

УДК 697

Садыков Р.А. – доктор технических наук, профессорE-mail: sadykov_r_a@mail.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет****ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ СТАЦИОНАРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ПЕРЕНОСА
С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА,
КОНДЕНСАЦИИ ИЛИ ИСПАРЕНИЯ ПАРООБРАЗНОЙ ВЛАГИ****АННОТАЦИЯ**

Для различных канонических форм (плоскость, цилиндр, шар и др.) предлагается обобщенная математическая модель (ММ) нелинейного стационарного процесса молекулярного переноса тепла (или влаги) через многослойные ограждающие конструкции (ОК) с учетом инфильтрации или эксфильтрации паровоздушной (газовой) смеси и наличия разнообразных внутренних или поверхностных стоков (влагосодержания) или источников теплоты (ИТ). Приводится математическая формализация поставленной одномерной краевой задачи переноса и ее общее решение, на основе которого при заданных различных условиях однозначности строятся и анализируются решения многообразных конкретных физических процессов с постоянными или переменными теплофизическими характеристиками и ИТ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, тепломассоперенос, ограждающая конструкция, фильтрация, влагосодержание, тепловой поток, испарение, конденсация, воздухопроницаемость.

Sadykov R.A. – doctor of technical sciences, professor**Kazan State University of Architecture and Engineering****THE THEORY OF THE STATIONARY NON-LINEAR TRANSFER PROCESS TAKING
INTO ACCOUNT AIR FILTRATION, CONDENSATION
OR EVAPORATION OF A VAPOROUS MOISTURE****ABSTRACT**

General mathematical model (MM) of the stationary non-linear molecular transfer of heat and moisture through shielding constructions (SC) with consideration of infiltration and ex-filtration of vapor-air mixture in the presence of internal heat drainages or heat sources (HS) is offered for various canonical forms (the plane, the cylinder, a sphere, etc.). Mathematical formalization of the one-dimensional transfer problem and its general solution are presented. On the basis of this general solution and under given set of various uniqueness conditions, solutions of concrete diverse physical processes with constant or variable thermo-physical characteristics and heat sources are constructed and analyzed.

KEYWORDS: mathematical model, heat and mass transfer, protecting design, filtration, moisture content, thermal stream, evaporation, condensation, air penetration.

Введение. Процессы тепло- и массопереноса, фильтрации парогазовых смесей и жидкостей через капилляры твердых ОК весьма сложны и тесно взаимосвязаны. Кроме того, в зависимости от периода года эти процессы сопровождаются такими физическими явлениями, как испарительное охлаждение или конденсационный нагрев. Осуществление же плотного наружного слоя ОК помещений возможно не во всех случаях, т.к. такое конструктивное решение может ухудшить влажностное состояние ограждения из-за трудностей воздухопроницаемости в ОК, а следовательно, и ее просушки в летний период года [1-5].

Современные многослойные энергосберегающие ОК (под которыми в широком смысле могут подразумеваться также тепловые или инженерные сети, емкости и резервуары для подогрева, охлаждения или хранения каких-либо жидкостей или газов и т. п.) в основном состоят из капиллярно-пористых твердых материалов, которые находят все большее применение не только в строительстве, но и во многих других отраслях промышленности (высокотемпературные теплообменники; тепловые, электрические и инженерные сети; турбинные лопатки; ракетные сопла; обшивка скоростных летающих аппаратов; обмуровка тепло- и электрогенерирующих

установок, системы ядерных реакторов с внутренним охлаждением и т. д.), где различные элементы оборудования подвержены достаточно высоким термическим напряжениям, возникающим в результате больших градиентов температуры ∇t [6-10].

Основная часть. Перенос тепловой энергии в ОК происходит через твердый скелет материала, жидкую и парообразную влагу, которые содержатся в капиллярно-пористых телах. Уравнение стационарного нелинейного переноса с учетом фильтрации (газа, парогазовой смеси, жидкости) и наличия внутренних объемных стоков (влаги) или ИТ при общепринятых допущениях [1-5] в одномерном случае применительно к каноническим формам в соответствующих системах координат в общем случае может быть записано в виде обыкновенного дифференциального неоднородного уравнения второго порядка [11-12]:

$$\left[I(t)t' \right]' + \frac{\Gamma-1}{r} [I(t)t]' + \operatorname{sgn}[G]G(t)c_p(t)t' + \operatorname{sgn}[I]I(t) = 0, \quad (1)$$

