

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90
УДК 621.1

Аналитический и численный расчеты квазиустановившегося режима теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений

Р.А.Садыков¹, А.К. Мухаметзянова¹, С.А.Филимонова²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Казань, Российская Федерация.

²ООО «Метрополис»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация: в реальных условиях эксплуатации зданий и сооружений все процессы переноса протекают при неустановившихся режимах, что связано с непрерывными изменениями параметров состояния наружного воздуха (сезонные, суточные и более короткие по времени колебания), тепловыделениями и аккумуляцией теплоты и влаги в помещениях в результате функциональных процессов и работы инженерно-экологических систем жизнеобеспечения зданий и сооружений (кондиционирования, вентиляции, отопления и др.). Поэтому исследования нестационарных и квазистационарных режимов переноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений имеет прямое практическое приложение и является актуальной проблемой современности.

Целью исследования является физико-математическое описание квазиустановившегося процесса кондуктивного теплопереноса через ограждающие конструкции зданий при периодическом изменении температуры наружного воздуха и обобщение полученных аналитических и численных решений краевой задачи и проведенных теплотехнических расчетов для любых других ограждающих конструкций и климатических зон. Задачами исследования являются аналитическое решение нестационарных и квазистационарных краевых задач и написание соответствующих алгоритмов для расчета полей температур в ограждающих конструкциях в ПО Mathcad и Microsoft Excel, а также численное моделирование нестационарного и квазистационарного кондуктивного переноса в программных обеспечениях Elcut.

Основные результаты исследования состоят в том, что авторами были формализованы математические модели краевой задачи нестационарного и квазистационарного теплопереноса, по которым написаны расчетные программы в ПО Mathcad и Microsoft Excel. Корректность постановки краевой задачи и алгоритмов расчета определена путем сравнения аналитических решений с результатами вычислений в программных обеспечениях Elcut и Ansys Fluent. Также было установлено, что расчёт многослойной ограждающей конструкции при экстремальных значениях температур наружного воздуха в стационарных режимах необходим, но для получения объективной оценки энергоэффективности строительных конструкций требуется выполнение расчетов и при неустановившихся режимах эксплуатации зданий и сооружений, которые точнее отражают реальные процессы тепло- и массопереноса в них, учитывая амплитуду колебания температур наружного воздуха.

В работе исследовано изменение температуры ограждающих конструкций зданий и сооружений в течение суток и формализована математическая модель для переходного процесса теплопереноса через однослойную ограждающую конструкцию. Также было проведено исследование квазистационарного переноса теплоты через ограждающую конструкцию аналитическим и численным методами и приведены теплотехнические расчеты, которые применимы для любых ограждающих конструкций и климатических зон.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что в условиях интенсивного развития строительной индустрии и повышения её эффективности, связанной с разработкой новых технологий, снижением материальных и

энергетических затрат на производство строительных материалов, остро встает вопрос учёта нестационарности процессов тепло- и массопереноса при теплотехнических расчетах различных ограждающих конструкций.

Ключевые слова: математическая модель, ограждающая конструкция, краевая задача, теплоперенос, расчет, режим, тепловая волна.

Для цитирования: Р.А.Садыков, А.К. Мухаметзянова, С.А.Филимонова. Аналитический и численный расчеты квазиустановившегося режима теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений//Известия КГАСУ 2022 №1(59). С 90-102.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90

Analytical and numerical calculations of the quasi-steady-state heat transfer mode in the enclosing structures of buildings and structures

R.A.Sadykov¹, A.K. Mukhamezianova¹, S.A. Filimonova²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

Kazan, Russian Federation

²LLC "Metropolis"

Moscow Russian Federation

Abstract: In real operating conditions of buildings and constructions, all transfer processes proceed under unsteady modes, which is associated with continuous changes in the parameters of the state of the outside air (seasonal, daily and shorter in time fluctuations), heat release and accumulation of heat and moisture in rooms as a result of functional processes and work of engineering and ecological systems of building and construction functioning (air conditioning, ventilation, heating, etc.). Therefore, the study of unsteady and quasi-steady transfer modes of buildings and constructions in the enclosing structures has a direct practical application and it is an urgent problem of our time.

The aim of the study is physical and mathematical description of the quasi-steady process of conductive heat transfer through the enclosing structures of buildings with a periodic change in the outside air temperature and generalization of the obtained analytical and numerical solutions of the boundary value problem and the performed heat engineering calculations for any other enclosing structures and climatic zones. The objectives of the study are the analytical solution of unsteady and quasi-steady boundary value problems and the writing of the corresponding algorithms for calculating the temperature fields in the enclosing structures in the Mathcad and Microsoft Excel software, as well as the numerical modeling of the unsteady and quasi-steady conductive transfer in the Elcut and Ansys Fluent software.

