различными типами ограждающих конструкций, являются вполне реальными. Более того, существуют публикации [9], в которых поднимается вопрос о расширении возможностей физико-математического моделирования реального теплопереноса в строительстве. В работе указывается, что параметры микроклимата в помещениях зависят от множества факторов, как конструктивных, так и температурных параметров окружающей среды, причем большинство параметров являются нестационарными. Указывается, что для этого должны развиваться математические методы поиска численных решений уравнений, описывающих нестационарный перенос тепла, – методы конечных разностей или методы конечных элементов. На нескольких конкретных примерах авторы [9] показывают, как эти методы могут быть эффективно использованы в численных исследованиях.

В развитие данного направления авторами настоящей статьи ранее была предложена обобщенная физико-математическая модель трансмиссионного теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий, опубликованная в сборнике трудов [10]. Модель основана на решении одномерной краевой задачи нестационарного теплообмена помещения с окружающей средой, записанной в безразмерном виде с выделением ряда критериев (параметров) подобия, задаваемые величины которых могут соответствовать различным типам ограждающих конструкций зданий и различным типам тепловых воздействий и теплообмена на внутренней и внешней поверхностях ограждающих конструкций. Модель в безразмерном параметрическом виде также учитывает тепловые поступления от прямого и рассеянного солнечного излучения и лучистого теплообмена с внешней средой [11].

В работе [10] приведены результаты, полученные при изучении нестационарного теплообмена помещения здания через несветопрозрачные участки ограждающих конструкций. Исследования выполнены для полного годового периода эксплуатации здания в условиях, близких к реальным, для чего были использованы архивные метеорологические данные для средних широт территории РФ на примере Москвы. По результатам проведенных исследований сделан ряд выводов, касающихся теплопотерь через несветопрозрачные участки ограждающих конструкций различного типа в зависимости от календарного сезона и ориентации ограждающих конструкций здания по сторонам света. По-

лученные результаты могут быть отнесены к этажам здания, которые не контактируют с грунтовыми основаниями.

В то же время известно [12–15], что на первых, цокольных и других заглубленных в грунт этажах теплообмен через грунтовые основания может приводить к заметным дополнительным тепловым потерям и это должно учитываться при проектировании систем отопления и кондиционирования.

Настоящая статья является продолжением начатых в [10] работ. Целью исследований, результаты которых представлены в статье, являлось проведение сравнения теплотерь помещений для учета вклада величины теплотерь через грунтовые основания в общие теплотери помещений через несветопрозрачные ограждающие конструкции. Сравнение выполнено также в течение годового цикла эксплуатации здания при достаточно детальном моделировании внешних метеорологических условий. На основании полученных результатов могут быть сделаны выводы, насколько мощности систем отопления и кондиционирования первых и заглубленных в грунт этажей могут отличаться от соответствующих мощностей для всех других этажей.

Кроме полученных результатов исследований ниже приведены основные положения параметрической модели нестационарного теплопереноса в грунтах с выделением критериев подобия, величины которых позволяют обобщать полученные результаты на грунтовые основания различного типа. Соответствующая модель для теплопереноса в несветопрозрачных ограждающих конструкциях, как указывалось ранее, приведена в работе [10].

### Параметрическая модель нестационарного теплопереноса в грунте

Нестационарный перенос теплоты в грунтовом основании описывается уравнением для пространственно-временного изменения температуры в его объеме:

$$F_g \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} - \left( \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\tilde{T} = T / T_{\text{cr}}$  – безразмерная абсолютная температура в грунте ( $T_{\text{cr}}$  – среднегодовая абсолютная температура наружного воздуха для данной местности);  $\tilde{t} = t / N_{\Gamma}$  – безразмерное время с начала года в виде номера суток, отнесенного к количеству суток в году,  $N_{\Gamma} = 365$  сут;  $\tilde{x} = x / B'$  и  $\tilde{y} = y / B'$  – безразмерные горизонтальная и вертикальная координаты в грунте. При расчетах переноса теплоты в грунтах, в отличие от одномерной модели [10] для ограждающих конструкций, используется двухмерная модель, в которой вместо сложной конфигурации площади контакта основания здания с грунтом используется эффективная расчетная ширина здания [16]  $B' = A / (0,5P)$ , где  $A$  – площадь грунтового основания непосредственно под зданием;  $P$  – его периметр.