где $t(r)$ – температура; r – текущая координата, $r \in [0, h]$, h – толщина многослойной ОК; λ – коэффициент теплопроводности ОК (возможно с учетом её объемной пористости Π); Γ – постоянная формы ($\Gamma=1;2;3$ – соответственно неограниченная пластина, цилиндр или квадратный брусок, шар или куб); c_p – изобарная теплоемкость паровоздушной смеси; G – плотность потока паровоздушной смеси, здесь «+» означает процесс эксфильтрации, «-» – инфильтрации паровоздушной смеси; $I(t)$ – мощность внутреннего ИТ (+) или стока (-); «'» (верхний штрих) – дифференцирование по r ; $\operatorname{sgn}[\cdot]$ – (сигнум) функция «знак».

Если $I=\operatorname{const}$, то в рассматриваемой области термических сопротивлений действует непрерывно равномерно распределенный положительный или отрицательный ИТ.

Если $I(t) \neq \operatorname{const}$, то в этой области действуют местные, сосредоточенные или распределенные положительные или отрицательные ИТ.

При обобщенном физическом описании процессов охлаждения ОК (возможно и испарительного) или нагрева (возможно и конденсационного) аналогично уравнению (1) могут быть составлены тепловые балансы как для области $r \in [-\infty, 0]$, так и для области $r \in [h, +\infty]$, которые приводят к новым дифференциальным уравнениям набегающего к ОК и отходящего от ОК потоков газа (или жидкости) с соответствующими для новых закрытых интервалов r граничными условиями. В этом случае к дифференциальному уравнению (1) добавляются в зависимости от условий задачи еще один или два дифференциальных уравнения второго порядка и соответственно два или четыре граничных условия. Таким образом, обобщенная ММ даже только для стационарного теплопереноса в ОК должна содержать в себе три дифференциальных уравнения второго порядка и шесть граничных условий для нахождения соответствующих констант интегрирования. В этом случае температурное поле $t(r)$ в ОК выражается через температуры окружающего воздуха (газа, жидкости, теплоносителя или хладагента) по обе ее стороны. В более упрощенном варианте эти граничные дифференциальные уравнения для ОК заменяются краевыми условиями третьего рода с возможным учетом на границе поверхностей ОК поверхностных стоков или ИТ [6-9].

В свою очередь, уравнение (1) с граничными условиями третьего рода может быть заменено более простыми граничными условиями первого рода при условии ввода постоянных фиктивных (эквивалентных) пограничных слоев. Анализ конвективного теплообмена показывает, что в этом случае граничные условия третьего рода фактически отображаются в граничные условия первого рода. Тогда при интегрировании уравнения (1) и наличии в граничных условиях двух изотермических поверхностей можно использовать преобразование Кирхгофа [7, 9], которое через новую вспомогательную переменную q и средний коэффициент теплопроводности I_c приводит дифференциальное уравнение (1) к формализации следующей краевой задачи:

$$\left\{ \begin{aligned} q'' + \frac{\Gamma-1}{r} q' + \operatorname{sgn}[G] \frac{G(q)c_p(q)}{I_c} q' + \operatorname{sgn}[I] \frac{I(q)}{I_c} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$q(0) = q_1 = t_1, \quad (3)$$

$$q(h) = q_2 = t_2, \quad (4)$$

$$I_c q' = I(t) f', \tag{5}$$

где $I_c = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} I(x) dx$, $\Delta t = t_2 - t_1$, $t_2 > t_1$, t_1 и t_2 – температуры противоположных

поверхностей ОК. Направление потока тепла относительно $r \geq 0$ определяется граничными условиями задачи.

Формализованную задачу (2)-(4) можно переписать в критериальном виде через критерии Пекле (Pe) и Померанцева (Po) и безразмерных масштабах температуры (T) и термического сопротивления (\bar{R}), что особенно удобно, т. к. позволяет перевести многослойную ОК в однослойную.

