

Научная статья

С.В. ФЕДОСОВ¹, Д.Д. КОРОТЕЕВ^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ КОНСТРУКЦИЯ – ОБЛИЦОВОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ»

Аннотация. В статье рассмотрены процессы радиационно-конвективного теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие». Облицовочные покрытия несущих ограждающих железобетонных конструкций могут быть выполнены из различных материалов и иметь различные конструктивные особенности, выполняя защитные и декоративные функции. Проанализированы случаи, когда покрытие имеет различную степень прозрачности. Проведено сравнение рассматриваемой системы с процессами термообработки железобетонных изделий с использованием солнечной энергии, при которой процесс радиационно-конвективного теплопереноса усложняется экзотермической реакцией гидратации цемента. Разработана модель радиационно-конвективного теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие». Проанализировано влияние степени прозрачности, а также интенсивности объемного источника теплоты, распределенного по координате в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, на формирование одномерного температурного поля по толщине железобетонной конструкции.

Ключевые слова: радиационно-конвективный теплоперенос, железобетонная конструкция, облицовочное покрытие, термообработка железобетонных изделий.

Для цитирования: Федосов С.В., Коротеев Д.Д. Моделирование радиационно-конвективного теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие» // Строительство и реконструкция. 2026. №3 (125). С. 91-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-125-3-91-103. EDN: ULPABN

Research Article

S.V. FEDOSOV¹, D.D. KOROTEEV^{1*}

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE SYSTEM "REINFORCED CONCRETE STRUCTURE – FAÇADE COVER"

Abstract. This article examines the processes of radiative-convective heat transfer in the "reinforced concrete structure – facade cover" system. Façade covers of load-bearing reinforced concrete structures can be made of various materials and have various design features, performing protective and decorative functions. Cases where the cover has varying degrees of transparency are analyzed. A comparison is made between the considered system and the processes of heat treatment of reinforced concrete structures using solar energy, in which the process of radiative-convective heat transfer is complicated by the exothermic reaction of cement hydration. A model of radiative-convective heat transfer in the "reinforced concrete structure – facing coating" system is developed. The influence of the degree of transparency, as well as the intensity of a volumetric heat source distributed along the coordinate in accordance with the Bouguer-Lambert-Beer law, on the formation of a one-dimensional temperature field across the thickness of the reinforced concrete structure is analyzed.

© Федосов С.В., Коротеев Д.Д., 2026



Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons NonCommercial license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Keywords: radiative-convective heat transfer, reinforced concrete structure, facade cover, heat treatment of reinforced concrete structures.

For citation: Fedosov S.V., Koroteev D.D. Modeling of radiation-convective heat transfer in the system "reinforced concrete structure – facade cover". Building and Reconstruction. 2026; 3(125): 91-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-125-3-91-103. EDN: ULPABN

1. Введение

В промышленном и гражданском строительстве широко используются бетонные и железобетонные конструкции, в частности, являющиеся несущими и ограждающими стенами зданий. В пределах своего жизненного цикла железобетонные несущие и ограждающие конструкции подвергаются воздействиям жидких и газообразных компонентов агрессивного характера, что негативно влияет на их физические свойства, такие как долговечность, морозостойкость, водостойкость, воздухоустойкость, что в конечном счёте ухудшает и механические характеристики [1, 2]. В этих условиях внешняя поверхность несущих и самонесущих ограждающих стен защищается облицовочным покрытием.

Облицовочные покрытия выполняют как защитные функции, позволяющие продлить срок службы железобетонных конструкций и предотвратить преждевременное появление физического износа, так и декоративные функции [3]. В современных условиях развития строительной индустрии облицовочные покрытия обладают достаточно высоким разнообразием по используемым материалам и конструктивным решениям покрытий, в том числе существуют различные фасадные системы, материалы из природного и искусственного камня, полимерные покрытия, стеклянные панели и т.п. [4, 5]. Разнообразные облицовочные покрытия применяются как при новом строительстве, так и при реконструкции и капитальном ремонте зданий [6].

Рисунок 1 показывают динамику процесса теплопереноса от внешней воздушной среды к внутренней среде помещения в течение дневного временного цикла через систему двух тел: облицовочного покрытия, имеющего толщину δ_1 с коэффициентами λ_1, ρ_1, c_1 , характеризующими теплопроводность, плотность и теплоемкость материала покрытия, и железобетонной конструкции толщиной δ_2 с коэффициентами λ_2, ρ_2, c_2 соответственно. На этом же рисунке обозначены и пограничные слои «газ – твердое тело» с модельными размерами δ_{c1} и δ_{c2} .

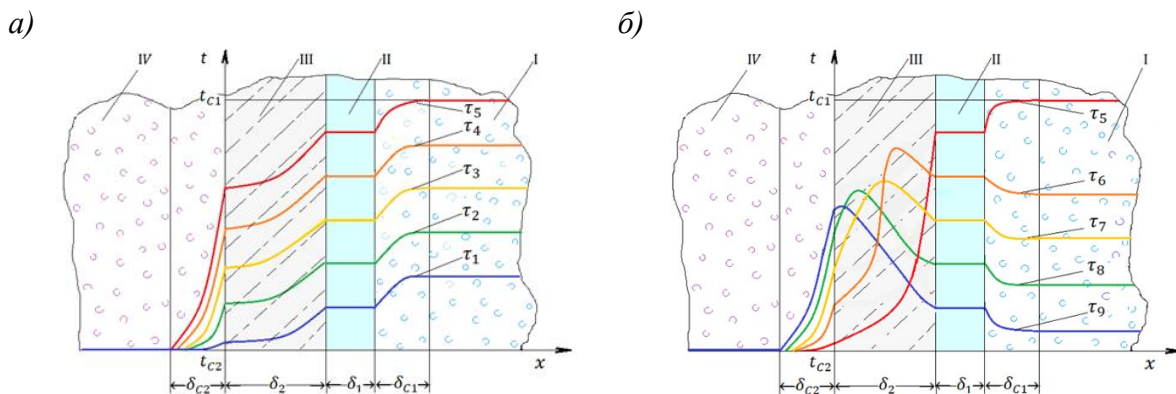


Рисунок 1 – Профили температур в двухслойной системе в процессах с переменной температурой среды: а) нагревание, б) охлаждение

I – внешняя воздушная среда; II – проникаемое (непроникаемое) облицовочное покрытие; III – бетонная (железобетонная) конструкция; IV – воздушная среда внутреннего помещения

Элемент покрытия имеет коэффициент пропускания солнечной радиации D , который определяет долю радиационно-конвективного теплового потока, проходящего к наружной поверхности железобетонной конструкции.

