

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING (HVAC), LIGHTING SYSTEMS AND GAS NETWORKS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 1. С. 142–156.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (1): 142–156.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156

EDN: OQCXZQ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ С ЛЕГКИМИ ВЕНТИЛИРУЕМЫМИ ФАСАДАМИ И КРОВЛЯМИ

Александр Юрьевич Окунев, Евгений Владимирович Левин

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

Аннотация. *Актуальность.* Ограждающие конструкции зданий находятся в постоянно меняющихся внешних тепловых условиях, это приводит к изменениям внутреннего теплового микроклимата помещений, что необходимо учитывать при проектировании тепловой защиты зданий и инженерных систем отопления, вентиляции и кондиционирования. При этом оболочки зданий могут содержать вентилируемый фасад на отnose и/или кровлю с вентилируемым зазором. В большинстве известных результатов исследований и методик расчета теплопереноса через такие конструкции, в силу сложности его механизма, недостаточно полно и точно учитывается нестационарность внешних тепловых воздействий. Причиной является невысокая эффективность и точность используемых методик расчета.

Цель выполненных исследований – создание эффективной физико-математической модели, позволяющей проводить расчеты нестационарного теплопереноса через стеновые ограждающие конструкции и покрытия, содержащие легкие фасады с вентилируемым зазором.

Методы. Для проведения расчетов разработана комбинированная аналитическая и численная модель теплопереноса через ограждающие конструкции и покрытия, содержащие вентилируемый зазор. Модель включает итерационный расчет нестационарного

переноса тепла в вентилируемом зазоре с использованием уравнений «мгновенного» теплового баланса в вентилируемой прослойке с учетом конечно-разностного детального расчета нестационарного переноса теплоты в ограждающей конструкции.

Результаты. Результаты, получаемые с использованием разработанной модели, показывают хорошее совпадение с известными экспериментальными и расчетными данными. В частности, для апробации модели рассмотрен случай теплопоступлений в помещение через легкий вентилируемый фасад и при его отсутствии. Показано, что в летний период использование вентилируемого фасада, несмотря на незначительное изменение сопротивления теплопередаче, позволяет значительно сократить теплопоступления в помещение.

Ключевые слова: моделирование, теплоперенос, тепловая защита, теплопоступления, вентилируемая прослойка, фасад, кровля

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

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

Для цитирования: Окунев А.Ю., Левин Е.В. Моделирование нестационарного теплообмена через ограждающие конструкции с легкими вентилируемыми фасадами и кровлями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 142–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156. EDN: OQCXZQ

ORIGINAL ARTICLE

MODELING OF UNSTEADY HEAT TRANSFER THROUGH BUILDING ENVELOPES WITH LIGHT VENTILATED FACADES AND ROOFS

Alexander Yu. Okunev, Evgeny V. Levin

Research Institute of Structural Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Science, Moscow, Russia

Abstract. Enclosing structures of buildings constantly change external thermal conditions, which leads to changes in the internal thermal microclimate of premises, which must be taken into account when designing thermal protection of buildings and engineering systems for heating, ventilation and air conditioning. Building envelopes contain ventilated facades and/or roofs with a ventilated gap. In most known research results and calculation methods of the heat transfer through structures is not fully and accurately taken into account due to the complexity of its mechanism, non-stationary external thermal effects. The reason is the low efficiency and accuracy of calculation methods.

Purpose: The creation of the effective physical and mathematical model that allows calculating non-steady heat transfer through wall enclosures and coatings containing light facades with a ventilated gap.

Methodology: A combined analytical and numerical model is proposed for the heat transfer through wall enclosing structures and coatings containing a ventilated facade. The model includes an iterative calculation of non-stationary heat transfer in a ventilated gap using balance equations of non-stationary heat in a ventilated layer, taking into account the finite-difference detailed calculation of non-stationary heat transfer in the enclosing structure.

Research findings: Based on the proposed model, good agreement is shown for experimental data and theoretical calculations. For the model testing, the heat gain into the room through

a light ventilated facade and in its absence are considered. It is shown that in summer, the ventilated facade allows for a significant heat reduction in the room, despite an insignificant change in the heat transfer resistance.

Keywords: modeling, heat transfer, insulation, heat gain, ventilated gap, facade, roof

Funding: This work was financially supported by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

Acknowledgments: The authors like to express their gratitude towards the research team of Research Institute of Structural Physics RAACS for providing valuable comments and discussions.