В этом случае, опуская промежуточные преобразования, задачу (2)-(4) можно записать в виде:

$$\begin{cases} T'' + \frac{\Gamma - 1}{R} T' + \text{sgn}[Pe] Pe(T) T' + \text{sgn}[Po] Po(T) = 0, & (6) \\ T(0) = 0, & (7) \\ T(1) = 1, & (8) \end{cases}$$

где $T = \frac{q - q_1}{q_2 - q_1} \in [0, 1]$ – безразмерная температура, $\bar{R} = \frac{R}{R_0} \in [0, 1]$ – безразмерное

термическое сопротивление, здесь $R = r/I$ – текущее термическое сопротивление, R_0 – общее термическое сопротивление (суммарное, приведенное, требуемое или многослойной стенки), которое выбирается в зависимости от принятых граничных условий; $Pe = G(T) c_p(T) R_0$ (в строительной теплофизике выражение $G c_p R_0$ называют относительным коэффициентом фильтрационного теплообмена [3], характеризующим отношение тепловой емкости потока воздуха $G c_p$ к коэффициенту теплопередачи ограждения $K = 1/R_0$). Если учесть объемную

пористость ОК, то $Pe = \frac{G(T) c_p(T)}{1 - \Pi} R_0$; $Po = I(T) h^2 / I_c \Delta T$, в этой постановке задачи ΔT в критерии Померанцева можно опустить, т. к. максимальный перепад температур равен единице; «'» (верхний штрих) – дифференцирование по \bar{R} .

Если известны пределы изменения Pe и Po , то знак сигнатуры в уравнении (6) в принципе можно опустить, если рассматривать эти критерии только в интервале $[0, 1]$. Тогда критерии Пекле и Померанцева запишутся в виде $\bar{Pe} = (Pe - \inf Pe) / (sup Pe - \inf Pe)$, $\bar{Po} = (Po - \inf Po) / (sup Po - \inf Po) \in [0, 1]$. В этом случае все зависимые и независимые переменные и параметры поставленной краевой задачи безразмерны и лежат в четырехмерном нормированном единичном пространстве $(T, \bar{R}, \bar{Pe}, \bar{Po})$. Тогда система (6)-(8) переписется в виде:

$$\begin{cases} T'' + \frac{\Gamma - 1}{R} T' + \bar{Pe}(T) T' + \bar{Po}(T) = 0, & (9) \\ T(0) = 0, & (10) \\ T(1) = 1. & (11) \end{cases}$$

Таким образом, приведенные преобразования значительно упрощают математическую формализацию задачи, устраняют физические размерности и знаки, решают вопросы масштабного перехода. Единственно, несколько усложняется физическая интерпретация задачи, особенно когда в вышеуказанном пространстве строится графическое решение задачи, где фактически как бы «теряются» направленность потока (G) и знак ИТ (I) из-за отсутствия отрицательных значений параметров задачи на закрытом интервале $[0, 1]$, но это усложнение легко устраняется при обратном переходе к первоначальным параметрам поставленной задачи.

Рассмотрим в качестве примеров несколько упрощенных частных случаев решения

поставленной краевой задачи, часть из которых сводится к известным решениям, изложенным, в частности, в [1-9].

I. При $\Gamma=1$, $I(t)$, $Pe = const$, $Po = const$ и искусственно опущенного знака сигнатуры (т. к. Pe и $Po \notin [0,1]$), краевую задачу (6)-(8) можно записать в форме:

$$\begin{cases} T'' + Pe T' + Po = 0, & (12) \\ T(0) = 0, & (13) \\ T(1) = 1, & (14) \end{cases}$$

где при $Pe < 0$ происходит инфильтрация в ОК, при $Pe > 0$ – эксфильтрация, при $Pe = 0$ – фильтрация воздуха отсутствует; при $Po < 0$ действует отрицательный ИТ, при $Po > 0$ – положительный ИТ, при $Po = 0$ – ИТ отсутствует.

Аналитическое решение краевой задачи (12)-(14) получено в виде:

$$T = \frac{e^{-Pe \bar{R}} - 1}{e^{-Pe} - 1} \left(1 + \frac{Po}{Pe} \right) - \frac{Po}{Pe} \bar{R}, \quad (15)$$

которое уже охватывает все комбинации вышеперечисленных частных случаев параметров переноса (Pe, Po) при заданных условиях однозначности.