Значения качественных величин температурных показателей процесса иллюстрируются линиями роста температуры внешней воздушной среды от значения t_{c2} до t_{c1} , при значениях времени, определяемых показателями от τ_1 до τ_5 . Период охлаждения

внешней воздушной среды от значения t_{c1} до t_{c2} характеризуется значениями времени от τ_6 до τ_9 . Интересно отметить, что этап нагревания характеризуется пологими температурными кривыми, а этап охлаждения имеет экстремумы.

На рисунке 1 показана система «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие» при плотном примыкании двух элементов друг к другу, она будет рассмотрена далее. Однако, некоторые облицовочные покрытия имеют в своей конструкции воздушные зазоры, слои теплоизоляции и т.д. [5, 7]. Прозрачность покрытия тоже может быть разной, начиная от непрозрачных, применяемых в большинстве случаев, относительно прозрачных («прозрачный» бетон и т.п.) и заканчивая прозрачными покрытиями, применяемыми в конструкциях теплоаккумулирующих стен (стена Тромба) для аккумуляирования солнечного излучения, используемого для нагревания воздуха внутри отапливаемого здания [7-9].

Для южных районов нашей страны, среднеазиатских республик и стран ближнего востока весьма перспективной является тепловая обработка железобетонных изделий с использованием солнечной энергии [10]. При использовании солнечной энергии как теплоносителя в качестве тепловых агрегатов применяются гелиоформы различной конструкции [11]. На рисунке 2 показана схема радиационно-конвективной обработки железобетонного изделия при стендовой технологии изготовления. Помимо стендовой технологии, в производстве сборных железобетонных изделий применяются также агрегатно-поточная и конвейерная технологии [12].

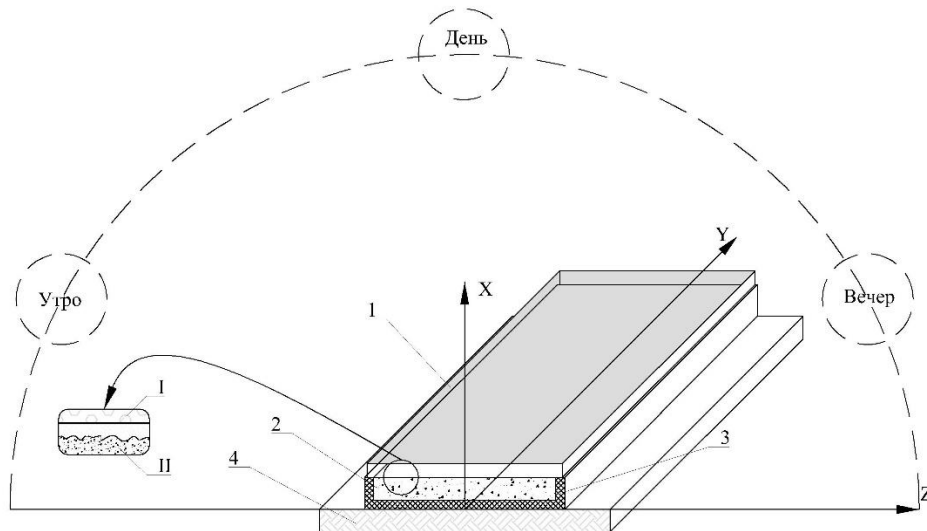


Рисунок 2 – Схема радиационно-конвективной термообработки железобетонного изделия при стендовой технологии производства на гелиополигоне:

1(I) – прозрачное покрытие; 2(II) – железобетонное изделие; 3 – опалубочная форма; 4 – стенд для установки опалубочной формы

Целью настоящего исследования является создание математической модели кинетики и динамики теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие», усиливающих условие теплового взаимодействия ограждающей конструкции с окружающей средой (внешней, наружной или внутренней в помещении).

2. Модели и методы

В основу методов математического моделирования рассматриваемых процессов положены фундаментальные представления о кинетике и динамике радиационно-конвективного теплопереноса. Немаловажным аспектом при рассмотрении этих процессов является учет свойств облицовочного покрытия. При этом возможны следующие развития ситуаций:

1. Облицовочное покрытие имеет высокое значение коэффициента пропускания солнечной радиации.

Как следует из физики явления радиационно-конвективного теплопереноса тепловое излучение проходит облицовочное покрытие, несколько ослабляясь по своей интенсивности от значения $I_0(\tau)$ до $I_1(\tau)$. В свою очередь, этот тепловой поток проникает через внешние слои материала покрытия.

В этом случае тепловое излучение будет непосредственно воздействовать на внешнюю поверхность железобетонной конструкции, проникая в неё. Это проникновение может быть охарактеризовано как мощность объемного источника теплоты, распределенного по координате в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера [13]:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\kappa_\lambda x), \quad (1)$$

где I_0 – начальная интенсивность солнечного излучения; κ_λ – коэффициент поглощения солнечного излучения на данной длине волны λ .