For citation: Okunev A.Yu., Levin E.V. Modeling of Unsteady Heat Transfer through Building Envelopes with Light Ventilated Facades and Roofs. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 142–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-142-156. EDN: OQCXZQ

Введение

Многослойные ограждающие конструкции, в том числе с наружным слоем эффективного утепления, часто содержат вентилируемые прослойки между покрытием фасада и непосредственно оболочкой здания, ограждающей внутренние помещения от окружающей среды. Использование вентилируемых прослоек является одним из эффективных технических решений тепловой защиты зданий, обеспечивая необходимый тепловлажностный режим конструкций. Такие вентилируемые конструкции могут быть как стеновыми, так и кровельными. При этом важным является достаточно подробное изучение тепловых процессов, протекающих в подобных вентилируемых системах, и их влияние на текущее состояние теплового микроклимата в помещениях зданий.

В работе [1] представлен обзор исследований по ограждающим конструкциям зданий, содержащим внутренние воздушные слои в стенах, окнах, крышах. В данном обзоре имеется более 200 ссылок на результаты исследований различных систем с воздушными прослойками. За исключением натуральных экспериментальных исследований, которые в основном носят частный характер и трудно поддаются обобщению, имеются также и более общие расчетно-теоретические результаты. Например, в работе [2] приводится схема расчета температуры воздуха, его скорости и термического сопротивления воздушной прослойки. В исследовании [3] описана методика расчета тепловой защиты замкнутых воздушных прослоек с учетом коэффициентов излучения отражающих поверхностей, установленных в прослойке. В работе [4] приведены результаты исследования теплопритоков внутрь зданий с использованием легких (неутепленных) кровель с воздушным вентилируемым зазором. В работе [5] рассматривались также и более сложные системы организации покрытия. Это покрытия, построенные по схеме: кровля – вентилируемая прослойка – утеплитель с зеркальной поверхностью. В таком покрытии лучистый теплообмен в прослойке снижается за счет отражения зеркальной поверхностью, что приводит к повышению теплозащитных свойств конструкции.

К настоящему времени большинство выполненных исследований ограничено рассмотрением стационарного теплопереноса в вентилируемых фасадах, в связи с чем ответ на вопрос, каким образом тепловые процессы в венти-

лируемых прослойках могут в реальных условиях внешних переменных во времени тепловых воздействий повлиять на текущий тепловой микроклимат в помещениях, в значительной степени отсутствует. Основная причина заключается в том, что для решения данной задачи в вентилируемом фасаде требуется одновременное рассмотрение сильно отличающихся физических процессов теплопереноса: нестационарный трансмиссионный перенос тепла в основной оболочке здания, который является сравнительно медленным по отношению к внешним тепловым воздействиям на фасад и протекает за счет механизма теплопроводности; конвективный и лучистый переносы теплоты внутри воздушной прослойки, величины которых быстро реагируют на внешние тепловые воздействия. Такая совместная задача относительно несложно формализуется, а ее решение может быть реализовано численно с использованием конечных разностей. При этом лимитирующая величина последовательных шагов по времени, на которых должно находиться решение, определяется быстропротекающими процессами в воздушной прослойке и на фасаде здания. Требуемые шаги по времени оказываются настолько малыми, что расчеты только одного варианта нестационарного теплообмена здания с внешней средой в течение периода времени, например, в одни сутки (характерный период времени внешних тепловых воздействий на здание) могут потребовать неоправданно больших ресурсов вычислительной техники. В таких условиях говорить о каких-либо масштабных расчетных исследованиях по оптимизации тепловой защиты зданий в реальных условиях не приходится.

Целью исследования является разработка эффективной физико-математической модели, позволяющей проводить расчеты нестационарного теплопереноса через стеновые ограждающие конструкции и покрытия, содержащие легкие фасады с вентилируемым зазором.

Представленная в настоящей статье модель разработана для широко распространенных в строительстве легких фасадных систем и кровель, которые отделены от несущей оболочки здания с высокой тепловой инерцией вентилируемой воздушной прослойкой. Легкая фасадная система или кровля выполнены на отnose от оболочки здания, включают в себя покрытие с малой тепловой инерцией и практически не имеют значительной тепловой защиты (например, металл, тонкий пластик, тонкостенное дерево или камень и пр.).