В уравнении теплопереноса (1) используется критерий подобия

$$F_g = (B' \rho_g c_g / N_{\Gamma}) / (\lambda_g / B'_g), \quad (2)$$

величина которого определяет инерционность различных грунтовых оснований по отношению к трансмиссионному переносу теплоты. Критерий характе-

ризует масштаб поглощения/отдачи тепловой энергии грунтовым основанием из тепловой энергии, переносимой в нем трансмиссионными тепловыми потоками при градиентах температуры, соответствующих 1 К. Обратная величина этого критерия аналогична критерию подобия Фурье  $F_0$  для нестационарного теплопереноса, определяющего вклад времени в распределение температуры внутри грунтового основания. Здесь  $\rho_g$ ,  $c_g$  и  $\lambda_g$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность грунта. Величина критерия подобия  $F_g$  для различных грунтов и эффективной ширины здания на практике может принимать значения от 0,5 до 100.

В качестве граничных условий на поверхности ограждающей конструкции, контактирующей с грунтом, и на поверхности грунта вне здания используется условие непрерывности плотности трансмиссионного теплового потока на соответствующей границе. На вертикальной плоскости симметрии здания и на вертикальных поверхностях, ограничивающих объем грунтового основания, используется условие отсутствия теплового потока. На нижней горизонтальной поверхности объема грунтового основания в зависимости от глубины ее залегания и глубины прохождения водоносного слоя может быть использовано условие изотермичности или условие отсутствия теплового потока. В том случае, когда грунтовое основание контактирует с подвижными грунтовыми водами малой или средней глубины залегания, граничное условие имеет вид

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\bar{T}_w - \tilde{T}}{R_w}. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{T}_w$  – средняя безразмерная температура водоносного слоя;

$$R_w = r_w / (B' / \lambda_w) - \quad (4)$$

критерий подобия, характеризующий отношение среднего термического сопротивления водоносного слоя к масштабной величине термического сопротивления грунта вдоль водоносного слоя. По порядку величины он может принимать значения от 0,001 до 10.

В (4)  $\lambda_w$  – теплопроводность грунта в водоносном слое, а

$$r_w \approx \frac{2}{3\lambda_w} \sqrt{\frac{2c_w}{w}} L_0 - \quad (5)$$

среднее термическое сопротивление водоносного слоя [15], в котором  $c_w$  – удельная теплоемкость водоносного слоя;  $L_0$  – длина пути, проходящего грунтовыми водами под зданием (эффективная ширина здания  $B'$  либо большая величина, учитывающая пространственные ориентации движения грунтовых вод);  $w$  – подвижность грунтовых вод, м/с.

### Результаты исследования

Для установления роли теплопотерь через грунтовые основания в тепловом балансе помещений в исследованиях рассматривались два одинаковых базовых помещения с одинаковыми стеновыми несветопрозрачными ограждаю-

щими конструкциями, одно из которых контактирует с грунтом, а другое через перекрытия – с помещениями на смежных этажах, находящихся в тех же самых тепловых условиях. Для определенности будем считать, что первое помещение расположено на первом этаже и теплообмен с грунтовым основанием происходит через его пол, расположенный на плитном фундаменте по грунту. Далее это помещение будет иметь наименование ППЭ (помещение первого этажа), а помещение, не контактирующее с грунтовым основанием, будет иметь наименование ПВЭ (помещение верхнего этажа).

Для расчетов теплообмена через несветопрозрачные ограждающие конструкции обоих помещений используется физико-математическая модель теплопереноса в виде краевой задачи, приведенной в [10], а для расчетов нестационарного теплообмена с грунтовым основанием помещения ППЭ используется уравнение теплопереноса (1) с соответствующими приведенными выше граничными условиями. При исследованиях для обоих помещений расчету подлежали изменения во времени плотности тепловых потоков на внутренней поверхности стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкций, а для помещения ППЭ рассчитывались также плотности тепловых потоков через его пол.

Для моделирования внешних нестационарных тепловых воздействий на оболочку зданий, как и в [10], применялись архивные годовые метеорологические данные для средних широт территории РФ на примере климатических условий для Москвы. Использованные метеорологические данные включали температуру наружного воздуха и облачность. Степень детализации использованных архивных данных и получаемых результатов за счет интерполяции составляла величину порядка 10 мин в масштабе реального времени.

Все расчетные исследования проведены при условии, когда в течение всего года внутри помещений системами отопления и кондиционирования поддерживается постоянная температура внутреннего воздуха  $T_{\text{вн}} = 295 \text{ K} (+22 \text{ }^\circ\text{C})$ . В этом случае полученные в результате расчетов величины переменных тепловых потоков в помещение соответствуют требуемой переменной мощности для поддержания заданной постоянной температуры, а расчеты трансмиссионного теплопереноса через стены и через грунтовое основания могут проводиться независимо.