2. Облицовочное покрытие непрозрачно, в этом случае оно нагревается под влиянием механизма радиационно-конвективного теплопереноса. Перенос теплоты будет для системы двух тел, и это значительно осложняет задачу. Облегчает её отсутствие теплового источника, определяемого прониканием теплового излучения.
3. Значительно более сложным является моделирование процессов теплопереноса для случаев термообработки бетона в условиях гелиополигона (рисунок 2), сопровождающихся тепловым эффектом реакций гидратации цемента, которые необходимо рассматривать как дополнительный объемный источник теплоты в толще железобетонные изделия при радиационно-воздушном тепломассопереносе. На сноске рисунка 2 показан в увеличении узел «прозрачное покрытие – воздушная прослойка – железобетонное изделие». Очевидно, что микрорельеф поверхностей показывает наличие неровностей и шероховатостей, которые необходимо также учитывать при рассмотрении процессов тепломассопереноса.

3. Результаты исследования и их анализ

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для рассматриваемых процессов в первом случае (рисунок 1) записывается в форме [14]:

$$\rho_1 \cdot c_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} \right] + q_V(x, \tau), \quad (2)$$

где $t_1(x, \tau)$ – функция, определяющая поле температур в твердой фазе по координате x в момент времени τ ; ρ_1 , c_1 , λ_1 – плотность, теплоемкость и теплопроводность бетонной субстанции; $q_V(x, \tau)$ – объемный источник теплоты вследствие возможных химических реакций. В рассматриваемом случае в качестве внутреннего источника теплоты можно рассматривать тепловой поток, определяемый по закону Бугера-Ламберта-Бера [13].

Следует отметить, что в общем случае воздействие внешней среды может приводить к изменению значений данных характеристик теплопереноса.

В соответствии с общеизвестной теорией Стефана-Больцмана [15] суммарная плотность теплового потока на внешней границе пластины определяется выражением [16]:

$$\begin{aligned} q_{\text{эфф.}}(x) &= \alpha_k [t_{c1}(\tau) - t_1(x, \tau)|_{x=\delta_1}] + \sigma \cdot \varepsilon \left\{ \left[\frac{T_1(\tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_2(\tau)}{100} \right]^4 \right\} = \\ &= \alpha_{\text{эфф.}}(\tau) [t_{c1}(\tau) - t_1(x, \tau)|_{x=\delta_1}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{эфф.}}(\tau)$ – эффективный коэффициент теплоотдачи посредством конвекции и излучения; α_k – коэффициент теплоотдачи посредством конвекции; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [Вт/(м²·К⁴)] – константа Стефана-Больцмана; ε – степень черноты серого тела.

В соответствии с современными представлениями о процессах радиационно-конвективного теплообмена [15, 17] можно записать следующее выражение для плотности теплового потока на границе железобетонной конструкции и облицовочного покрытия:

$$I_0(\tau) = q_{\text{эф.}}(\tau) \cdot D, \quad (4)$$

где D – пропускная способность тела.

Введем ряд специальных понятий для рассматриваемого случая:

- поток излучения Q , (Вт) – количество лучистой энергии, проходящее через заданную поверхность F в единицу времени;
- плотность потока излучения E , (Вт/м²) – количество лучистой энергии, проходящее через единичную поверхность в единицу времени, определяемая по формуле:

$$E = \frac{dQ}{dF}. \quad (5)$$

- спектр излучения – характеристика излучающего тела $E_\lambda = f(\lambda)$, определяемая по формуле:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda, \quad (6)$$

где λ – длина волны излучения.

С учетом этих дополнительных материалов для краевой задачи нестационарного теплопереноса в твердом теле на наружной границе можно записать граничное условие в следующем виде:

$$I_0(\tau) = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2}. \quad (7)$$

На левой границе поверхности железобетонной конструкции осуществляется условие теплообмена с внутренним объемом помещения:

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = I_{\text{к.вн.}}^*(\tau). \quad (8)$$

Здесь, величина, стоящая в правой части, характеризует интенсивность конвективного теплообмена ограничивающей поверхности с внутренним объемом помещения. Рассматривая данное слагаемое с физической точки зрения, можно записать:

$$I_{\text{к.вн.}}^*(\tau) = \alpha_{\text{к.вн.}}(\tau) [t_{\text{вн.}}(\tau) - t_2(x, \tau)|_{x=0}], \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{к.вн.}}(\tau)$ – коэффициент теплоотдачи внутри.

Запись выражения (9) подразумевает, что температура внутри помещения, в общем случае, может изменяться во времени под действием вторичных факторов (включение/отключение нагревательных приборов, нарушение герметичности и т.д.).

В качестве начального условия можно записать:

$$t_2(x, \tau)|_{\tau=0} = t_{2.0}(x). \quad (10)$$

Таким образом, общая запись задачи нестационарной теплопроводности для рассматриваемого случая в размерных переменных:

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a(x, \tau) \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{q_V(x, \tau)}{\rho_2(x, \tau) \cdot c_2(x, \tau)}; \quad \tau > 0; \quad 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (11)$$

$$t_2(x, \tau)|_{\tau=0} = t_{2.0}(x), \quad (12)$$

$$I_0(\tau) = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2}, \quad (13)$$

$$I_{\text{к.вн.}}^*(\tau) = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (14)$$

Вводим безразмерные переменные вида:

$$\bar{x} = \frac{x}{\delta_2}; \quad Fo = \frac{a_2 \tau}{\delta_2^2}; \quad T(\bar{x}, Fo) = \frac{t_c(\tau) - t_2(x, \tau)}{t_c(\tau)}, \quad (15)$$

$$Ki_H(Fo) = \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial \bar{x}}, \quad (16)$$

$$Ki_{BH}(Fo) = \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial \bar{x}}. \quad (17)$$

Опуская несложные, но громоздкие преобразования, запишем в окончательном виде краевую задачу теплопроводности в безразмерном виде:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} + Po^* \cdot \exp(-k_\lambda \cdot \delta_2 \cdot \bar{x}), \quad (18)$$

$$T(\bar{x}, Fo)|_{Fo=0} = T_0(\bar{x}), \quad (19)$$

$$Ki_H(Fo) = \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial \bar{x}}, \quad (20)$$

$$Ki_{BH}(Fo) = \frac{\partial T(0, Fo)}{\partial \bar{x}}. \quad (21)$$

И вновь, предполагая дальнейшую реализацию численно-аналитического подхода, рассмотрим вначале задачу моделирования для случая, когда все теплофизические критерии будут считаться постоянными на шаге расчета по времени ($\Delta \tau_i \rightarrow \Delta Fo_i$), но изменяющимися при переходе от одного микропроцесса к другому.