Для проведения расчетов нестационарного теплообмена между помещениями здания и внешней средой предложена физико-математическая модель, основанная на комбинировании аналитических расчетов теплопереноса в вентилируемом фасаде и численных расчетов нестационарного конвективного теплопереноса в ограждающих конструкциях. Аналитические расчеты, в силу малой тепловой инерции вентилируемого фасада, основаны на итерационном решении уравнений «мгновенного» теплового баланса в воздушной прослойке. При этом в воздушной прослойке в качестве граничных тепловых условий на ограждающей конструкции используется точное численное решение для уравнений нестационарного теплообмена между вентилируемым фасадом и помещениями, протекающего в высоко инерционной ограждающей конструкции.

Используемая в модели принципиальная схема фасада с плоской вентилируемой прослойкой приведена на рисунке. Наружный и внутренний воздух

От внутренней поверхности покрытия 1 в прослойку поступает поток теплоты с плотностью $J(t)_1$, который зависит от времени, и в общем случае за счет тепловой инерции его мгновенные значения могут отличаться от мгновенных значений плотности потока $J_{\text{фас}}$, поступающего на наружную поверхность покрытия.

Температура T_2 соответствует температуре наружной поверхности оболочки здания (внутренней поверхности вентилируемого зазора). Ее величина, как и величина температуры T_1 , также будет зависеть от времени, но к этой зависимости добавляется еще и зависимость от координаты x , это связано с тем, что по мере движения воздуха в прослойке его температура меняется за счет теплообмена с внешним покрытием 1 и теплообмена с помещением здания через оболочку 2 , т. е. $T_2 = T(x, t)_2$. Из прослойки на наружную поверхность оболочки здания поступает поток тепла с плотностью J_2 , который, как и температура T_2 , зависит от времени и от продольной координаты x . В результате теплообмена между наружной поверхностью оболочки 2 и внутренним воздухом помещения на внутренней поверхности оболочки формируется нестационарное поле температуры $T(x, t)_3$ и плотности теплового потока $J(x, t)_3$. Мгновенная величина $J(x, t)_2$ не совпадает с $J(x, t)_3$, поскольку в оболочке 2 за счет нестационарности теплообмена постоянно протекают процессы накопления, отдачи и перераспределения в объеме тепловой энергии.

Прослойка является открытой с обеих сторон. На входе в нее поступает воздух с температурой $T_{\text{вх}}$ и поток тепла $Q_{\text{вх}}$, Вт, а температура выходящего воздуха равна $T_{\text{вых}}$ и поток тепла $Q_{\text{вых}}$.

Задачей расчетов является: определить температурное поле $T(x, t)_3$, пространственно-временное распределение плотности потока $J(x, t)_3$ и поток тепла $Q(t)_{\text{вых}}$, уносимый выходящим из прослойки воздухом в зависимости от существующих величин тепловых воздействий на фасад $J(t)_{\text{фас}}$ и $T(t)_{\text{нар}}$. Для этого используется физико-математическая модель, описывающая нестационарный перенос тепла в двух связанных между собой граничными условиями областях, входящих в данную систему. Первая из этих областей (назовем ее «конвективная область») включает в себя внешнее покрытие вентилируемой прослойки 1 и ее внутреннюю воздушную часть 3 . Вторая область («трансмиссионная область») включает оболочку здания 2 и внутренний объем в помещении, между которыми имеет место нестационарный теплообмен.

В предлагаемой физико-математической модели в «конвективной области» для исключения сложных газодинамических расчетов используются следующие допущения о характере протекающих процессов:

1. Поскольку фасадная система с воздушной прослойкой является «легкой», то температура наружной части покрытия 1 близка к температуре его внутренней части T_1 (здесь и далее см. рисунок).

2. Рассматриваются воздушные прослойки, в которых их длина X_m много больше толщины h . В этом случае сложными трехмерными газодинамическими течениями внутри прослойки в теплопереносе можно пренебречь и заменить их одномерным течением, в качестве характеристик которого используются средняя скорость воздуха по толщине прослойки $V(x)$ и его средняя температура $\bar{T}(x)$. При этом должно учитываться, что величина \bar{T} отличается от величин T_1 и T_2 на границах прослойки.