The main results of the research are that the authors formalized mathematical models of the boundary value problem of unsteady and quasi-steady heat transfer, which were used to create computational programs in Mathcad and Microsoft Excel software. The correctness of the statement of the boundary value problem and the calculation algorithms was determined by comparing analytical solutions with the results of calculations in the Elcut and Ansys Fluent software. It was also found that the calculation of a multilayer enclosing structure at extreme values of outside air temperatures in steady modes is necessary, but to obtain an objective assessment of the energy efficiency of building constructions, calculations are also required under unsteady modes of operation of buildings and constructions, which more accurately reflect the real processes of heat and mass transfer in them, taking into account the amplitude of fluctuations in outside temperatures.

The paper investigates the change in the temperature of the enclosing structures of buildings and constructions during the day and formalizes a mathematical model for the transfer process of heat transfer through a single-layer enclosing structure. Also, a study of quasi-steady heat transfer through the enclosing structure was carried out using analytical and numerical methods,

and heat engineering calculations applicable for any enclosing structures and climatic zones were presented.

The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that in the conditions of the intensive development of the construction industry and an increase in its efficiency associated with the development of new technologies, a decrease in material and energy costs for the production of building materials, the issue of taking into account the unsteadiness of heat and mass transfer processes in heat engineering calculations of various enclosing structures becomes urgent.

Keywords: mathematical model, enclosing structure, boundary value problem, heat transfer, calculation, mode, heat wave.

For citation: Sadykov R.A., Mukhamezianova A.K., Filimonova S.A. Analytical and numerical calculations of the quasi-steady-state heat transfer mode in the enclosing structures of buildings and structures//News KSUAE 2022 №1(59). С 90-102. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90

1. Введение

Одной из актуальных проблем современности является поиск и создание простых в реализации и надежных методов теплового расчета многослойных ограждающих конструкций (ОК) зданий, оценки их теплофизических свойств, а также расчета их энергоресурсоэффективности [1-6].

Теплофизические свойства применяемых многослойных ОК существенно влияют на тепловой и воздушный режимы здания, а также на работу инженерных систем здания (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха) [7-9], на которые затрачивается основное количество тепловой энергии.

Проектирование ОК и расчет необходимого сопротивления теплопередаче, а также последовательность расположения конструктивных слоев, при которых обеспечивается требуемый режим эксплуатации здания, ведется только при стационарных режимах переноса [10,11]. Однако, в реальных условиях эксплуатации зданий и сооружений, процессы теплопереноса через ОК практически всегда протекают в нестационарном и квазистационарном режимах [12-17], что часто приводит к значительному изменению свойств ОК. Поэтому исследование нестационарности процессов переноса в ОК является актуальной задачей.

В строительной теплотехнике одной из задач, требующих учета нестационарности теплопереноса, является расчет затухания температурных колебаний в толще ОК в связи с колебаниями температуры наружного воздуха и под воздействием солнечного излучения. Поэтому решаемая задача является актуальной, т. к. суточные изменения температуры атмосферного воздуха могут достигать больших значений в различные периоды года и оказывать значительное влияние на теплозащитные характеристики и свойства материалов ОК зданий и сооружений.

Целью исследования является физико-математическое описание квазиустановившегося процесса кондуктивного теплопереноса через ограждающие конструкции зданий при периодическом изменении температуры наружного воздуха и обобщение полученных аналитических и численных решений краевой задачи и проведенных теплотехнических расчетов для любых других ограждающих конструкций и климатических зон. Задачами исследования являются аналитическое решение нестационарных и квазистационарных краевых задач и написание соответствующих алгоритмов для расчета полей температур в ограждающих конструкциях в ПО Mathcad и Microsoft Excel, а также численное моделирование нестационарного и квазистационарного кондуктивного переноса в программных обеспечениях Elcut.

2. Материалы и методы

Математическая модель (ММ) процесса.

Рассмотрим процесс передачи теплоты через однослойную стенку толщиной δ . В ММ принимается, что изменение температуры по толщине (x) рассматриваемой стенки

много больше, чем по ее высоте (z) и ширине (y), т. е. $\frac{\partial t}{\partial x} \neq 0$, а $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} \approx 0$.

Предполагается также, что теплофизические характеристики ОК постоянны и она представляет собой кусочно-однородное сплошное тело.

Поле температур ОК зданий за сутки подчиняется закону простого гармонического колебания температуры на наружной поверхности (в дневные часы температура на наружной поверхности ОК и плотность теплового потока выше, а в ночные – ниже) [18, 19]. Например, изменение температуры во времени наружной поверхности ОК в течение суток может быть описано периодическим законом косинуса:

$$t(0, \tau) = t_{\text{н}}(\tau) = t_{\text{ср}} + t_A \cos \omega \tau,$$

где $t_{\text{ср}}$ - средняя температура на поверхности ОК, t_A – амплитуда колебаний температуры на поверхности ОК; $\omega = \frac{2\pi n}{\tau_0}$ – циклическая частота (период/час) колебаний температуры поверхности, τ_0 – полный период колебаний.