Каждый вариант расчетов в проведенных параметрических исследованиях при варьировании параметров имел продолжительность в один календарный год в реальном времени и включал все климатические сезоны (зима, весна, лето, осень), что позволило учесть представленные в статье сезонные особенности влияния внешних тепловых воздействий на теплообмен здания с окружающей средой, а также потребности в мощностях отопления и/или кондиционирования. При этом если говорить об объемах проведенной вычислительной работы, то к нему кроме количества годовых циклов для величины каждого параметра добавляется еще 31 год в масштабе реального времени для расчета теплообмена в грунтовом основании, который требуется для достижения практически точного периодически повторяющегося процесса теплопереноса в грунте с заданной детализацией во времени. Как отмечено ранее, детализация расчетов во времени составляла не более 10 мин на фоне годового цикла расчетов.

Для проведения такого объема расчетов применялся конечно-разностный сеточный метод решения краевых задач нестационарного теплопереноса в огражда-

ющих конструкциях и в грунтовом основании, использующий явную двухшаговую по времени схему вычислений Дюфорта – Франкеля [17]. Метод является абсолютно устойчивым и явным, что позволяет эффективно проводить продолжительные в масштабах реального времени многопараметрические исследования.

При проведении исследований для получения обобщенных результатов выполнено параметрическое изучение теплообмена здания с внешней средой, где в качестве варьируемых параметров использованы величины критериев подобия, отвечающих за различные типы расположенных выше поверхности грунта стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкций здания и за различные условия теплопоступлений и теплообмена на их поверхности [10]:

$$F_{\text{инерц}} = (\delta \rho C_p / \tau_{\text{сут}}) / (\lambda / \delta) - \quad (6)$$

критерий инерционности ограждающей конструкции по отношению к трансмиссионному теплопереносу в ней. Он характеризует масштаб поглощения/отдачи тепловой энергии самой ограждающей конструкцией из тепловой энергии, переносимой в ней трансмиссионными тепловыми потоками при градиентах температуры, соответствующих 1 К. Обратная величина этого критерия, как и критерия (2), аналогична критерию подобия Фурье  $F_0$  для нестационарного теплопереноса. Данный критерий подобия может принимать значения от 0,1 до 10;

$$F_{\text{Sin}} = (\delta / \lambda) / (1 / \alpha_{\text{в}}) - \quad (7)$$

критерий подобия, характеризующий отношение термического сопротивления ограждающей конструкции к сопротивлению конвективной теплоотдачи на ее внутренней поверхности. Этот критерий подобия аналогичен критерию Нуссельта  $Nu$  для конвективного теплообмена, но учитывает трансмиссионный теплоперенос внутри ограждающей конструкции и ее теплообмен с воздухом помещения. Данный критерий подобия может принимать характерные значения от 3 до 50;

$$F_{\text{Sout}} = (\sigma T_{\text{сг}}^4) / (T_{\text{сг}} (\lambda / \delta)) - \quad (8)$$

критерий подобия внешних теплопоступлений на наружную поверхность ограждающих конструкций. Он характеризует масштаб отношения плотности теплового потока, поступающего на наружную поверхность ограждающей конструкции за счет ее облученности тепловым излучением, к плотности трансмиссионного теплового потока в ограждающей конструкции. Его характерные значения, по оценкам, составляют от 0,3 до 5,0.

В формулировке критериев подобия (6) – (8) использованы следующие обозначения:  $\delta$  – толщина ограждающей конструкции;  $\rho$  – ее массовая плотность;  $C_p$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\tau_{\text{сут}}$  – продолжительность суток в используемом для всех остальных параметров масштабе времени;  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

При проведении расчетов теплопереноса в стеновых несветопрозрачных ограждающих конструкциях использована модельная однослойная конструк-

ция, параметры которой соответствуют эквивалентной модели различных многослойных конструкций [18].

Для определенности в качестве помещений ППЭ и ПВЭ рассмотрено типовое помещение с площадью пола  $24 \text{ м}^2$  и высотой потолков  $3 \text{ м}$ . Помещение имеет одну наружную стену  $4 \times 3 \text{ м}$  ( $12 \text{ м}^2$ ). Наружная стена включает оконный проем площадью  $5 \text{ м}^2$ , который в рамках данных исследований в теплообмене не учитывается. Для этого в расчетах полагается, что оконный проем не пропускает теплоту и солнечное излучение и не обладает тепловой инерцией. При этом расчетная площадь учитываемой несветопрозрачной части ограждающей конструкции составляет  $7 \text{ м}^2$ .

При задании критерия подобия (2)  $F_g$  в уравнении (1) использованы типичные геометрические параметры здания (его эффективная расчетная ширина  $B' = 6 \text{ м}$ ) и параметры грунта:  $\rho_g = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_g = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $\lambda_g = 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . При исследованиях учитывалось, что под зданием на глубине  $10 \text{ м}$  находится водоносный слой с низкой подвижностью грунтовых вод (критерий подобия  $R_w \approx 1$ ).