Поиск решения поставленной задачи будем производить с использованием метода интегрального преобразования Лапласа [18]. В соответствии с принятой методологией произведем почленный перевод слагаемых уравнения (18) в область комплексных переменных. Процедура выполнения прямого и обратного преобразований достаточно полно изложена в [18]. Приведем окончательный вариант записи:

$$\begin{aligned} T(\bar{x}, Fo) = & \int_0^1 T_0(\xi) d\xi - [Ki_{KBH} - Ki_H] \cdot Fo + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \int_0^1 T_0(\xi) \cdot \cos(\pi n \xi) d\xi - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [Ki_{KBH} - Ki_H (-1)^n] \cdot \\ & \cos(\pi n \bar{x}) \cdot [1 - \exp(-\pi^2 n^2 Fo)] + \frac{2}{\pi^2} \cdot Po^* \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{k_\lambda^2 \delta_2^2 + \pi^2 n^2} \cdot \cos(\pi n \bar{x}) \cdot [1 - \\ & \exp(-\pi^2 n^2 Fo)] \cdot [k_\lambda \delta_2 + \pi n \cdot \sin(\pi n K_6) - \\ & - k_\lambda \delta_2 \cdot \cos(\pi n K_6) \cdot \exp(-k_\lambda \delta_2 K_6)] \end{aligned} \quad (22)$$

Некоторые результаты расчетов по выражению (22) приведены на рисунках 3-6. На рисунке 3 показана динамика полей температур по сечению облицовочного покрытия при разных значениях K_6 , для расчета были взяты следующие значения составляющих формулы (22): $Ki_{KBH}=0,25$; $Ki_H=0,55$; $Fo=0,1$; $k_\lambda = 0,7$. Для расчетов принято постоянное по сечению начальное распределение полей температур. Рисунок 3 показывает, что при увеличении толщины, на которой действует объемный источник теплоты в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера (значения K_6 с 0 до 0,6), значения температур на этой толщине увеличиваются. Увеличение значений температур обусловлено наличием объемного источника теплоты и ненулевым значением критерия Померанцева соответственно.

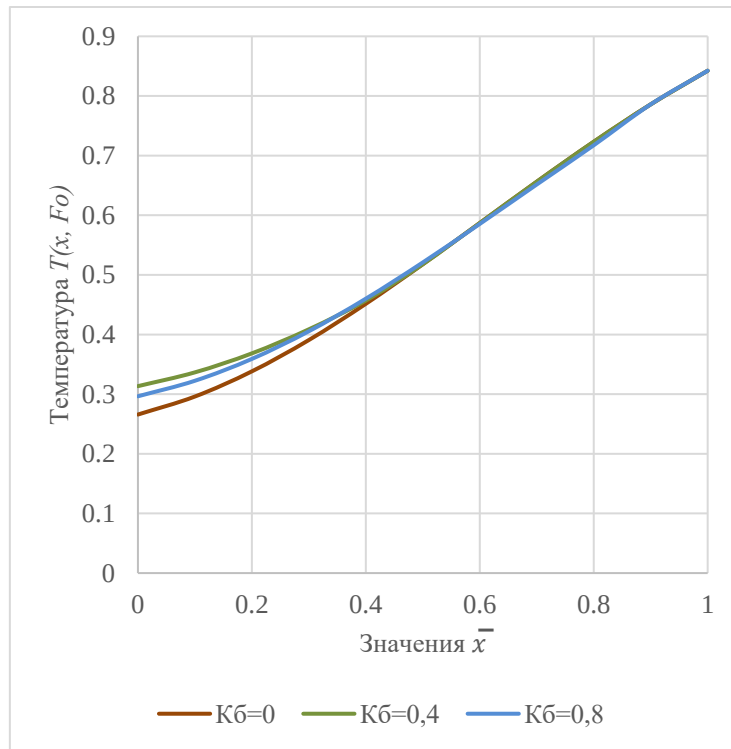


Рисунок 3 – Изменение безразмерных температур $T(\bar{x}, Fo)$ по сечению облицовочного покрытия при разных значениях K_6