Результаты

В рамках рассмотренных условий принято, что если в воздушной прослойке в направлении ее оси x в какой-то момент времени выделить слой воздуха малой длины Δ_x (см. рисунок), то тепловой баланс в объеме этого слоя можно записать в виде

$$\begin{cases} \delta Q_{//} = B\Delta_x (J_1 - J_2); \\ J_1 = L_1 (T_1 - \bar{T}) + \sigma \varepsilon_{\text{прив}} (T_1^4 - T_2^4); \\ J_2 = L_2 (\bar{T} - T_2) + \sigma \varepsilon_{\text{прив}} (T_1^4 - T_2^4). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь L_1 и L_2 – коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях внутри прослойки, Вт/(м²·К); $\delta Q_{//}$ – изменение среднего по сечению продольного теплового потока, переносимого воздухом (далее конвективного теплового потока), Вт; B – ширина воздушной прослойки, м; $\varepsilon_{\text{прив}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$ – приведенный коэффициент излучения поверхностей на границах в прослойке; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты излучения каждой поверхности воздушной прослойки с учетом их формы [7]; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

В случае легкого фасада принимаем, что для каждого момента времени и для каждой точки координаты x в силу малой тепловой инерции величина J_1 равна плотности теплового потока $J_{\text{фас}}$, поглощаемого фасадом. При этом величина плотности теплового потока на наружной стороне зависит от наружных условий и температуры фасада T_1 .

Плотность потока $J(x, t)_2$ определяет поступление тепла на оболочку 2 здания и его дальнейший трансмиссионный перенос через оболочку. Его величина соответствует нестационарному градиенту температуры в оболочке 2 вблизи ее поверхности ($y > 0$):

$$J_2 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала оболочки здания, Вт/(м·К).

В уравнениях (1) принято, что средняя температура воздуха \bar{T} , его плотность ρ и средняя скорость V не меняются по толщине h и зависят только от координаты x и времени. Эта зависимость определяется изменениями во времени температуры T_1 и тем, что теплота, поступающая в воздух от наружного покрытия I , приводит к изменению средней температуры воздуха и, как следствие, к изменению его плотности и скорости за счет того, что массовый расход воздуха вдоль прослойки является постоянной величиной:

$$\rho V = \text{const}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Изменение среднего по сечению конвективного теплового потока в (1) будет определяться как

$$\delta Q_{//} = Bh\rho VC_v (\bar{T}_- - \bar{T}_+), \quad (4)$$

где C_v – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

При этом плотность воздуха можно выразить из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{PM}{RT}, \quad (5)$$

где P – давление воздуха, Па; $M = 29$ г/моль – молярная масса воздуха; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Разделив теперь воздушную прослойку на множество таких же параллельных воздушных слоев с толщиной Δ_x и для каждого из них используя уравнение теплового баланса (1), получаем систему разностных уравнений для расчета приращений продольного теплового потока в воздухе $\delta Q_{//}$ по длине прослойки в зависимости от изменяющейся во времени температуры $T_1(t)$ и температуры входящего в прослойку наружного воздуха $T_{вх}(t)$.

Для вынужденной конвекции за счет перепада давления воздуха между входом и выходом из прослойки необходимо учитывать потери давления в канале прослойки. В свою очередь, плотность воздуха и скорость его потока также должны зависеть от перепада давления и температуры. Для учета этих зависимостей необходимо знать потери давления, существующие за счет сил вязкого трения в канале. Такие зависимости представлены формулами, полученными с использованием серии вычислительных экспериментов по расчетам течения вязкого газа:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dx} = KV^{1,78677}; \\ K = \frac{24,494}{h^{1,1757}}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь величины коэффициентов соответствуют скорости V в м/с и толщине прослойки h в мм. Температура воздуха в воздушной прослойке по мере движения воздуха меняется на единицы, в отдельных случаях – на десятки градусов. Соответственно, плотность воздуха меняется на единицы и доли единиц

процентов, формула (5). Этот факт позволяет упростить решение системы уравнений, задавая скорость воздуха в продольном направлении постоянной, соответствующей средней температуре воздуха между входом и выходом из канала:

$$\langle \bar{T} \rangle = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}. \quad (7)$$

Здесь и далее оператор $\langle \rangle$ означает осреднение соответствующей величины по длине прослойки.

В этом случае $V(x, t) \approx \langle V \rangle$, и первое уравнение системы (6) переписывается в виде

$$P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} = X_m K \langle V \rangle^{1,78677}, \quad (8)$$

а из уравнений (4) и (1) можно получить выражение для нахождения температуры на выходе из объема длиной Δ_x :

$$\bar{T}_- = \frac{\Delta_x (J_1 - J_2)}{h \langle \rho \rangle \langle V \rangle C_B} + \bar{T}_+. \quad (9)$$

В системе (1) неопределенными являются коэффициенты теплоотдачи L , которые в общем случае зависят от скорости V , температуры \bar{T} и, самое главное, от характера течения воздуха в прослойке.