Колебания температуры около значения $t_{\text{ср}}$ на поверхности и на глубине x показаны на рис. 1, иллюстрирующем амплитуды t_A и t_{0x} и период колебания $\tau_0 = \frac{2\pi}{\omega}$.

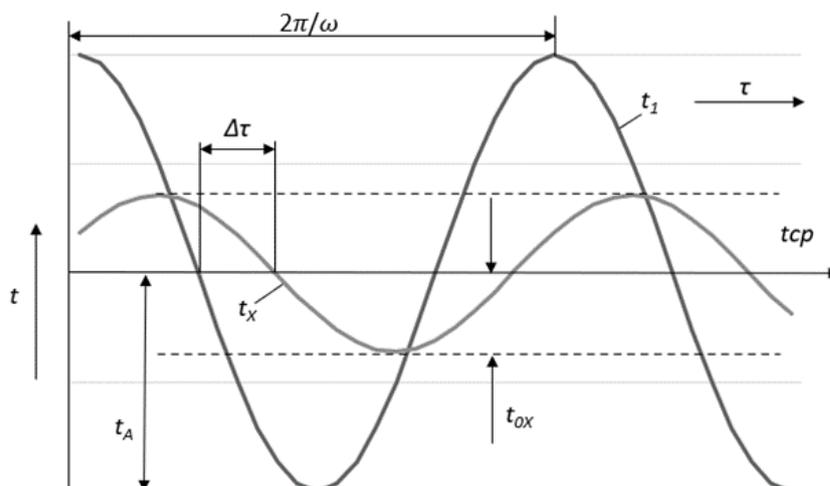


Рис. 1. Характеристики температурной волны в ОК (t_1 – температура на наружной поверхности ОК; t_x – температурная волна в толще ОК; $\Delta\tau$ – время запаздывания температурной волны)

Температуру на внутренней поверхности ограждения, поддерживаемую за счет работы системы отопления, можно считать постоянной.

$$t(\delta, \tau) = t_{\text{в}} = \text{const}.$$

Таким образом, квазистационарный перенос количества теплоты, проходящей через ОК можно рассчитать с помощью решения дифференциального уравнения (ДУ) молекулярного переноса с граничными условиями (ГУ) в следующем виде:

$$\begin{cases} t_{\tau} = at_{xx}, & x \in (0, \delta), \tau > 0, & (1) \\ t(0, \tau) = f(\tau) = t_{\text{н}} = t_{\text{ср}} + t_A \cos \omega \tau, & \tau > 0, & (2) \\ t(\delta \rightarrow \infty, \tau) = t_{\infty} = t_{\text{в}} \neq \infty, & \tau > -\infty, & (3) \end{cases}$$

где a - коэффициент температуропроводности материала.

Если процесс теплового колебания на наружной поверхности ОК здания продолжается достаточно долго, то устанавливается квазиустановившийся режим и начальные условия (НУ) не отражаются на изменении $t(x, \tau)$ [20]. Поэтому НУ в таких процессах не рассматриваются.

По рассмотренной методике, был произведен расчет температурных полей в различных сечениях фактурного слоя ОК в течении одних суток.

В качестве примера исследуемой ОК, была выбрана кирпичная стена толщиной $\delta=0,51\text{ м}$ с теплотехническими характеристиками: $\lambda=0,75\text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $\rho=1800\text{ кг/м}^3$, $c=880\text{ Дж/кг}^\circ\text{С}$.

За расчетный период выбрана дата 09.08.2020 г. Казань (аналогично могут быть рассчитаны поля температур для любой другой ОК, любой даты и любого другого местоположения). Начальная средняя температура наружного воздуха и температура воздуха внутри здания одинаковы и равны 18°С , амплитуда колебаний температуры наружного воздуха составляет $4,8^\circ\text{С}$, максимум температуры ($22,8^\circ\text{С}$) наблюдается в 15:00 (рис. 3а).

Численное моделирование квазистационарного режима в ОК.

В ПО Elcut создана 2d геометрия однослойной кирпичной стены и автоматически построена сетка, заданы теплотехнические характеристики рассматриваемого материала – кирпича и ГУ на наружной и внутренней поверхностях.

Колебания температуры наружного воздуха для г. Казань аппроксимированы гармонической функцией, она является граничным условием при численном расчете КЗ, который представлен ниже:

$$t_x = 18 + 4,8 \cdot \cos[360 \cdot (\tau + 32400)/86400].$$

3. Результаты

Решение краевой задачи (КЗ) без начальных условий (1)-(3) можно найти методом Фурье [21, 22], представляя поле температур в виде:

$$t(x, \tau) = F(\tau) \cdot G(x). \quad (4)$$

Поскольку изменение температуры должно быть гармоническим, необходимо, чтобы переменные входили в аргументы некоторой тригонометрической функции. Это достигается путем представления решения для $F(\tau)$ в виде экспоненты с мнимым показателем. После дифференцирования (4) по x и τ , и подстановки в (1), следует:

$$\frac{F_\tau}{aF(\tau)} = \frac{G_{xx}}{G(x)}. \quad (5)$$

Чтобы функция (4) была интегралом (1), равенство (5) должно быть для всех значений x и τ .