Таким образом, в зависимости от знака и величины Pe или Po , имеем различные ММ, отражающие соответствующие им физические процессы (явления). При условии же ввода в уравнение (12) \bar{Pe} и $\bar{Po} \in [0,1]$ обобщенная физическая интерпретация поставленной задачи и полученное в этом масштабе решение несколько усложняется ввиду отсутствия в ММ и ее решении отрицательных значений \bar{Pe} и \bar{Po} . Кроме того, необходимо отметить, что частное решение (15), несмотря на видимую простоту, получено все же при функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры $I[t(r)]$. Поэтому, если $I(t) \neq const$, то для получения профиля $t(r)$ необходимо полученное решение $T(\bar{R})$ первоначально перевести в $q(r)$, а далее обратным переходом через преобразование Кирхгофа (5) найти уже поле температур $t(r)$ в исходных обозначениях поставленной задачи. Алгоритм такого перехода рассмотрен на нижеследующем примере.

II. При $\Gamma = 2$, $I(t) = I_0(1 + bt)$ (I_0 – известный коэффициент при контрольной температуре t_0 , b – температурный коэффициент теплопроводности), $Pe = 0$ и $Po = 0$ получим промежуточное известное решение задачи (2)-(4) в виде:

$$q = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}. \quad (16)$$

Исходная же зависимая переменная $t(r)$ находится при помощи полуопределенного интегрирования (5) и для случая линейной зависимости $I(t)$ получим квадратное уравнение вида:

$$\frac{b}{2} t^2 + t = t_1 + \frac{b}{2} t_1^2 - \frac{I_c}{I_0} (t_1 - q), \quad (17)$$

где

$$I_c = I_0 \left[1 + \frac{b}{2} (t_1 + t_2) \right], \quad (18)$$

решая которое относительно t (корень из физических соображений берется с положительным знаком радикала) с учетом (16) и (18), получим:

$$t = \frac{1}{b} \left\{ (1 + bt_1) \sqrt{1 - \left[1 - \frac{(1 + bt_2)^2}{(1 + bt_1)^2} \right] \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} - 1} \right\}. \quad (19)$$

Сравнение случаев постоянного и переменного коэффициентов теплопроводности показывает, что непостоянство коэффициента теплопроводности при $b > 0$ повышает, а при $b < 0$ понижает теплообмен. Тогда формула для расчета прироста относительного изменения потока тепла из-за непостоянства коэффициента теплопроводности будет:

$$\Delta q = \frac{q(b) - q}{q} \text{ (для } b > 0) \quad \text{или} \quad \Delta q = \frac{q - q(b)}{q(b)} \text{ (для } b < 0). \quad (20)$$

В связи с тем, что термические напряжения сильно (особенно для высокотемпературных процессов) зависят от ∇t , то из (20) следует, что переменная теплопроводность может существенно влиять не только на распределение температур и теплообмен, но также и на величину и распределение термических напряжений, что подтверждается многочисленными практическими примерами из области авиа- и машиностроения, строительной индустрии и промышленной энергетики.

III. При $\Gamma = 2$, линейной зависимости $I(t)$, $Pe = 0$ и $Po = const$ общее решение дифференциального уравнения (2) путем промежуточной замены переменной $U = q + \frac{I}{4I_c} r^2$ можно свести к решению дифференциального уравнения для ранее рассмотренного случая II (когда $Po = 0$). Тогда общее решение уравнения (2) при $Po = const$ с учетом указанной замены запишется в виде:

$$q = c_1 \ln r - \frac{I}{4I_c} r^2 + c_2, \quad (21)$$

а после определения c_1 и c_2 из краевых условий (3), (4) решение $q(r)$ будет:

$$q = \left[t_2 - t_1 + \frac{I}{4I_c} (r_2^2 - r_1^2) \right] \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} - \frac{I}{4I_c} (r^2 - r_1^2) + t_1. \quad (22)$$

Для более упрощенного изложения алгоритма перехода к исходным переменным поставленной задачи примем $t_1 = t_2 = 0$. Тогда уравнение (22) примет вид:

$$q = \left[\frac{I}{4I_c} (r_2^2 - r_1^2) \right] \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} - \frac{I}{4I_c} (r^2 - r_1^2), \quad (23)$$

а квадратное уравнение относительно t будет:

$$\frac{bI_0}{2} t^2 + I_0 t - I_c q = 0, \quad (24)$$

из решения которого следует:

$$t = \frac{1}{b} (\sqrt{1 + 2bg} - 1), \quad (25)$$

где

$$g = \frac{I}{4I_0} \left[(r_2^2 - r_1^2) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} - (r^2 - r_1^2) \right]. \quad (26)$$

При $b = 0$ следует, что $t = g$, а при $b > 0$ следует $b \leq \frac{1}{2} \max g$.