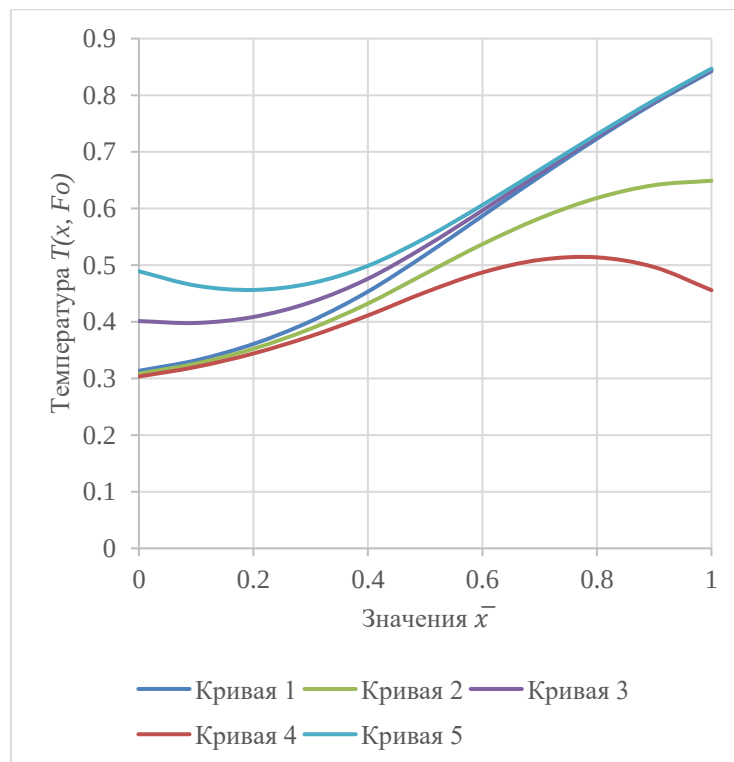


Рисунок 4 – Изменение безразмерных температур $T(\bar{x}, Fo)$ по сечению облицовочного покрытия при разных значениях критериев Кирпичева

Кривая 1 – динамика полей температур при $Ki_{к.вн}=0,25$ и $Ki_{н.}=0,55$; Кривая 2 – динамика полей температур при $Ki_{к.вн}=0,25$ и $Ki_{н.}=0$; Кривая 3 – динамика полей температур при $Ki_{к.вн}=0$ и $Ki_{н.}=0,55$; Кривая 4 – динамика полей температур при $Ki_{к.вн}=0,25$ и $Ki_{н.}=-0,55$; Кривая 5 – динамика полей температур при $Ki_{к.вн}=-0,25$ и $Ki_{н.}=0,55$.

На рисунке 4 показана динамика полей температур по сечению облицовочного покрытия при разных значениях критериев Кирпичева. Для расчета были взяты следующие значения составляющих формулы (22): $Fo=0,1$; $k_\lambda=0,7$; $K_\delta=0,4$. Для расчетов принято постоянное по сечению начальное распределение полей температур. Рисунок 4 свидетельствует о значительном влиянии значений критерия Кирпичева, характеризующего интенсивность внешнего нагрева по отношению к рассматриваемой системе.

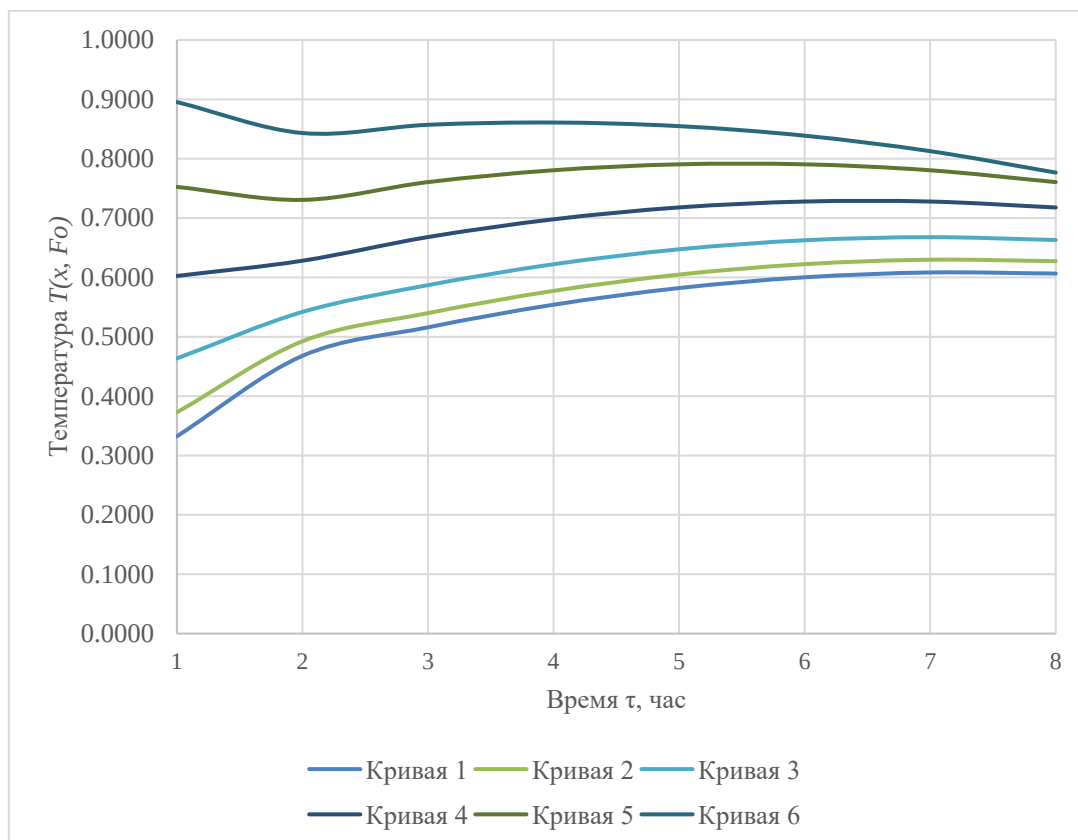


Рисунок 5 – Изменение безразмерных температур $T(\bar{x}, Fo)$ во времени по сечению облицовочного покрытия при изменении Ki_n от 0,7 до 0 при $Ki_{к.вн}=0,2$

Кривая 1 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0$; Кривая 2 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,2$; Кривая 3 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,4$; Кривая 4 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,6$; Кривая 5 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,8$; Кривая 6 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=1$.

На рисунках 5-6 показана динамика полей температур во времени. Каждая кривая на графике показывает изменение значений безразмерных температур во времени при определенных значениях $\bar{x}=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$. Рисунок 5 показывает влияние изменения значения критерия Кирпичева Ki_n , который уменьшался в расчете с 0,8 до 0 с каждым шагом во времени $\tau=1$ час на 0,1.