Для нахождения коэффициентов теплоотдачи используем безразмерные критерии подобия, которые часто применяются при описании процессов в теплообменных газожидкостных системах [8].

Поток воздуха в вентилируемой прослойке может быть за счет вынужденной продольной конвекции, за счет свободной конвекции, а также за счет их сочетаний. Вынужденная конвекция протекает за счет перепада давления между входом и выходом прослойки. Свободная конвекция протекает под действием подъемных (гравитационных) сил в воздухе за счет изменения его плотности из-за разницы температуры по длине канала прослойки.

На теплоперенос внутри воздушной прослойки также оказывает влияние характер течения – ламинарный или турбулентный. При турбулентном течении теплообмен в равных условиях всегда гораздо выше. Критерием перехода от одного течения к другому является величина числа Рейнольдса, которое для плоской прослойки имеет вид

$$\text{Re} = \frac{\langle V \rangle d}{\nu}, \quad (10)$$

где $d = 2h$ – эквивалентная толщина прослойки, м; $\nu \approx 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с – кинематическая вязкость воздуха.

При этом:

- ламинарный режим течения характеризуется величиной числа Re до 2300;
- при значении числа Re от 2300 до 10 000 режим течения является переходным;

- турбулентный режим течения наблюдается при числах Re более 10 000.

Для ламинарного течения воздуха тип конвекции в каналах определяется числом Грасгофа

$$Gr = \frac{g\beta d^3}{\nu^2} \Delta T \quad (11)$$

и числом Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (12)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; $\beta = 0,00367 \text{ К}^{-1}$ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха; ΔT – разность средней температуры воздуха в прослойке \bar{T} и температуры стенок прослойки T_1 и T_2 ; $a = \rho\lambda_v / C_p$ – коэффициент температуропроводности воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; λ_v – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Если величина $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$, то свободная конвекция должна учитываться при решении задачи, если $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$ – влияние свободной конвекции пренебрежимо мало. Используя параметры воздуха, критерий оценки влияния свободной конвекции можно свести к простой оценке по величине параметра

$$\xi = d^3 / \Delta T. \quad (13)$$

Если $\xi > 5 \cdot 10^{-3}$, то свободная конвекция должна учитываться, а если $\xi < 5 \cdot 10^{-3}$, то свободной конвекцией можно пренебречь.

Будем считать, что течение воздуха в канале является симметричным относительно его средней плоскости. В этом случае коэффициенты теплоотдачи в (1) L_1 и L_2 на поверхностях канала будут одинаковыми, и их средняя величина может быть вычислена как

$$\bar{L} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (14)$$

Здесь Nu – безразмерный критерий подобия Нуссельта, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности.

Для нахождения величины числа Нуссельта для плоского канала и, соответственно, коэффициента теплоотдачи используются критериальные уравнения (см., например, [9]), которые соответствуют различным типам конвекции (вынужденная или вынужденная с учетом свободной) и двум типам течения воздуха – ламинарное и турбулентное:

– для ламинарного течения без учета свободной конвекции

$$Nu = 1,4 \left(Re \frac{d}{X} \right)^{0,4} Pr^{0,33}; \quad (15)$$

– для ламинарного течения с учетом свободной конвекции

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \varepsilon_L; \quad (16)$$

– для ламинарного течения с учетом естественной конвекции

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_L; \quad (17)$$

– для турбулентного течения

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \psi. \quad (18)$$

Чисто свободная конвекция не рассматривается, поскольку она характерна больше для замкнутых воздушных прослоек.

При расчетах коэффициента теплоотдачи значения критериев Re и Pr берутся при средней температуре воздуха в объеме всей прослойки. Коэффициент ε_L учитывает изменение коэффициента теплоотдачи по длине прослойки. Для ламинарного течения он зависит от отношения $\gamma = \frac{X_m}{d}$, а для турбулентного также и от величины числа Re . Для сравнительно длинных прослоек ($\gamma \geq 50$) величины коэффициентов ψ и ε_L практически равны единице.