Из анализа полученных решений аналогично примеру II выводится оценка температурного профиля в зависимости от $I(t)$ как при $b > 0$, так и при $b < 0$.

IV. При $\Gamma = 1$, $I = const$, $Po = const$ и $Pe = 0$ решением задачи (6)-(8) будет:

$$T = \bar{R} \left[1 + \frac{Po}{2} (1 - \bar{R}) \right], \quad (27)$$

а при совпадении потока тепла с положительным направлением оси r будет:

$$T = (1 - \bar{R}) \left(1 + \frac{Po}{2} \bar{R} \right). \quad (28)$$

Численные расчеты относительной температуры $T(\bar{R})$ для различных значений Po

показали, что в зависимости от значения Po температура стенки может быть заметно больше максимальной температуры поверхности стенки при $Po \geq 3$ и меньше минимальной температуры поверхности при $Po \leq -3$. Таким образом, чем выше влагосодержание (сток тепла ОК), тем глубже сдвигается фронт конденсации влаги внутрь ОК (зимний период года) и тем шире зона конденсации. Аналогично находятся смещение фронта испарения и сужение зоны конденсации в обратном направлении, т.е. к наружной поверхности ОК, когда происходит просушка ограждения (уменьшение влагосодержания и, соответственно, стока тепла в летний период года). Точное расположение фронта и зоны конденсации (испарения) можно найти из условий существования экстремума функции $T(\bar{R})$. Скорость смещения фронта и зоны конденсации (испарения) в том или ином направлении зависит от ∇t , влагосодержания и энергии (формы) связи влаги с материалом ОК. Плотность теплового потока находится из уравнения $q = -dT/dR$ и в первоначальных обозначениях при совпадении потока тепла с положительным направлением оси r примет вид:

$$q = \frac{I_c}{h}(t_1 - t_2) - I\left(\frac{h}{2} - r\right). \quad (29)$$

Из (29) следует, что q может быть со знаком «+» при совпадении с положительным направлением оси абсцисс r (когда $t_1 > t_2$), и со знаком «-» при направлении в сторону уменьшения r (когда $t_1 < t_2$).

Обобщенная постановка задачи (9)-(11) позволяет рассмотреть множество других вариаций параметров Γ , $I(t)$, $Pe(T)$, $Po(T)$ (с учетом направленности потоков и знака ИТ), но алгоритм решения будет аналогичен вышерассмотренным.

Исходное же уравнение (1) при переменных параметрах переноса [$I(t)$, $Pe(t)$, $Po(t)$] и краевых условиях различного рода (возможно смешанных и нелинейных), учитывающих и поверхностные источники (стоки) тепла, в наиболее общем случае решается численными или приближенными методами решения обыкновенных дифференциальных уравнений, а при определенных условиях указанных параметров переноса оно может быть сведено к решению известных дифференциальных уравнений Бесселя, Лежандра или к решению линейного неоднородного дифференциального уравнения n -го порядка (в нашем случае – второго) с переменными коэффициентами вида:

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i}(r) t^{(i)}(r) = f(r), \quad (30)$$

где $a_i(r)$ – переменные коэффициенты неоднородного дифференциального уравнения n -порядка; (i) – верхний индекс при t означает номер производной, $t^{(0)}=t$; $a_0=1$.

Общее решение которого есть:

$$t(r) = t_{oo}(r) + t_{ch}(r), \quad (31)$$

где $t_{oo}(r)$, $t_{ch}(r)$ – соответственно общее решение однородного уравнения ($f(r) = 0$) и какое-либо частное решение неоднородного уравнения.