Рисунок 6 показывает влияние изменения значения критерия Кирпичева $Ki_{к.вн}$, который уменьшался с шагом во времени $\tau=1$ час на 0,1. При этом в расчетах была принята толщина $K_\delta=0,4$, на которой действовал внутренний источник теплоты. Снижение интенсивности внутреннего источника теплоты по толщине было учтено уменьшением значений критерия Померанцева.

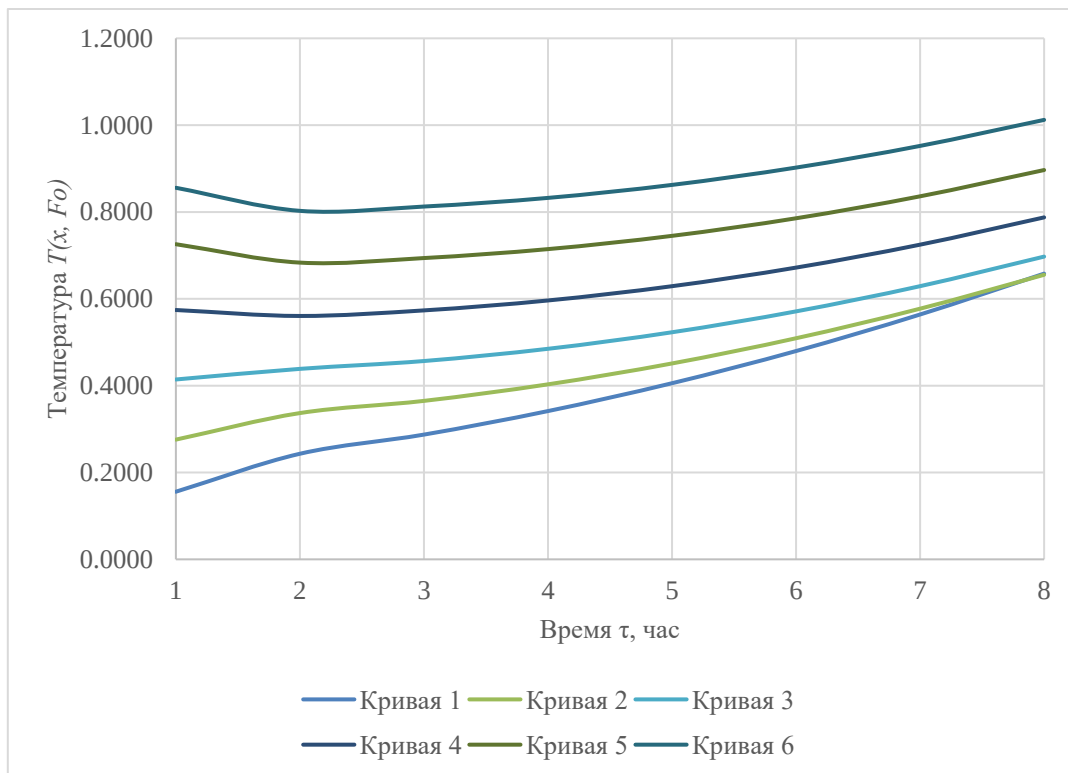


Рисунок 6 – Изменение безразмерных температур $T(\bar{x}, Fo)$ во времени по сечению облицовочного покрытия при изменении $Ki_{к.вн}$ от 0,7 до 0 при $Ki_{н.}=0,6$

Кривая 1 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0$; Кривая 2 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,2$; Кривая 3 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,4$; Кривая 4 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,6$; Кривая 5 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=0,8$; Кривая 6 – изменение безразмерной температуры для $\bar{x}=1$.

Перейдем к рассмотрению второго случая. В этом случае краевая задача нестационарной теплопроводности становится более сложной, поскольку в месте контакта двух пластин возникает граничное условие IV-го рода. Общая задача радиационно-конвективного теплопереноса в размерных величинах запишется так:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2} + q_{1V}(x, \tau), \quad (23)$$

где $q_{1V}(x, \tau)$ – объемная плотность источника теплоты, определяемого законом Бугера-Ламберта-Бера применительно к поглощающей и декорирующей пластине:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (24)$$

Начальные условия, соответственно:

$$t_1(x, \tau)|_{\tau=0} = t_{1.0}(x); \quad t_2(x, \tau)|_{\tau=0} = t_{2.0}(x). \quad (25)$$

Условие теплообмена на границах системы со средой (воздушной снаружи и внутри помещения), запишется так:

- для радиационно-конвективного теплообмена снаружи ограждающей конструкции:

$$\alpha_{эф.}(\tau) [t_{с.н.}(\tau) - t_1(x, \tau)|_{x=\delta_1}] = -\lambda_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}, \quad (26)$$

- для конвективного теплообмена естественной конвекцией внутри помещения:

$$\alpha_{вн.}(\tau) [t_{вн.}(\tau) - t_2(x, \tau)|_{x=\delta_2}] = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2}. \quad (27)$$

В месте контакта устанавливается граничное условие IV-го рода. Для целей упрощения процедуры расчетов с использованием численно аналитического метода «микропроцессов» [18] поместим начало координат в место контакта пластин.

Итак, в месте контакта пластин:

$$t_1(x, \tau)|_{x=0} = t_2(x, \tau)|_{x=0} . \quad (28)$$

И, вторая часть условия:

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} |_{x=0} = -\lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} |_{x=0} . \quad (29)$$

По аналогии с записью системы уравнений (18) – (21), для системы уравнений, описывающих радиационно-конвективный теплоперенос «железобетонной конструкции (пластины) – облицовочного покрытия» с воздушной средой и тепловым излучением, можно записать:

$$\frac{\partial T_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 T_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial \bar{x}_1^2} + Po^* \cdot \exp(-k_\lambda \cdot \delta_1 \cdot \bar{x}_1) , \quad (30)$$

$$T_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{Fo_1=0} = T_{1,0}(\bar{x}_1) , \quad (31)$$

$$Ki_{c.n}(Fo_1) = \frac{\partial T_1(1, Fo_1)}{\partial \bar{x}_1} , \quad (32)$$

$$Ki_{вн.1}(Fo_1) = \frac{\partial T_1(1, Fo_1)}{\partial \bar{x}_1} . \quad (33)$$

где $Ki_{c.n}(Fo_1)$ – значение числа Кирпичева для наружной плоскости «железобетонной конструкции (пластины) – облицовочного покрытия», $Ki_{вн.1}(Fo_1)$ – значение числа Кирпичева для внутренней поверхности «железобетонной конструкции (пластины) – облицовочного покрытия».