Фиксируя, например, некоторое значение x и меняя τ , следует, что правая и левая части равенства (5) при изменении своих аргументов сохраняют постоянное значение:

$$\frac{F_\tau}{aF(\tau)} = \frac{G_{xx}}{G(x)} = \pm ik^2, \quad (6)$$

где $k = \text{const}$; $i = \sqrt{-1}$ мнимая единица, которую можно представить в виде: $i = (i + 1)^2/2$.

Из соотношения (6) следует два независимых обыкновенных ДУ, для нахождения функций $F(\tau)$ и $G(x)$:

$$F_\tau \pm ik^2 aF(\tau) = 0, \quad (7)$$

$$G_{xx} \pm ik^2 G(x) = 0. \quad (8)$$

Из решения (7) и (8), с учетом (4) получим:

$$t(x, \tau) = C \cdot \exp(\pm ik^2 a \tau) \cdot \exp(\pm ik^2 \sqrt{ix}). \quad (9)$$

Физически возможное решение (9), при котором температура бесконечно не возрастает с ростом x , получит вид:

$$t(x, \tau) = \exp(-kx\sqrt{1/2}) \left\{ C_1 \cdot \exp \left[i \left(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2} \right) \right] + C_2 \cdot \exp \left[-i \left(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

Используя формулу Эйлера, решение (10) записывается через тригонометрические функции:

$$t(x, \tau) = \exp(-kx\sqrt{1/2}) \cdot [A \cdot \cos(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2}) + B \cdot \sin(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2})], \quad (11)$$

или через фазовый угол φ (11) будет:

$$t(x, \tau) = C \cdot \exp(-kx\sqrt{1/2}) \cdot \cos(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2} - \varphi), \quad (12)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{B}{A}, \quad C = \sqrt{A^2 + B^2},$$

здесь постоянные A , B и k находятся из ГУ. Периодическую функцию температуры $t(0, \tau) = f(\tau)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$t(0, \tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos \frac{2\pi n \tau}{\tau_0} + b_n \cdot \sin \frac{2\pi n \tau}{\tau_0} \right), \quad (13)$$

уравнение (11) при ГУ $x=0$, принимает вид:

$$t(0, \tau) = A \cdot \cos(k^2 a \tau) + B \cdot \sin(k^2 a \tau), \quad (14)$$

где $A = a_n = t_0$ – амплитуда температуры на поверхности ОК; $k = \sqrt{2\pi n / \tau_0 a}$; $B = b_n = 0$, т.к. в ГУ (2) задана функция косинуса.

В (13) $a_0/2$ – средняя температура на поверхности при $x=0$, не входит в решение. Этот член обычно является средней величиной колеблющейся температуры при $x=0$ и является результатом начальной неравномерности в момент времени $\tau = 0$.

Подставляя значения неизвестных в уравнение (11) с учетом (13), получим следующее решение КЗ (1)-(3):

$$t(x, \tau) = t_{cp} + t_0 \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi n}{\tau_0 a}}\right) \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} \tau - x \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi n}{\tau_0 a}}\right) \right], \quad (15)$$

или

$$t(x, \tau) = t_{cp} + t_0 \cdot \exp(-x\sqrt{\omega/2a}) \cdot \left[\cos(\omega\tau - x\sqrt{\omega/2a}) \right]. \quad (16)$$

Полученное решение КЗ применимо для плоской стенки, при условии, что температурные волны не достигают ее противоположной поверхности, т.е. отсутствует взаимное наложение температурных волн, направленных с противоположных сторон.

Для масштабных переходов уравнение (16) можно переписать в критериальной записи:

$$\theta = \exp\left(-\sqrt{\pi/F_{0x}}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right), \quad (17)$$

где $\theta = (t - t_{cp})/t_A$ – безразмерная температура; $F_{0x} = \alpha\tau/x^2$ – теплообменный критерий Фурье;

Для расчета тепловых потоков и энергосбережения в зданиях и сооружениях можно найти параметр средней температуры $\bar{\theta}$, который находится интегрированием (17) от 0 до 1:

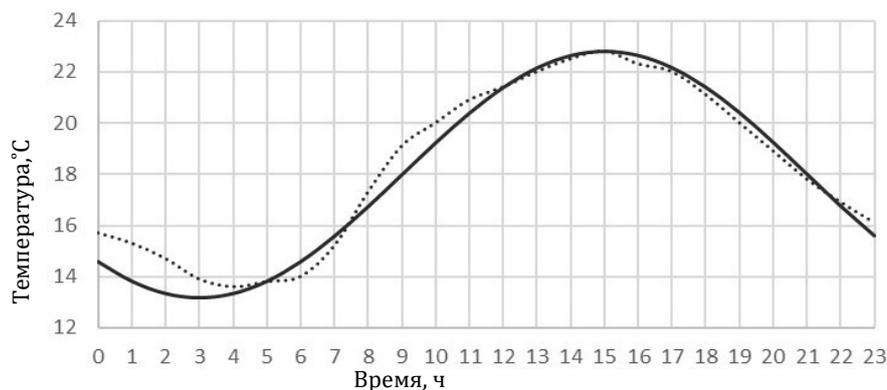
$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_{0x}}{\pi}} \cdot \left\{ \sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0}\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \right\}. \quad (18)$$