Если на некотором интервале известна линейно независимая фундаментальная система решений t_i ($i = \overline{1, n}$) соответствующего однородного уравнения (30), то общее решение неоднородного уравнения может быть найдено методом вариации произвольных постоянных. В этом случае решение уравнения (30) ищем в виде [13]:

$$t(r) = \sum_{i=1}^n c_i(r) t_i(r), \quad (32)$$

где $c_i(r)$ – неизвестные функции находятся из системы n уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n c_i'(r)t_i(r) = 0, \\ \sum_{i=1}^n c_i'(r)t_i'(r) = 0, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n c_i'(r)t_i^{(n-1)}(r) = f(r). \end{cases} \quad (33)$$

Разрешая систему (33) относительно $c_i'(r)$, получим:

$$c_i' = Y_i(r), \quad (34)$$

откуда

$$c_i(r) = \int Y_i(r)dr + \bar{c}_i. \quad (35)$$

Далее, подставляя полученные значения $c_i(r)$ в (32), получим общее решение неоднородного уравнения (30). Например, для уравнения второго порядка система (33) примет вид:

$$\begin{cases} c_1't_1 + c_2't_2 = 0, \\ c_1't_1' + c_2't_2' = f(r). \end{cases} \quad (36)$$

Решая ее относительно c_1' и c_2' , найдем:

$$\begin{aligned} c_1(r) &= -\int \frac{t_2 f(r)}{W[t_1, t_2]} dr + \bar{c}_1, \\ c_2(r) &= \int \frac{t_1 f(r)}{W[t_1, t_2]} dr + \bar{c}_2, \end{aligned} \quad (37)$$

где $W(r) = W[t_1, t_2] = \begin{vmatrix} t_1(r) & t_2(r) \\ t_1'(r) & t_2'(r) \end{vmatrix}$ – Вронскиан для функций $t_i(r)$, \bar{c}_i ($i=1,2$) – произвольные постоянные интегрирования, определяемые из краевых условий задачи.

На рис. представлены некоторые характерные профили распределения $t(R)$ в ОК в зависимости от параметров переноса [$I(t)$, $Pe(t)$, $Po(t)$] и их знаков.

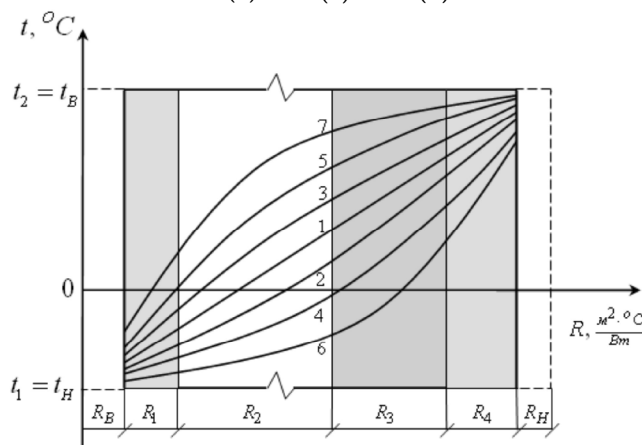


Рис. Характерные частные графические зависимости распределения $t(R)$ в многослойной ОК:

- (1) – без учета фильтрации, ИТ и $I = const$;
- (2) – с учетом воздухопроницаемости при инфильтрации воздуха; (3) – при эксфильтрации;
- (4) – с учетом инфильтрации и стока теплоты (наличия влаги в ОК); (5) – с учетом эксфильтрации и ИТ;
- (6) – кривая (4), но с учетом линейной зависимости $I(t)$ при ($b < 0$);
- (7) – кривая (4), но с учетом линейной зависимости $I(t)$ при ($b > 0$).

Заключение

Предлагаемая в критериальном виде обобщенная ММ (9)-(11) процессов нелинейного переноса в многослойной ОК позволяет независимо от масштабов исследуемого объекта и направления потоков:

–рассчитывать поля температур, тепловые потоки, а также различные коэффициенты переноса (теплоотдачи, теплопередачи, термического сопротивления, порового охлаждения, фильтрационного охлаждения) и др. производные характеристики с учетом ее влагосодержания, различного рода включений или неоднородностей для многообразных классов физических явлений или процессов;

–учитывать в расчетах полей переноса (тепла, влаги, парогазовой смеси) изменение теплофизических характеристик от толщины многослойной ОК или ее термического сопротивления;

–использовать полученные результаты для практических расчетов при проектировании многослойных ОК зданий и сооружений, тепловых инженерных сетей, разработке СНиПов, СП по тепловой защите зданий [14, 15] и т. д.;