Для теплопереноса в железобетонной конструкции (пластине) краевая задача нестационарной теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial T_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 T_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2^2} , \quad (34)$$

$$T_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{Fo_2=0} = T_{2,0}(\bar{x}_2) , \quad (35)$$

$$Ki_{c.в.}(Fo_2) = \frac{\partial T_2(1, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2} , \quad (36)$$

$$Ki_{вн.2}(Fo_2) = \frac{\partial T_2(1, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2} . \quad (37)$$

где $Ki_{c.н}(Fo_2)$ – значение числа Кирпичева для наружной поверхности железобетонной конструкции, $Ki_{вн.2}(Fo_2)$ – значение числа Кирпичева для внутренней поверхности железобетонной конструкции.

Для критериев Фурье можно записать следующие выражения:

$$Fo_1 = \frac{\alpha_1 \tau^*}{\delta_1^2} ; \quad Fo_2 = \frac{\alpha_2 \tau^*}{\delta_2^2} . \quad (38)$$

Очевидно, что критерии Фурье определяются для одинаковых значений времени τ^* .

Между критериями устанавливается связь:

$$Fo_1 = Fo_2 \cdot k_\alpha \cdot k_\delta , \quad (39)$$

где $k_\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$; $k_\delta = \frac{\delta_2^2}{\delta_1^2}$.

В результате проведенных математических преобразований выстраивается следующая система взаимодействия алгоритмов реализации полученных решений.

Для второго рассмотренного случая динамика полей температур по координате $\bar{x}_1$ «железобетонной конструкции (пластины) – облицовочного покрытия» будет определяться расчетами по выражению (22) с учетом присвоения индекса «1» ко всем критериям подобия.

В свою очередь, расчеты динамики полей температур по толщине железобетонной конструкции будут определяться более упрощенными выражениями. Которые также получаются из уравнения (22) при исполнении условия $Ro^* = 0$ и соответствующей замене значений критериев Кирпичева на их аналоги из выражений (32), (33) и (36), (37).

Разумеется, определяющим фактором успеха реализации методики вычислений является использование вариативности процедур расчетов граничных условий IV-го рода. Данная методика реализации подробно изложена в [18].

4. Заключение

1. Разработана модель радиационно-конвективного теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие», когда покрытие имеет высокое значение коэффициента пропускания солнечной радиации. На систему оказывает влияние объемный источник теплоты в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера. Показано влияние критериев Кирпичева, характеризующих интенсивность внешнего нагрева по отношению к рассматриваемой системе.

2. Предметом дальнейших исследований является решение задачи моделирования процессов теплопереноса для случаев радиационно-конвективной термообработки бетона в условиях гелиополигона, сопровождающихся тепловым эффектом реакций гидратации цемента, которые являются дополнительным объемным источником теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Истомин А.Д. Влияние циклического замораживания и оттаивания на диаграмму деформирования сжатого бетона // Строительство и реконструкция. 2023. №(5). С. 36-44.
2. Куприянов В.Н., Хабибулина А.Г., Сулейманов А.М. Защита фасадов объектов культурного наследия от воздействия косого дождя: обзор экспериментальных исследований // Строительство и реконструкция. 2023. №(6). С. 73-85.
3. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Марушко М.В., Лукьяненко А.К. Наружная и внутренняя отделка стен из ячеистобетонных блоков // Университетская наука. 2019. № 1(7). С. 58-62.
4. Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Черкасов Д.В. Эластичные самоклеящиеся радиопоглощающие материалы // Строительство и реконструкция. 2024. №(2). С. 110-117.
5. Сулейманова Л.А., Fang J., Ширина Н.В., Баклаженко Е.В., Ладик Е.И. Современные материалы и технологии отделки фасадов при реконструкции и реновации жилого фонда // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 21-31.
6. Hajirezaei R., Sharafi P., Farsangi E.N., Rahnamayiezekavat R. Facade systems for industrialised prefabricated prefinished modular construction. Automation in Construction. 2025. Vol. 176. 106269. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106269>
7. Hannoudi L., Saleeb N., Dafoulas G. The impact of glass properties on the energy efficiency and embodied carbon of multi-angled façade systems. Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 437. 140725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140725>
8. Брызгалин В.В. Тепловой баланс стены Тромба в климате Центральной России // Жилищное строительство. 2018. № 6. С. 15-18.
9. Брызгалин В.В., Соловьев А.К. Использование пассивных систем солнечного отопления как элемента пассивного дома // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 4(115). С. 472-481.
10. Федосов С.В., Лapidус А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Сабитов Л.С., Соколов А.М. Теория и практика технологии электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. Казань: ООО «45», 2024, 199 с.
11. Подгорнов Н.И. Термообработка бетона с использованием солнечной энергии. М.: Издательство АСВ, 2010, 328 с.
12. СП 130.13330.2018 «СНиП 3.09.01-85 Производство сборных железобетонных конструкций и изделий». М.: 2018, 65 с.
13. Лыков А.В. Тепломассобмен (справочник). М.: Энергия, 1971, 560 с.
14. Mayerhöfer T.G., Pahlow S., Popp J. The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure. Chemistry Europe. 2020. Vol. 21(18). Pp. 2029-2046. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>

15. Howell J.R., M. Mengüç P., Daun K., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer (7th Edition). USA, CRC Press. 2020. 1040 p.
16. Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer (8th Edition). USA, Wiley. 2018. 992 p.
17. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981, 417 с.
18. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ПресСто, 2010, 363 с.