Сформулированная выше модель теплопереноса в вентилируемой прослойке позволяет с использованием итерационных методов провести расчет динамики тепlopоступлений J_2 из воздушной прослойки на внешнюю поверхность оболочки здания 2. Для этого на последовательных шагах по времени используется следующая процедура расчетов.

Положим, что для какого-либо шага по времени все параметры в воздушной прослойке являются уже известными.

При переходе к следующему шагу по времени известными являются величины, связанные с текущими значениями внешних тепловых воздействий на воздушную прослойку: $Q_{вх}$, $T_{вх}$, $J_{фас}$. В результате для проведения прямого расчета на новом шаге по времени не хватает значений T_1 и $T_{вых}$. В первом приближении эти параметры можно взять равными их значениям в предыдущий расчетный момент времени. Задав таким образом эти параметры, величины J_1 , $\langle \bar{T} \rangle$, $\langle V \rangle$ в первом приближении на новом шаге по времени также становятся определенными.

Далее расчет производится последовательными итерациями параметров по длине канала. Рассчитав по (9) температуру на выходе, получаем новое значение $T_{вых}$. Итерации прекращают, когда отклонение значения $T_{вых}$ от значения на предыдущей итерации достаточно мало.

Полученное итоговое значение $T_{вых}$ соответствует заданному первому приближению T_1 , которое также требует уточнения. Для этого в процессе расчетов по (9) одновременно также интегрируют тепловой поток на внутренней поверхности покрытия воздушной прослойки $Q_1 = B \sum J_1(x) \Delta$ и находят среднее значение его плотности:

$$\langle J_1 \rangle = \frac{Q_1}{X_m B}. \quad (19)$$

Нахождение значения T_1 сводится к выбору такого значения, при котором его величина J_1 , рассчитанная по (19), соответствовала значению, полученному по (1). Этого достигают проведением итераций по температуре T_1 , например, методом двоичного деления.

Использование описанного подхода позволяет получить зависимость $J_2(x)$ в расчетный момент времени. Эта зависимость используется далее для

расчета нестационарного теплопереноса через оболочку здания 2 (расчеты в «*трансмиссионной области*») на том же шаге по времени. Дополнительными параметрами, представляющими интерес при расчетах в «*конвективной области*», являются полученная температура фасада T_1 , скорость $\langle V \rangle$ и температура воздуха на выходе из воздушной прослойки $T_{\text{вых}}$, а также поток тепла $Q_{\text{вых}}$, уносимый воздухом из прослойки.

В используемой физико-математической модели в «*трансмиссионной области*» проводится расчет теплообмена между поверхностью $[0-X_m; 0]$ и помещением через поверхность $[0-X_m; Y_m]$ (см. рисунок) с использованием конечно-разностного численного решения уравнения переноса тепла, записанного для температуры:

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]. \quad (20)$$

Здесь C_p – удельная теплоемкость материала оболочки 2, Дж/(м³·К); λ – его теплопроводность, Вт/(м·К). В качестве граничных условий используются следующие:

$$-\lambda \partial T(x, 0, t) / \partial y = J(x, t)_2; \quad (21)$$

$$-\lambda \partial T(x, Y_m, t) / \partial y = L_3 (T(t)_{\text{вн}} - T(x, Y_m, t))_3 = J(x, Y_m, t)_3; \quad (22)$$

$$-\lambda \partial T(0, y, t) / \partial x = 0; \quad (23)$$

$$-\lambda \partial T(X_m, y, t) / \partial x = 0. \quad (24)$$

В граничном условии для внутренней поверхности оболочки: L_3 – коэффициент теплоотдачи воздуху помещения, Вт/(м²·К). Условия (23) и (24) соответствуют отсутствию теплообмена на границах в продольном направлении, что корректно, если вентилируемая прослойка имеет достаточно большую длину X_m .

В граничном условии (21) используется величина плотности теплового потока $J(x, t)_2$, которая для того же момента времени и для той же пространственной точки на оболочке здания предварительно находится при описанном ранее решении задачи в «*конвективной области*».

В граничном условии (22) использована зависимость температуры внутреннего воздуха только от времени, что может соответствовать модели идеального смешения и пренебрежению расслоением температуры по высоте помещения. При использовании внутреннего отопления или кондиционирования температура $T_{\text{вн}}$ также может быть задана постоянной величиной.