Для определения напряжений в ОК можно из (17) дифференцированием по x найти теплотехнический параметр градиента температуры G :

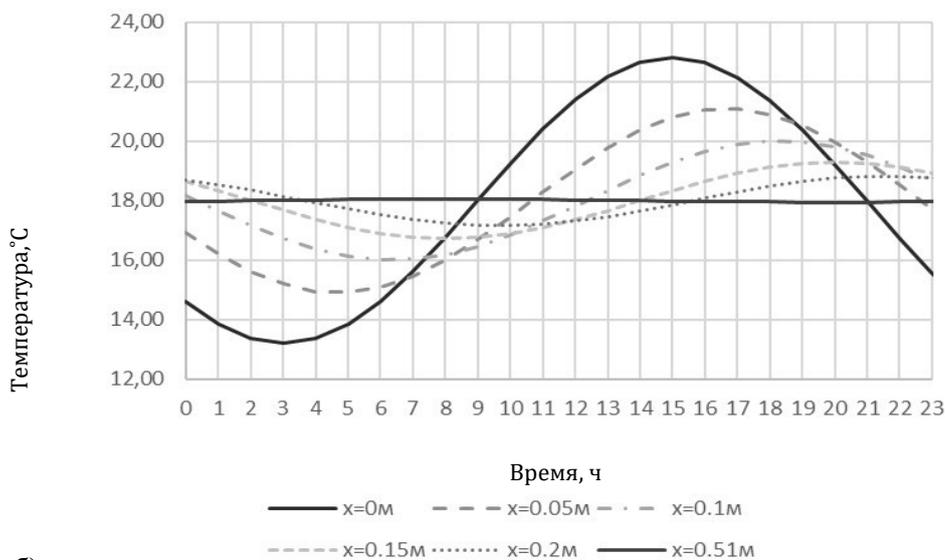
$$G = \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \cdot \left[\sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \right]. \quad (19)$$

Графическое представление аналитического решения КЗ (1)-(3) на примере расчета поля температур в ОК.

Результаты аналитического расчета затухания температурной волны в стене с течением времени на различной глубине показаны на рис. 2б и 2в.



а) Температура наружного воздуха — Гармонический закон температуры



б)