Для того, чтобы установить общее влияние нестационарного теплообмена с грунтовым основанием на теплообмен помещений с внешней средой, сравниваются средние тепловые потоки  $\langle U \rangle$  (Вт) из помещений (теплопотери) через стены и пол за каждый из четырех календарных сезонов в виде отношения

$$\chi = \langle U \rangle_{\text{ППЭ}} / \langle U \rangle_{\text{ПВЭ}}. \quad (9)$$

Здесь и далее тепловой поток из помещения через ограждающие конструкции или пол имеет положительное значение. В отдельные моменты времени он может быть отрицательным, и это означает, что теплота поступает в помещение.

Как указывалось ранее, исследования проведены при условии постоянства внутренней температуры в помещении, в этом случае для первого этажа справедливо равенство  $\langle U \rangle_{\text{ППЭ}} = \langle U \rangle_{\text{ПВЭ}} + \langle U \rangle_{\text{гр}}$ , где  $\langle U \rangle_{\text{гр}}$  – средний за сезон тепловой поток, поступающий в грунт из помещения. В проведенных расчетах для исключения ошибок за счет осреднения (тепловые потоки для любого момента времени могут быть как положительными, так и отрицательными по величине) расчеты  $U_{\text{ППЭ}}$  для каждого момента времени проводились с учетом проходящего одновременно теплообмена через стеновые ограждающие конструкции и через пол. Получаемая величина (9) характеризует «среднесезонный» относительный вклад теплообмена с внешней средой через грунтовые основания в общий теплообмен помещений ППЭ.

Для проектирования «отопительных» систем значительный интерес представляют не только средние и максимальные мощности отопления и кондиционирования в каждом календарном сезоне, но также и то, в каких пределах эти мощности для каждого сезона могут изменяться в течение суток. В качестве критерия используется такая величина, как средняя за каждый сезон относительная суточная амплитуда изменений теплового баланса помещений

$$\delta = \langle (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) / 2\bar{U} \rangle. \quad (10)$$

Здесь  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  и  $\bar{U}$  – максимальная, минимальная и средняя за каждые сутки данного сезона величина теплового потока из помещения. Оператор  $\langle x \rangle$  соответствует расчету средней величины  $x$  в течение сезона. Для помещений рассматриваемых типов сравнивается ее относительная величина

$$\gamma = \delta_{\text{ППЭ}} / \delta_{\text{ПВЭ}}, \tag{11}$$

показывающая, насколько теплообмен через грунт может повлиять на требования к возможным изменениям мощности систем отопления или кондиционирования в пределах суток за сезон.

Результаты проведенных исследований для величин (9) и (11), характеризующих вклад теплообмена помещений через грунтовые основания в их общий нестационарный теплообмен с внешней средой, приведены в таблице. В ней представлены данные, полученные для 80 годовых вариантов теплообмена, соответствующих различным величинам критериев подобия (6) – (8) и различным типам помещений (ППЭ и ПВЭ). Критерий подобия теплопереноса в грунтовом основании (2) при выбранных параметрах грунта составил  $F_g = 1,52$ , что соответствует грунтовому основанию, параметры которого приведены выше. Кроме того, в таблице в качестве варьируемого параметра отдельно приведена величина термического сопротивления ограждающей конструкции  $R_T = \delta / \lambda$ , которое используется для расчетов критериев подобия  $F_{Sin}$  и  $F_{Sout}$  и имеет величины, соответствующие реальным ограждающим конструкциям в интервале 1,0–5,0 К·м<sup>2</sup>/Вт.

В проведенных исследованиях также рассматривалась возможность того, что наружные ограждающие конструкции помещения могут быть ориентированы различным образом по сторонам света. В таблице приведены данные для северной (С) и южной (Ю) их ориентации.