Для решения краевой задачи (20) – (24) в качестве начального условия для температуры внутри оболочки 2 может быть задано ее постоянное значение во всем объеме, например, температура внутреннего воздуха

$$T(x, y, 0) = T_{\text{вн}}. \quad (25)$$

В этом случае, проводя расчет в течение, например, 3–5 и более суточных циклов, задаваемых периодически повторяющимися внешними тепловыми воз-

действиями, можно получить достаточно точное детализированное во времени численное решение по теплопоступлениям в помещение через вентилируемый фасад в течение рассматриваемых суток.

Для численного решения краевой задачи (20) – (25) применен явный конечно-разностный двухшаговый (трехслойный) по времени сеточный метод, обладающий высокой устойчивостью. Решение ищется в узлах двухмерной пространственной сетки с шагами Δ_x и Δ_y , м, и с шагом по времени δt , с. При этом пространственный шаг Δ_x и шаг δt должны соответствовать шагам, используемым при нахождении решения в «конвективной области» (более корректно говорить о том, что расчеты в «конвективной области» должны быть синхронизированы с расчетами в «трансмиссионной области»). Высокая устойчивость метода и, как следствие, возможность использования сравнительно больших шагов по времени, требуемых при проведении значительных объемов исследований, достигается за счет построения расчетной конечно-разностной схемы на основе метода Дюфорта – Франкеля [10]. В этой схеме в конечно-разностных аппроксимациях вторых пространственных производных на втором слое по времени проводится осреднение центрального члена по двум соседним слоям (см., например, [11]). На практике используемая схема расчета по объему вычислений, при заданной набором величин шагов по времени и пространству точности, оказывается в четыре раза более эффективной по сравнению с традиционной одношаговой двухслойной по времени явной схемой. Второй порядок точности при использовании данной расчетной схемы достигается при задании шага по времени δt , исходя из соотношения

$$\delta t \leq \frac{C_p}{\lambda} (\Delta_y)^2. \quad (26)$$

При этом одновременно должно учитываться условие, что шаг δt одновременно не должен превышать характерной величины времени возможных изменений внешних тепловых воздействий на оболочку здания, которое в обычных условиях может составлять 20–30 мин.

В качестве примера применения представленной выше модели проведен расчет нестационарного теплопереноса через ограждающую конструкцию, состоящую из эффективного утеплителя ($\lambda = 0,05$ Вт/(м·К)) толщиной 15 см и отделочного слоя изнутри ($\lambda = 0,15$) толщиной 1,2 см. Ограждающая конструкция ориентирована на юг, в помещении поддерживается постоянная температура 22 °С. Наружные климатические условия соответствуют архивным метеорологическим данным г. Москвы за 2011 г. Расчет проведен для всего летнего периода для двух вариантов ограждения здания: с вентилируемым фасадом с воздушной прослойкой 2,5 см и без него.

В результате расчетов получено, что за весь летний период максимальные мгновенные теплопоступления на внутренней поверхности оболочки здания составили: $J_2 = 21,6$ Вт/м² – для варианта без вентилируемого фасада и $J_2 = 10,2$ Вт/м² – в случае наличия вентилируемой прослойки. Максимальные за весь период значения среднесуточных теплопоступлений составили 6,0 и 4,1 Вт/м² для вариантов без вентилируемой прослойки и с прослойкой. Таким

образом, наблюдается снижение теплопоступлений в 1,5–2 раза, притом что сопротивление теплопередаче конструкции, определенное в стационарных условиях, увеличилось лишь на 1,6 %.

Заключение

Разработана модель нестационарного теплопереноса через ограждающие конструкции, содержащие легкие вентилируемые фасады и кровли. Данная модель максимально полно учитывает теплообмен здания с окружающей средой.

Полученная модель позволяет достаточно точно и эффективно производить расчеты теплопоступлений и теплопотерь через ограждающие конструкции.