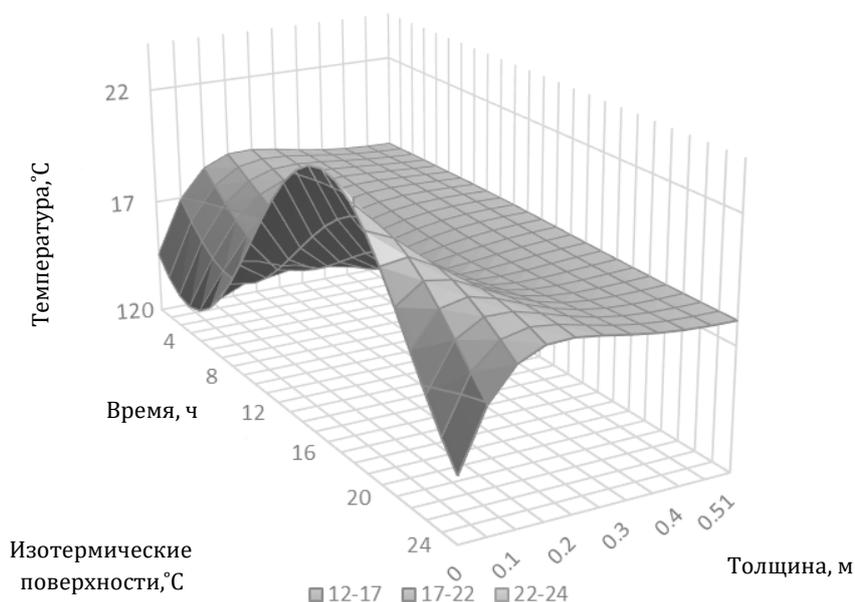
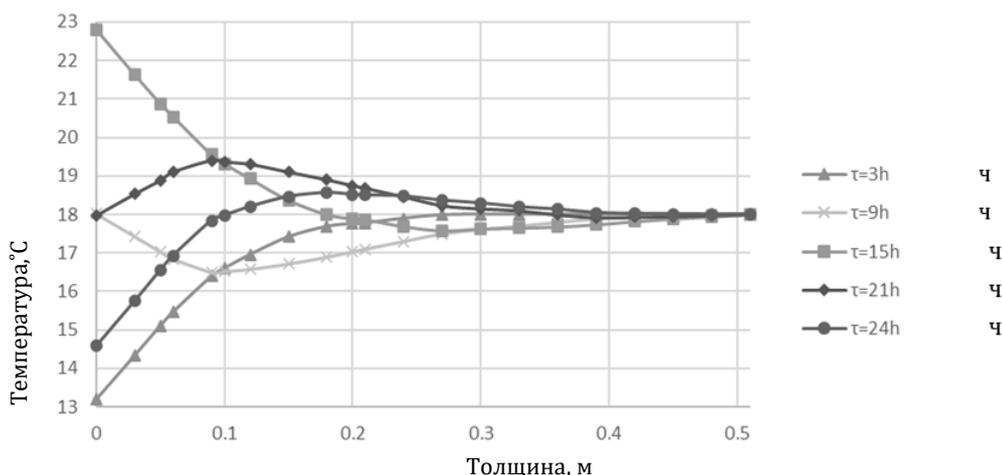
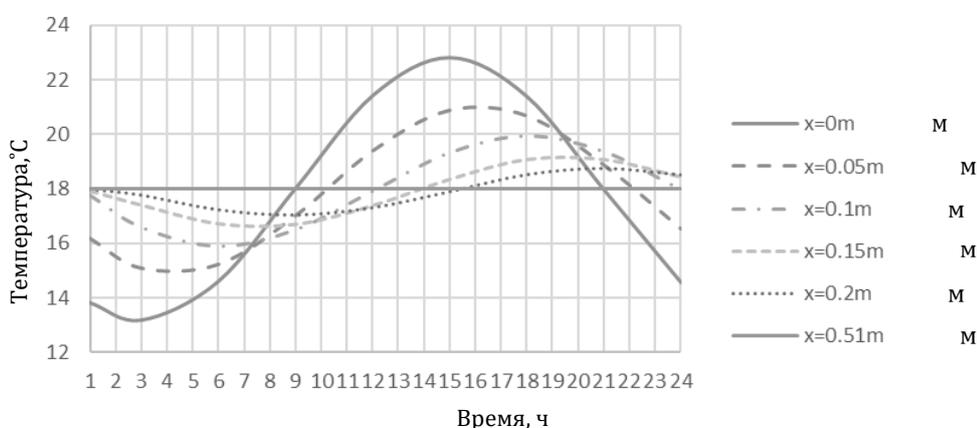


Рис. 2. а) Значения температуры наружного воздуха в каждый час рассматриваемого интервала времени в г. Казань 09.08.2020; б) Изменение по времени суток температуры поверхности стены в различных ее сечениях; в) Рельеф дневной температурной волны в однослойной кирпичной стене

В результате численных расчетов получены значения температур на различной глубине в течение 24 часов, они представлены на рис. За [изменение $t(x)$ через фиксированное время] и 3б [изменение $t(\tau)$ на различной глубине]:



а)



б)

Рис. 3. а) Затухание температурной волны по толщине стены в разное время суток;
 б) Изменение по времени суток температуры стены на различной глубине

Таким образом, по результатам численного исчисления найдены поля температур и тепловых потоков на различной глубине ОК в любой момент рассматриваемого периода времени. Например, температура на глубине 0.2м через 9ч 30мин равна 17.14°C.

4. Обсуждение

Таким образом, по рассмотренному аналитическому решению, можно определить значение температуры на любой глубине ОК в различное время суток. Например, значение температуры стены на глубине 0.2 м через 9 часов 30 минут после начала теплового процесса равно 17.17°C.

Результаты полученных исследований приводят к следующему обобщению: распространение температурной волны в ОК подчиняется трем основным законам Фурье, т.е. если температура на поверхности длительное время изменяется по гармоническому закону, то в объеме ОК также устанавливаются колебания температуры с тем же периодом, причем амплитуда колебаний температуры экспоненциально убывает с глубиной

$$t_A(x) = t_A \cdot \exp(-x\sqrt{\omega/2a}), \tag{20}$$

Следовательно, если глубины растут в арифметической прогрессии, то амплитуды колебаний температуры, согласно первому закону Фурье, растут в геометрической прогрессии.

Момент времени, когда температура поверхности впервые достигает среднего значения t_{cp} , приходится на время, когда $\cos \omega t = 0$, или на время $\tau_{x=0} = \pi/2\omega$. Аналогично на глубине x температура $t_{cp,x}$ впервые достигается тогда, когда

$\cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x\right) = 0$, или в момент времени $\tau = \pi/2\omega + x\sqrt{1/2a\omega}$. Этот момент наступает позднее, чем на поверхности, на величину $\Delta\tau$ (рис. 1), равную:

$$\Delta\tau = \sqrt{0.5\omega}x = 0.5x\sqrt{P/\pi a}, \quad (21)$$

которая, в соответствии со вторым законом Фурье, называется временем запаздывания (релаксации) температурной волны.