**Средние за сезоны относительные тепловые потоки  $\chi$  и относительная суточная амплитуда теплотерь  $\gamma$**

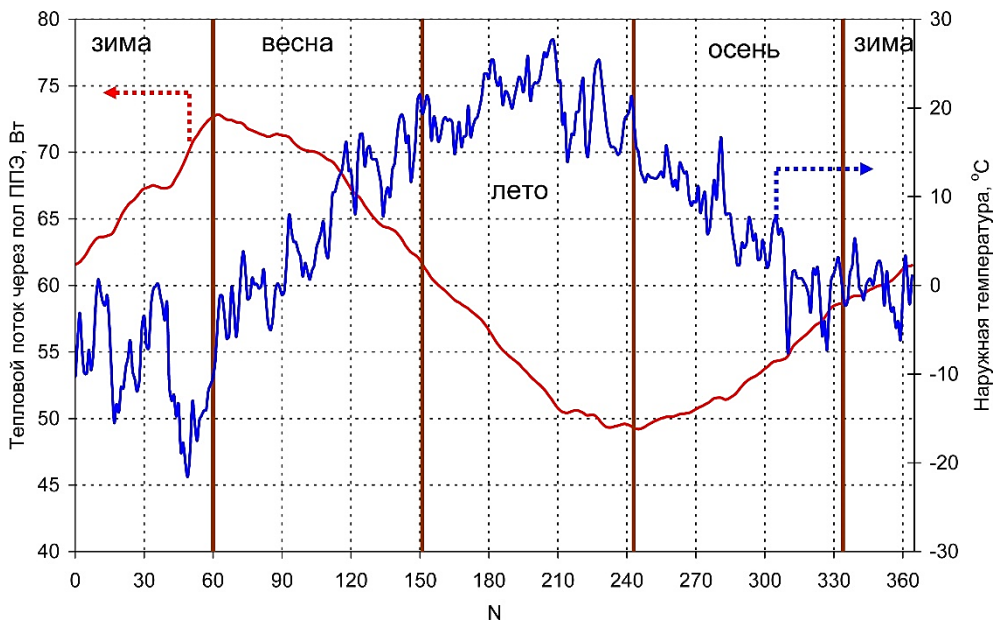
**Seasonal average relative heat fluxes  $\chi$  and relative daily heat loss amplitude  $\gamma$**

№	$F_{инерц}$	$F_{Sin}$	$F_{Sout}$	Ю, С	$R_T, \text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$	Отношение средних за сезон значений для этажей ППЭ и ПВЭ							
						Относительные тепловые потери $\chi$				Относительные суточные амплитуды теплотерь $\gamma$			
						зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
1	0,1	8,7	1,23	Ю	1	1,14	1,27	4,44	1,21	0,87	0,56	0,10	0,71
2	0,1			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,75	0,25	0,82
3	0,3			Ю		1,14	1,27	4,43	1,21	0,87	0,56	0,63	0,71
4	0,3			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,74	0,24	0,82
5	1			Ю		1,14	1,27	4,28	1,21	0,87	0,56	0,81	0,03
6	1			С		1,12	1,20	1,64	1,17	0,88	0,75	0,20	0,82
7	3			Ю		1,14	1,28	4,02	1,21	0,87	0,61	0,27	0,68
8	3			С		1,12	1,20	1,63	1,17	0,88	0,75	0,20	0,82
9	10			Ю		1,14	1,27	3,99	1,21	0,87	0,64	0,57	0,62
10	10			С		1,12	1,20	1,62	1,17	0,88	0,76	0,16	0,82

Окончание таблицы  
End of table

№	$F_{инерц}$	$F_{Sin}$	$F_{Sout}$	Ю, С	$R_{г, К}$ , м <sup>2</sup> /Вт	Отношение средних за сезон значений для этажей ППЭ и ПВЭ							
						Относительные тепловые потери $\chi$				Относительные суточные амплитуды теплопотерь $\gamma$			
						зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
11	0,1	17	2,46	Ю	2	1,16	1,30	4,04	1,24	0,86	0,55	0,36	0,70
12	0,1			С		1,15	1,25	1,88	1,20	0,86	0,69	0,16	0,79
13	0,3			Ю		1,16	1,30	4,04	1,24	0,86	0,55	0,35	0,70
14	0,3			С		1,15	1,25	1,88	1,20	0,86	0,69	<u>0,03</u>	0,79
15	1			Ю		1,16	1,30	4,00	1,24	0,85	0,55	<u>1,42</u>	0,71
16	1			С		1,15	1,25	1,87	1,20	0,86	0,69	0,21	0,79
17	3			Ю		1,16	1,31	3,90	1,24	0,85	0,57	0,42	0,71
18	3			С		1,15	1,25	1,85	1,20	0,86	0,69	0,20	0,79
19	10			Ю		1,16	1,31	3,80	1,24	0,85	0,60	1,07	0,68
20	10			С		1,14	1,25	1,82	1,20	0,86	0,71	0,25	0,79
21	0,1	26	3,69	Ю	3	1,17	1,32	3,90	1,25	0,85	0,54	0,25	0,70
22	0,1			С		1,16	1,27	2,01	1,22	0,85	0,67	0,31	0,78
23	0,3			Ю		1,17	1,32	3,90	1,25	0,85	0,54	<u>0,09</u>	0,70
24	0,3			С		1,16	1,27	2,01	1,22	0,85	0,66	0,20	0,77
25	1			Ю		1,17	1,32	3,88	1,25	0,85	0,54	0,29	0,70
26	1			С		1,16	1,27	1,99	1,22	0,85	0,66	0,25	0,77
27	3			Ю		1,17	1,32	3,84	1,25	0,84	0,55	<u>1,21</u>	0,70
28	3			С		1,16	1,27	1,97	1,22	0,85	0,67	0,25	0,77
29	10			Ю		1,17	1,32	3,74	1,25	0,84	0,58	0,60	0,69
30	10			С		1,16	1,27	1,93	1,22	0,85	0,68	0,25	0,77
31	0,1	44	6,15	Ю	5	1,18	1,33	3,79	1,26	0,84	0,52	1,06	0,70
32	0,1			С		1,17	1,30	2,16	1,24	0,84	0,64	0,13	0,77
33	0,3			Ю		1,18	1,33	3,79	1,26	0,84	0,52	1,00	0,70
34	0,3			С		1,17	1,30	2,15	1,24	0,84	0,64	<u>5,28</u>	0,76
35	1			Ю		1,18	1,33	3,78	1,26	0,84	0,52	<u>2,46</u>	0,70
36	1			С		1,17	1,30	2,13	1,23	0,84	0,64	0,41	0,76
37	3			Ю		1,18	1,33	3,76	1,26	0,83	0,53	0,35	0,70
38	3			С		1,17	1,29	2,10	1,23	0,84	0,64	0,23	0,76
39	10			Ю		1,18	1,33	3,70	1,26	0,83	0,55	0,29	0,69
40	10			С		1,17	1,29	2,05	1,23	0,84	0,65	0,31	0,76