Применение модели на примере малоинерционной стены с заполнением эффективным утеплителем (минеральная вата, пенополистирол и т. д.) показало, что, несмотря на незначительное увеличение сопротивления теплопередаче, вентилируемая прослойка позволяет снизить пиковые теплопоступления в помещение в летний период в 1,5–2 раза, что приводит к соответственным снижениям потребности в кондиционировании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Tiantian Zhang, Yufei Tan, Hongxing Yang, Xuedan Zhang*. The application of air layers in building envelopes: A review // *Applied Energy*. 2016. № 165. P. 707–743.
2. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю.* Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 1 // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2004. № 2. С. 20–26. EDN: SMDKZB
3. *Умнякова Н.П.* Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией // *Жилищное строительство*. 2014. № 1–2. С. 16–20. EDN: ZSNOJX
4. *Banionis K., Stankevičius V., Monstvilas E.* Heat exchange in the surface of lightweight steel roof coatings // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011. V. 17. № 1. P. 88–97.
5. *Shikha Ebrahim, Adel Alshayji*. Reducing Solar Heat Gain From Included Buildings' Roof by Using Radiant Barrier System. URL: https://www.academia.edu/65921943/Reducing_Solar_Heat_Gain_From_Included_Buildings_Roof_By_Using_Radiant_Barrier_System?email_work_card=abstract-read-more (accessed 2013).
6. *Окунев А.Ю., Левин Е.В.* Лучистый теплообмен ограждающих конструкций зданий с окружающей средой // *Жилищное строительство*. 2023. № 6. С. 43–51. DOI: 10.31659/044-4472-2024-7-43-51
7. *Левин Е.В., Окунев А.Ю., Умнякова Н.П., Шубин И.Л.* Основы современной строительной термографии. Москва : НИИСФ РААСН, 2012. 170 с.
8. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 9-е изд., перераб. Москва : Наука, 1981. 448 с.
9. *Пищулин В.П.* Расчет кожухотрубчатого теплообменника. Северск : СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. 37 с.
10. *Du Fort E.C., Frankel S.P.* Stability Conditions in the Numerical Treatment of Parabolic Differential Equations // *Math. Tables Other Aids Comput.* 1953. V. 7. № 43. P. 135–152.
11. *Роч П.* Вычислительная гидродинамика / пер. с англ. В.А. Гущина, В.Я. Митниченко ; под ред. П.И. Чушкина. Москва : Мир, 1980. 616 с.

REFERENCES

1. *Tiantian Zhang, Yufei Tan, Hongxing Yang, Xuedan Zhang*. The Application of Air Layers in Building Envelopes: A Review. *Applied Energy*. 2016; (165): 707–743.
2. *Gagarin V.G., Kozlov V.V., Cykanovskij E.Yu.* Calculation of Facade Thermal Protection with Ventilated Air Gap. Part 1. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2004; (2): 20–26 (In Russian)

3. *Uminakova N.P.* Thermal Protection of Closed Air Layers with Reflective Thermal Insulation. *Energoeffektivnoe stroitel'stvo*. 2014; (1–2): 16–20. (In Russian)
4. *Banionis K., Stankevičius V., Monstvilas E.* Heat Exchange in Lightweight Steel Roof Coatings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2011; 17 (1): 88–97.
5. *Shikha Ebrahim, Adel Alshayji.* Reducing solar heat gain from included buildings' roof by using radiant barrier system. Available: www.academia.edu/65921943/Reducing_Solar_Heat_Gain_From_Inclined_Buildings_Roof_By_Using_Radiant_Barrier_System?email_work_card=abstract-read-more (accessed 2013).
6. *Okunев A.Yu., Levin E.V.* Radiant Heat Exchange of Building Envelopes with the Environment. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2023; (6): 43–51, DOI: 10.31659/0044-4472-2023-6-43-51 (In Russian)
7. *Levin E.V., Okunев A.Yu., Umnyakova N.P., Shubin I.L.* Modern Building Thermography Basics. Moscow, 2012. 170 p. (In Russian)
8. *Sedov L.I.* Similarity and Dimensionality Methods in Mechanics. 7th ed. Moscow: Nauka, 1981. 448 p. (In Russian)
9. *Pishchulin V.P.* Calculation of Shell-and-Tube Heat Exchanger. Seversk, 2010. 37 p. (In Russian)
10. *Du Fort E.C., Frankel S.P.* Stability Conditions in the Numerical Treatment of Parabolic Differential Equations. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*. 1953; 7 (43): 135–152.
11. *Roach P.* Computational Fluid Dynamics. Moscow: Mir, 1980, 616 p. (Russian translation)

Сведения об авторах

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

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

Authors Details

Alexander Yu. Okunев, PhD, Senior Researcher, Research Institute of Structural Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia okunevay@gmail.com

Evgeny V. Levin, PhD, Senior Researcher, Research Institute of Structural Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Proezd, 127238, Moscow, Russia, evlev@list.ru

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 03.09.2024
Одобрена после рецензирования 19.09.2024
Принята к публикации 29.01.2025

Submitted for publication 03.09.2024
Approved after review 19.09.2024
Accepted for publication 29.01.2025