Согласно третьему закону Фурье, глубина проникновения тепла в толщу ограждения зависит от периода колебаний температуры на поверхности. Из (20) видно, что чем меньше период, тем меньше глубина проникновения температуры. Для температурных колебаний с периодами τ_{01} и τ_{02} глубины x_1 и x_2 , на которых происходят одинаковое относительное изменение температуры связаны соотношением

$$x_2 = x_1\sqrt{\tau_{02}/\tau_{01}}. \quad (22)$$

При решении предельных КЗ в инженерной практике для нахождения локальных величин, например потоков, также удобно использовать бесполевой метод расчета тепловых и диффузионных потоков, который существенным образом использует производную произвольного индекса [26].

Из анализа результатов следует, что максимальная разница в расчетах, полученных в ходе аналитического и численного решений не выше 2% при расчетах в ПО Elcut. Отсюда следует, что КЗ без начальных условий поставлена корректно, а созданная численная ММ пригодна для решения подобных или более сложных КЗ кондуктивного переноса.

5 Заключение

1. В работе исследовано изменение температуры ОК зданий и сооружений в течение суток для г. Казань, которое можно описать простым гармоническим колебанием или наложением косинусоид.

2. При изменении температуры наружного воздуха в прямом или обратном направлениях, внутри ОК можно зафиксировать температурные волны, которые угасая, идут в глубину ОК.

3. Формализована математическая модель для переходного процесса теплопереноса через однослойную ОК, при задании температуры наружного воздуха в виде правильного гармонического колебания.

4. Проведено исследование квазистационарного переноса теплоты через однослойную ОК аналитическим и численным методами. Получены поля температур в толще ОК за каждый час рассматриваемых суток, с учетом заданного изменения температуры наружной поверхности стены по периодическому закону при аналитическом и численном решениях.

5. По полученным полям температур рассчитываются другие производные теплотехнические характеристики: средние температуры и скорости ее изменения, температурные напряжения (∇t) и их максимальные значения в ОК, тепловые потоки, теплопотери и ряд др.

6. Приведенные теплотехнические расчеты применимы для любых ОК и климатических зон.

Список литературы

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) – 3-е изд. Спб.: изд-во «АВОК Северо-Запад», 2006. 400 с.

2. Roberz F., Loonen R., Hoes P., Hensen J. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass // Energy and Buildings, 2017. Vol. 138. P. 432-442. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.049

3. Leccese F., Salvadori G., Asdrubali F., Gori P. Passive thermal behaviour of buildings: Performance of external multi-layered walls and influence of internal walls // *Applied Energy*, 2018. Vol. 225. P. 1078-1089. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.090
4. Reilly A., Kinnane O. The impact of thermal mass on building energy consumption // *Applied Energy*, 2017. Vol. 198. P. 108-121. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024
5. Ge J., Xue Y., Fan Y. Methods for evaluating and improving thermal performance of wall-to-floor thermal bridges // *Energy and Buildings*, 2021. Vol. 231, P. 1-15. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110565
6. Stavridou A., Prinos P. Unsteady CFD Simulation in a Naturally Ventilated Room with a Localized Heat Source // *Procedia Environmental Sciences*, 2017. Vol. 38. P. 322-330. DOI:10.1016/j.proenv.2017.03.087
7. Ravelo B., Rajaoarisoa L., Maurice O. Thermal modelling of multilayer walls for building retrofitting applications // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101126
8. Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Asdrubali F. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements // *Building and Environment*, 2018. Vol. 127. P. 77-85. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.10.038
9. Thomas L., Marino B., Muñoz N. Steady-state and time-dependent heat fluxes through building envelope walls: A quantitative analysis to determine their relative significance all year round // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. DOI:10.1016/j.jobe.2019.101122
10. Kong Q., He X., Cao Y., Sun Y., Chen K., Feng J. Numerical Analysis of the Dynamic Heat Transfer through an External Wall under Different Outside Temperatures // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 105. P. 2818-2824.
11. Borodulin V., Nizovtsev M. Modeling heat and moisture transfer of building facades thermally insulated by the panels with ventilated channels // *Journal of Building Engineering*, 2021. Vol. 40. DOI:10.1016/j.jobe.2021.102391
12. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 132. P. 351-356. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.748
13. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer // *International Journal of Thermal Sciences*, 2020. Vol. 156. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461
14. Vargas-González S., Núñez-Gómez K., López-Sánchez E., Tejero-Andrade J., Ruiz-López I., García-Alvarado M. Thermodynamic and mathematical analysis of modified Luikov's equations for simultaneous heat and mass transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021. Vol. 120.
15. Zhai H., Nie B., Chen B., Xu F. Unsteady flows on a roof imposed by a periodic heat flux: 2D simulation and scaling analysis // *International Journal of Thermal Sciences*, 2019. Vol. 145. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106002
16. Pečenko R., Challamel N., Colinart T., Picandet V. (Semi-)analytical solution of Luikov equations for time-periodic boundary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 124. P. 533-542. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.106
17. Marino B., Muñoz N., Thomas L. Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects // *Energy and Buildings*, 2018. Vol. 174. P. 452-463. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.07.008
18. Schneider P. *Engineering Problems in Heat Conduction*. M.: IL, 1960. 478 p.
19. Aramanovich I.G., Levin V.I. *Uravneniya matematicheskoy fiziki*. M.: Nauka, 1964. 288p.
20. Eckert E. R. G., Drake R. M. *Analysis Of Heat And Mass*. M.: IL, 1961. 104 p.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. M.: IL, 1964. 488 p.
22. Samkob S.G., Kilbasb A.A., Marichev O.I. *Integraly i proizvodnyye drobnogo poryadka i nekotoryye ikh prilozheniya*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 688 p.