Для лучшего понимания представленных в таблице данных на рисунке приведены полученные расчетами результаты для изменения в течение года теплового потока из помещения через пол ППЭ в грунтовое основание, а также изменения температуры наружного воздуха для использованных метеорологических условий.



Изменения наружной температуры и теплового потока через пол ППЭ в грунтовое основание в зависимости от номера суток в году  $N$   
 Changes in outdoor temperature and heat flow through the floor into soil foundation depending on the day number  $N$

### Обсуждение полученных результатов

В результате проведенных исследований установлено, что в помещениях типа ПВЭ и ППЭ за счет внешних нестационарных тепловых воздействий на несветопрзрачные участки оболочки зданий в реальных метеорологических условиях г. Москвы в каждом календарном сезоне в среднем за сезон имеют место преимущественно только тепловые потери из помещений. Лишь в летнее время могут быть теплопоступления в течение непродолжительного времени в течение отдельных суток.

Анализ результатов, представленных в таблице, позволяет сделать следующие основные выводы о влиянии на относительные тепловые потери теплообмена через грунтовые основания:

1) для ограждающих конструкций практически всех типов, различающихся как по их инерционности, так и по термическому сопротивлению, присутствие грунтовых оснований приводит к увеличению средних за сезоны тепловых потерь для помещений ППЭ (первые и заглубленные этажи, контактирующие с грунтом) по отношению к другим этажам здания, причем независимо от ориентации здания по сторонам света;

2) минимальное увеличение относительных тепловых потерь (не более 18 %) имеет место в зимний годовой период. При этом ориентация фасада здания по сторонам света практически не сказывается на величине тепловых потерь;

3) в периоды межсезонья (весна, осень) относительные тепловые потери примерно в два раза выше, чем в зимнее время, и их величины начинают за-

метно зависеть от ориентации здания. На южной стороне увеличение относительных тепловых потерь больше, чем на северной;

4) максимальное влияние присутствия грунтового основания имеет место в летний период. Тепловые потери для помещений ППЭ первых и заглубленных этажей могут оказаться до 4 раз больше, чем для помещений, расположенных на более высоких этажах;

5) в летний период на относительные тепловые потери проявляется сильное влияние ориентации фасада здания по сторонам света. Для фасадов с южной ориентацией относительные тепловые потери в зависимости от тепловой инерции и термического сопротивления ограждающей конструкции могут оказаться до 2 раз больше, чем для северного фасада.

Что касается средних за сезоны относительных суточных амплитуд изменения тепловых потерь из помещений, то для них влияние теплообмена через грунтовые основания проявляется следующим образом:

а) присутствие грунтовых оснований для помещений ППЭ по сравнению с помещениями ПВЭ приводит к снижению суточных амплитуд для всех типов ограждающих конструкций;

б) минимальное снижение имеет место в зимний сезон, а максимальное – в летний, причем в летний сезон имеет место достаточно заметная зависимость от тепловой инерции ограждающей конструкции. Эта зависимость почти не проявляется в зимний сезон и характерна гораздо в меньшей степени для весеннего и осеннего сезонов;

в) в летний сезон также имеет место то, что средние за сезон суточные амплитуды сильно зависят от ориентации фасада по сторонам света, причем эта зависимость достаточно чувствительна по отношению к инерционности ограждающей конструкции. По-видимому, эта зависимость связана с тем, что в летнее время проявляется сильное влияние теплопоступлений от солнечного излучения, а теплопоступления от грунтового основания минимальны (см. рисунок);

г) в летний и осенний сезоны по отдельным результатам расчетов величина  $\gamma$  принимает аномальные значения, которые выделяются из общих закономерностей (см. таблицу, числа, выделенные подчеркиванием). Это связано с тем, что при данном сочетании величин безразмерных критериев подобия (инерционности ограждающих конструкций и тепловых воздействий) в этих сезонах могут присутствовать такие сутки, в течение которых среднесуточная величина теплопотерь близка к нулю (на два-три порядка меньше чем в остальные сутки), что может реализовываться как для ППЭ, так и для ПВЭ и в основном связано с нестационарностью реальных внешних тепловых воздействий.