–проводить расчеты как тепло-, так и массопереноса различных ОК для канонических систем координат (декартовой – для пластин, стен; цилиндрической – для трубопроводов; сферической – для ёмкостей): ввиду аналогии законов переноса в приведенных уравнениях символ температуры « t » можно, например, заменить на символ влагосодержания « U », а вместо теплообменных критериев в обобщенной задаче можно использовать массообменные и далее соответственно проинтерпретировать поставленную физическую задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). – М.: «Высшая школа», 1974. – 320 с.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: «АВОК-ПРЕСС», 2006. – 256 с.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – СПб.: «АВОК Северо-Запад», 2006. – 400 с.
4. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. – 144 с.
5. Hugo Nens. Building Physics – Heat, Air and Moisture. – John Willey & Sons Limited, 2007. – 270 p.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: «Энергоиздат», 1981. – 416 с.
7. Коздоба Л. И. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: «Наука», 1975. – 227 с.
8. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М. – Л.: «Госэнергоиздат», 1961. – 680 с.
9. Исаев С.И., Кожинов И.А., Кофанов В.И. и др. Теория тепломассообмена (под ред. Леонтьева А.И.). – М.: «Высшая школа», 1979. – 495 с.
10. Садыков Р.А. Расчет теплотехнических характеристик ограждающих конструкций с учетом термодиффузии и фильтрации влаги. // Материалы Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2005. – С. 53-57.
11. Садыков Р.А., Крайнов Д.В., Иванова Р.В. Процессы переноса в ограждающих конструкциях с учетом воздухопроницаемости и стоков теплоты. // Сборник докладов 3-й Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2009. – С. 90-92.
12. Крайнов Д.В., Садыков Р.А. Расчет термического сопротивления ограждающих конструкций с интегральным учетом их воздухопроницаемости и источников теплоты. // Сборник трудов X Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». – Казань, 2009. – С. 187-195.
13. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1967. – 564 с.
14. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М., 2003. – 31 с.
15. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М., 2004. – 167 с.

REFERENCES

1. Pinsky V.M, Building thermo - physics (shielding construction and building micro climate). – M.: «Vysshaya shkola», 1974. – 320 p.
2. Fokin K.F. Constructional heat engineering of the shielding parts of a building. – M.: the AVOK-PRESS, 2006. – 256 p.
3. Bogoslovsky V.N. Constructional thermo physics (thermo-physical basis of heating, ventilation and air conditioning): the Textbook for high schools – SPb.: Publishing house «Severo-Zapad AVOK», 2006. – 400 p.
4. Ushkov F.V. The Heat transfer of shielding constructions with air filtration. – M.: Stroyizdat, 1969. – 144 p.
5. Hugo Hens. Building physics – Heat, Air and Moisture. – John Willey AND Sons Limited, 2007. – 270 p.
6. Isachenko V.P, Osipov V.A, Sukomel A.S. Heat transfer. – M.: «Energoizdat», 1981. – 416 p.
7. Kozdoba L.I. Solution methods of the nonlinear problems of heat conductivity. – M.: «Nauka», 1975. – 227 p.
8. Ekkert E.R., Drake R.M. Theory of heat and mass transfer. – M. – L.: «Gosenergoizdat», 1961. – 680 p.
9. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I., etc. Theory of heat and mass transfer (under the editorship of Leonteva A.I.). – M.: «Vysshaya shkola», 1979. – 495 p.
10. Sadykov R.A. Calculation of thermo-technical characteristics of shielding constructions taking into account thermo diffusion and moisture filtration. Materials of the International scientific and technical conference «Theoretical bases of heat and gas supply and ventilation». – M.: MGSU, 2005. – P. 53-57.
11. Sadykov R.A, Krajnov D.V, Ivanova R.V., Transfer process in shielding constructions taking into account air permeability and heat drains. The collection of reports of 3rd International scientific and technical conference «Theoretical bases of heat and gas supply and ventilation». – M.: MGSU, 2009. – P. 90-92.
12. Krajnov D.V., Sadykov R.A. Calculation of thermal resistance of shielding constructions with the integration account of their air permeability and heat sources. The collection of works of X International symposium «Effectiveness of the power resources and power savings». – Kazan, 2009. – P. 187-195.
13. Matveev N.M. Integration methods of the ordinary differential equations. – M.: «Vysshaya shkola», 1967. – 564 p.
14. СНиП 23-02-2003. Thermal shielding of buildings. – M., 2003. – 31 p.
15. СП 23-101-2004. Designing of thermal shielding for buildings. – M., 2004. – 167 p.