References

1. Bogoslovsky V.N. Building Thermal Physics (Thermophysical Foundations of Heating, Ventilation and Air Conditioning) - 3rd ed. St.P: Publishing House "AVOK Severo-Zapad", 2006. 400p.
2. Roberz F., Loonen R., Hoes P., Hensen J. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass // *Energy and Buildings*, 2017. Vol. 138. P. 432-442. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.049
3. Leccese F., Salvadori G., Asdrubali F., Gori P. Passive thermal behaviour of buildings: Performance of external multi-layered walls and influence of internal walls // *Applied Energy*, 2018. Vol. 225. P. 1078-1089. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.090
4. Reilly A., Kinnane O. The impact of thermal mass on building energy consumption // *Applied Energy*, 2017. Vol. 198. P. 108-121. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024
5. Ge J., Xue Y., Fan Y. Methods for evaluating and improving thermal performance of wall-to-floor thermal bridges // *Energy and Buildings*, 2021. Vol. 231, P. 1-15. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110565
6. Stavridou A., Prinos P. Unsteady CFD Simulation in a Naturally Ventilated Room with a Localized Heat Source // *Procedia Environmental Sciences*, 2017. Vol. 38. P. 322-330. DOI:10.1016/j.proenv.2017.03.087
7. Ravelo B., Rajaoarisoa L., Maurice O. Thermal modelling of multilayer walls for building retrofitting applications // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101126
8. Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Asdrubali F. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements // *Building and Environment*, 2018. Vol. 127. P. 77-85. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.10.038
9. Thomas L., Marino B., Muñoz N. Steady-state and time-dependent heat fluxes through building envelope walls: A quantitative analysis to determine their relative significance all year round // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. DOI:10.1016/j.jobe.2019.101122
10. Kong Q., He X., Cao Y., Sun Y., Chen K., Feng J. Numerical Analysis of the Dynamic Heat Transfer through an External Wall under Different Outside Temperatures // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 105. P. 2818-2824.
11. Borodulin V., Nizovtsev M. Modeling heat and moisture transfer of building facades thermally insulated by the panels with ventilated channels // *Journal of Building Engineering*, 2021. Vol. 40. DOI:10.1016/j.jobe.2021.102391
12. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 132. P. 351-356. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.748
13. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer // *International Journal of Thermal Sciences*, 2020. Vol. 156. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461
14. Vargas-González S., Núñez-Gómez K., López-Sánchez E., Tejero-Andrade J., Ruiz-López I., García-Alvarado M. Thermodynamic and mathematical analysis of modified Luikov's equations for simultaneous heat and mass transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021. Vol. 120.
15. Zhai H., Nie B., Chen B., Xu F. Unsteady flows on a roof imposed by a periodic heat flux: 2D simulation and scaling analysis // *International Journal of Thermal Sciences*, 2019. Vol. 145. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106002
16. Pečenko R., Challamel N., Colinart T., Picandet V. (Semi-)analytical solution of Luikov equations for time-periodic boundary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 124. P. 533-542. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.106
17. Marino B., Muñoz N., Thomas L. Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects // *Energy and Buildings*, 2018. Vol. 174. P. 452-463. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.07.008

18. Schneider P. Engineering Problems in Heat Conduction. M.: IL, 1960. 478 p.
19. Aramanovich I.G., Levin V.I. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1964. P.288.
20. Eckert E. R. G., Drake R. M. Analysis Of Heat And Mass. M.: IL, 1961. 104 p.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids. M.: IL, 1964. 488 p.
22. Samkob S.G., Kilbasb A.A., Marichev O.I. Integraly i proizvodnyye drobnogo poryadka i nekotoryye ikh prilozheniya. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 688 p.

Информация об авторах

Ренат Ахатович Садыков, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Аида Камилевна Мухаметзянова, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: aidamukham@gmail.com

Светлана Алексеевна Филимонова, инженер-проектировщик 1 категории ООО «Метрополис», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: svfi1996@gmail.com

Information about the authors

Renat A. Sadykov, doctor of Technical Sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Aida K. Mukhamezianova postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: aidamukham@gmail.com

Svetlana A. Filimonova Engineer-designer of the 1st category, LLC "Metropolis", Moscow, Russian Federation

E-mail: svfi1996@gmail.com