### Заключение

В рамках настоящей статьи приведены математическая модель и результаты численных исследований нестационарного теплообмена помещений в течение года с окружающей средой для двух типов помещений: контактирующих и не контактирующих с грунтовыми основаниями. Исследования проведены с целью сравнения теплопотерь помещений для учета вклада величины теплопотерь через грунтовое основание в общие теплопотери помещения через нестационарные ограждающие конструкции. Исследования выполнены для

реальных метеорологических условий, определяющих нестационарный годовой теплообмен зданий с внешней средой для средних широт территории РФ на примере г. Москвы и учитывают изменения температуры наружного воздуха, конвективный и лучистый теплообмен, а также прямое и рассеянное солнечное излучение при действительных условиях облачности.

Исследования выполнены на основе физико-математического моделирования нестационарного теплопереноса в ограждающих конструкциях и грунтовых основаниях и постановки цикла вычислительных экспериментов.

По результатам исследований установлены влияние внешних естественных тепловых воздействий на здания на тепловые потери помещений через несветопрозрачные ограждающие конструкции и вклад в эти тепловые потери нестационарного теплопереноса через грунтовые основания. Показано влияние на величины тепловых потерь ориентации наружной стены помещения по сторонам света и календарного годового сезона. В частности, установлено, что контакт помещения с грунтовым основанием приводит к увеличению средних за календарные сезоны теплопотерь, причем независимо от ориентации по сторонам света и параметров ограждающих конструкций. Одновременно с этим средние за сезоны амплитуды суточных изменений теплопотерь снижаются для всех типов ограждающих конструкций.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Valancius K., Skrinška A.K., Paulauskaitė S. Investigation of unsteady heat transfer process in an one-cell building // Journal of Civil Engineering and Management. 2006. V. 12. № 1. P. 97–101.
2. Хуторной А.Н., Кузин А.Я., Цветков Н.А., Мирошниченко Н.Т., Колесникова А.В. Нестационарный пространственный теплоперенос в неоднородной керамзитобетонной стене // Известия ТПУ. 2006. Т. 309. № 4. С. 113–117.
3. Панферов В.И., Анисимова Е.Ю., Нагорная А.Н. К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2006. № 14. С. 128–133.
4. Захаревич А.Э. Особенности формирования микроклимата отапливаемых помещений // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. С. 73–85.
5. Дячек П.И., Захаревич А.Э. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. С. 34–47.
6. Тарасова В.В. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8 (часть 2). С. 265–269.
7. Overen O.K., Meyer E.L., Golden M. Perimeter Walls Solar Heat Gain, a Mechanism for Building Design // Proceedings: 11th Built Environment Conference, 6–8 August. Durban, South Africa, 2017. ISBN 978-0-620-76406-3.
8. Мерциев А.А., Головинский П.А., Свиринов М.В., Семенов А.С. Моделирование нестационарного теплового режима помещения с деревянными ограждающими конструкциями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49
9. Дячек П.И., Макаревич С.А., Захаревич А.Э., Ливанский Д.Г. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 143–147.
10. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Нестационарный теплообмен помещений с внешней средой через несветопрозрачные ограждающие конструкции // Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение, надежность строительных конструкций и экологическая безопасность. Искусственный интеллект : Международная научная конференция XV Акаде-

- мические чтения, посвященные памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, Москва, 1–3 июля 2025 г. Москва, 2025. С. 333–344.
11. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Лучистый теплообмен ограждающих конструкций зданий с окружающей средой // Жилищное строительство. 2023. № 6. С. 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-38-45
  12. Spiga M., Vocale P. Effect of Floor Geometry on Building Heat Loss Via the Ground // Heat Transfer Engineering. 2014. V. 35. P. 1520–1527. DOI: 10.1080/01457632.2014.897560
  13. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Численные исследования нестационарного теплопереноса в основаниях зданий. Отапливаемый заглубленный этаж // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 6. С. 55–57.
  14. Levin E.V., Okunev A.Yu. Nonsteady Heat Loses to the Ground from a Building with Heated Underground Floor or Slab on Ground // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079 (4). Article 042074. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042074
  15. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Численные исследования нестационарного теплопереноса в основаниях зданий. Влияние грунтовых вод // Технологии текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 216–223.
  16. Anderson B.R. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on ground floor // Building and Environment. 1991. V. 26. P. 405–415.
  17. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / пер. с англ. В.А. Гущина, В.Я. Митницкого. Москва : Мир, 1980. 616 с.
  18. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Эквивалентная модель многослойных ограждающих конструкций для расчетов нестационарного теплопереноса // Строительные материалы. 2025. № 6. С. 14–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-836-6-14-19