REFERENCES

1. Istomin A.D. Vliyanie ciklicheskogo zamorazhivaniya i ottaivaniya na diagrammu deformirovaniya szhatogo betona [The effect of cyclic freezing and thawing on the deformation diagram of compressed concrete]. Construction and reconstruction. 2023. No. 5. Pp. 36-44 (rus)
2. Kupriyanov V.N., Khabibulina A.G., Suleymanov A.M. Zashhita fasadov ob`ektov kul`turnogo naslediya ot vozdejstviya kosogo dozhdya: obzor e`ksperimental`ny`x issledovanij [Protection of facades of cultural heritage sites from the effects of slanting rain: a review of experimental studies]. Construction and reconstruction. 2023. No. 6. Pp. 73-85. (rus)
3. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Lukyanenko A.K. Naruzhnaya i vnutrennyaya otdelka sten iz yacheistobetonny`x blokov [Exterior and interior wall decoration from cellular concrete blocks]. University Science. 2019. No. 1(7). Pp. 58-62. (rus)
4. Cherkasov V.D., Shcherbak Yu.P., Cherkasov D.V. E`lastichny`e samokleyashhiesya radiopogloshhayushhie materialy` [Elastic self-adhesive radio-absorbing materials]. Construction and reconstruction. 2024. No. 2. Pp. 110-117. (rus)
5. Suleymanova L.A., Fang J., Shirina N.V., Baklazhenko E.V., Ladik E.I. Sovremennyye materialy` i tehnologii otdelki fasadov pri rekonstrukcii i renovacii zhilogo fonda [Modern materials and facade finishing technologies in the reconstruction and renovation of residential buildings]. Bulletin of the Belarusian State Technological University named after V.G. Shukhov. 2018. No. 11. Pp. 21-31. (rus)
6. Hajirezaei R., Sharafi P., Farsangi E.N., Rahnamayiezekavat R. Facade systems for industrialised prefabricated prefinished modular construction. Automation in Construction. 2025. Vol. 176. 106269. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106269>
7. Hannoudi L., Saleeb N., Dafoulas G. The impact of glass properties on the energy efficiency and embodied carbon of multi-angled façade systems. Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 437. 140725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140725>
8. Bryzgalin V.V. Teplovoj balans steny` Tromba v klimate Central`noj Rossii [Thermal balance of the thombus wall in the climate of Central Russia]. Housing construction. 2018. No. 6. Pp. 15-18. (rus)
9. Bryzgalin V.V., Solovyov A.K. Ispol`zovanie passivny`x sistem solnechnogo otopleniya kak e`lementa passivnogo doma [The use of passive solar heating systems as an element of a passive house]. Bulletin of MGSU. 2018. Vol. 13, No. 4(115). Pp. 472-481. (rus)
10. Fedosov S.V., Lapidus A.A., Abdullazyanov E.Yu., Sabitov L.S., Sokolov A.M. Theory and practice of technology of electric thermal treatment of reinforced concrete products with high-frequency currents at precast concrete enterprises. Kazan: LLC "45", 2024, 199 p. (rus)
11. Podgornov N.I. Heat treatment of concrete using solar energy. M.: ACB Publishing House, 2010, 328 p. (rus)
12. SP 130.13330.2018 "Construction Norms and Regulations (SNiP) 3.09.01-85 Production of precast reinforced concrete structures and products". M: 2018, 65 p.
13. Lykov A.V. Heat and mass exchange (handbook). M.: Energiya, 1971, 560 p. (rus)
14. Mayerhöfer T.G., Pahlow S., Popp J. The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure. Chemistry Europe. 2020. Vol. 21(18). Pp. 2029-2046. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>
15. Howell J.R., M. Mengüç P., Daun K., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer (7th Edition). USA, CRC Press. 2020. 1040 p.
16. Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer (8th Edition). USA, Wiley. 2018. 992 p.
17. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer. Moscow: Energoizdat, 1981, 417 p. (rus)
18. Fedosov S.V. Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry. Ivanovo: PresSto, 2010, 363 p. (rus)

Сведения об авторах:

Федосов Сергей Викторович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, Scopus ID: 7005670404, SPIN-код: 1840-8194, <https://orcid.org/0000-0001-6117-7529>. E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Коротеев Дмитрий Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, Scopus ID: 24481588600, SPIN-код: 6175-8607, <https://orcid.org/0000-0002-9896-3555>. E-mail: koroteevmgsu@yandex.ru

About the authors:

Fedosov Sergey V. Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia, Scopus ID: 7005670404, SPIN-код: 1840-8194, <https://orcid.org/0000-0001-6117-7529>. E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Koroteev Dmitry D. Candidate in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia, Scopus ID: 24481588600, SPIN-код: 6175-8607, <https://orcid.org/0000-0002-9896-3555>. E-mail: koroteevmgsu@yandex.ru

Вклад авторов: Федосов С.В. — концепция исследования, разработка модели кинетики и динамики теплопереноса в системе «железобетонная конструкция – облицовочное покрытие», научное редактирование; **Коротеев Д.Д.** — выполнение числовых расчетов, подготовка текста, подготовка рисунков, анализ результатов расчетов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы утвердили окончательный вариант статьи.

The authors declare no conflict of interest.

The authors have approved the final version.

Статья поступила в редакцию 21.04.2026
Одобрена после рецензирования 01.06.2026
Принята к публикации 14.06.2026

The article was submitted 21.04.2026
Approved after reviewing 01.06.2026
Accepted for publication 14.06.2026