## REFERENCES

1. Valancius K., Skrinska A.K., Paulauskaitė S. Investigation of Unsteady Heat Transfer Process in an One-Cell Building. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006; 12 (1): 97–101.
2. Khutornoj A.N., Kuzin A.Ya., Tsvetkov N.A., Miroshnichenko N.T., Kolesnikova A.V. Nonstationary Spatial Heat Transfer in a Nonuniform Expanded Clay Wall. *Izvestiya TPU*. 2006; 17 (4): 113–117. (in Russian)
3. Panferov V.I., Anisimova E.Yu., Nagornaya A.N. Towards the Theory of Mathematical Modeling of Building Thermal Conditions. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006; (14): 128–133. (in Russian)
4. Zaharevich A.E. Microclimate Formation in Heated Rooms. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG*. 2009: 73–85. (in Russian)
5. Dyachek P.I., Zaharevich A.E. Microclimate Simulation in Heated Rooms. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG*. 2009: 34–47. (in Russian)
6. Tarasova V.V. Mathematical Modeling of Unsteady Thermal Processes in Building Enclosing Structures. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016; (8 (part 2)): 265–269. (in Russian)
7. Overen O.K., Meyer E.L., Golden M. Perimeter Walls Solar Heat Gain, a Mechanism for Building Design. In: *Proc. 11th Built Environment Conf.* 6–8 August 2017. Durban, South Africa. ISBN 978-0-620-76406-3.
8. Mershchiev A.A., Golovinski P.A., Svirin M.V., Seminenko A.S. Simulation of a Non-Stationary Thermal Mode of Premise with Wood Enclosing Structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 8: 35–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-35-49 (in Russian)
9. Dyachek P.I., Makarevich S.A., Zaharevich A.E., Livanskij D.G. Mathematical Methods in Heating, Ventilation and Air Conditioning. *Vestnik MGSU*. 2011; (7): 143–147. (In Russian)
10. Levin E.V., Okunev A.Yu. Non-Stationary Heat Exchange of Rooms with External Environment Through Non-Translucent Enclosing Structures. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of construction. Reliability of building structures. Energy Efficiency. Environmental safety. Artificial intelligence'*, 1–3 July 2025. Moscow. ISBN 978-5-902630-23-4. (in Russian)
11. Okunev A.Yu., Levin E.V. Radiant Heat Exchange of Building Enclosing Structures with the Environment. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2023, (6): 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-38-45 (In Russian)
12. Marco Spiga, Pamela Vocale. Effect of Floor Geometry on Building Heat Loss Via the Ground. *Heat Transfer Engineering*. 2014; 35. (18): 1520–1527. DOI: 10.1080/01457632.2014.897560

13. Okunev A.Yu., Levin E.V. Numerical Studies of Unsteady Heat Transfer in Building Foundations. Heated recessed floor. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2019; (6): 55–57. (In Russian)
14. Levin E., Okunev A. Nonsteady Heat Loses to the Ground from a Building with Heated Underground Floor or Slab on Ground. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1079 (4). Article 042074. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042074
15. Levin E.V., Okunev A.Yu. Numerical Studies of Unsteady Heat Transfer in Building Foundations. Groundwater Effect. *Tekhnologii tekstil'noj promyshlennosti*. 2019; 4 (382): 216–223. (In Russian)
16. Anderson B.R. Calculation of Steady-State Heat Transfer Through a Slab-On Ground Floor. *Building and Environment*. 1991; 26: 405–415.
17. Rouch P. Computational Fluid Dynamics. Moscow: Mir, 1980. 616 p. (Russian translation).
18. Okunev A.Yu., Levin E.V. An Equivalent Model of Multilayer Enclosing Structures for Calculations of Unsteady Heat Transfer. *Stroitel'nye materialy*. 2025; (6): 14–19. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-836-6-14-19 (In Russian)

#### Сведения об авторах

Левин Евгений Владимирович, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, evlev@list.ru

Окунев Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, гл. научный сотрудник, Научно-исследовательский института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21, okunevay@gmail.com

#### Authors Details

Evgeny V. Levin, PhD, Chief Researcher, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, evlev@list.ru

Alexander Yu. Okunev, PhD, Chief Researcher, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, okunevay@gmail.com

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authors contributions

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025  
Одобрена после рецензирования 01.11.2025  
Принята к публикации 02.02.2026

Submitted for publication 08.10.2025  
Approved after review 01.11.2025  
Accepted for publication 02.02.2026