

УДК 699.86.022.3+666.198:691.87

ТЕПЛОПЕРЕНОС В ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ ВСТАВКОЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ*

А.Я. КУЗИН, А.Н. ХУТОРНОЙ, Т.А. МИРОШНИЧЕНКО, С.В. ХОН

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Предложена численная технология расчета теплового состояния трехслойного наружного ограждения с поперечным несквозным включением (коннектором). Определены зоны теплового влияния стального коннектора для различных утеплителей. Показано влияние цикличности температуры внешней среды на характеристики теплообмена.

Эффективные утеплители и связывающие их гибкие связи (коннекторы) широко используются в многослойных наружных ограждениях для их облегчения и снижения материальных затрат [1–3]. Однако применение коннекторов может привести к негативному эффекту охлаждения помещений за счет утечек по ним тепла в более холодную наружную среду. Поэтому научно-практический интерес представляет оценка влияния коннекторов на тепловое состояние многослойных наружных ограждений с различными утеплителями. Нуждается в отдельном рассмотрении вопрос о влиянии цикличности температуры внешней среды на характеристики теплообмена, поскольку использование в расчетах заниженных средних температур приводит к завышению требуемых сопротивлений теплопередаче и в итоге — к удорожанию строительных объектов. Наличие коннекторов в многослойных наружных ограждениях, переменность теплофизических характеристик (ТФХ) материалов слоев ограждения и коннекторов, зависимость температуры внешней среды от времени приводит к неоднородности, нестационарности и нелинейности процессов теплопереноса. Учет таких факторов усложняет математические модели и делает практически невозможным применение аналитических методов решения. Проведение же экспериментальных исследований для прогноза теплового состояния проектируемых ограждений также не всегда эффективно в силу многопараметричности и длительности моделируемых тепловых процессов. В большей степени эти исследования целесообразны для получения экспериментальной информации для обратных задач по определению параметров математических моделей [4–6] и для проверки адекватности этих моделей с целью дальнейшего математического моделирования. Усложнение математических моделей не-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант МК-1812.2003.08), Министерства образования РФ (грант ТО2-01.2-881), программы Федерального агентства по образованию “Развитие научного потенциала высшей школы” (подпрограмма 2, проект 7756).

избежно приводит к разработке более эффективных численных технологий решения и применения быстродействующих ПЭВМ.

В работе [3] осуществлена постановка задачи о теплопереносе в трехслойной кирпичной стене с коннектором, показано его влияние на температурное поле стены и предложен механизм передачи тепла по коннектору. Многогранность рассматриваемой задачи не позволила авторам [3] в рамках одной статьи детально и полно изучить все представляющие научно-практический интерес вопросы. Для развития и совершенствования данной работы рассмотрим некоторые аспекты физико-математической постановки задачи, ее эффективную численную реализацию, исследуем влияние различных параметров математической модели на решение задачи.

В частности, уточнение использованной в [3] математической модели может идти по следующим направлениям. Во-первых, это учет переменной ТФХ материалов слоев ограждения и коннектора. В процессе эксплуатации наружных ограждений ТФХ материалов слоев ограждения могут меняться за счет изменения температуры и влагосодержания. При использовании математической модели, состоящей из одного или нескольких обобщенных уравнений теплопроводности, влияние влагосодержания обычно учитывается через эффективные ТФХ. При изменении положительных температур в пределах от 0 до 60 °С, как это имеет место для ограждений зданий, зависимостью теплопроводности материалов от температуры, как правило, пренебрегают. Эта зависимость становится практически значимой либо при высоких температурах (в условиях пожара), либо при отрицательных температурах, вызывающих замерзание и перераспределение влаги во влажных пористых материалах [7]. В качестве материалов коннекторов в настоящее время широко используются различные композиционные материалы со сложной структурой, разработанные на основе передовых термических технологий [8] (стекло-, угле- и органопластики). В условиях пожара, например, ярко проявляется зависимость их ТФХ от температуры и темпа нагрева [9]. Поэтому для более широкого охвата реально встречающихся ситуаций необходимо использовать разностные схемы, учитывающие зависимость ТФХ материалов слоев ограждения и коннекторов от характеристик реальных физических процессов.

Во-вторых, уточнение математической модели из [3] может идти по пути учета в граничном условии зависимости температуры внешней среды от времени. Серьезным упущением является не учет этой зависимости, поскольку в пределах даже одних суток температура внешней среды может претерпевать значительные изменения [1], не говоря уже о сезонных и носящих случайный характер.

Далее, для рассматриваемого класса задач требуется разработка эффективной численной технологии, включающей в себя эффективный метод решения двумерного нелинейного уравнения теплопроводности, методы первичной обработки исходных и расчетных данных (интерполяция, аппроксимация, сглаживание), программно-вычислительный комплекс. Исходя из представленной в работе [3] расчетной области, состоящей из десяти подобластей, используемый метод достаточно громоздок и требует больших временных затрат при его настройке на другие конфигурации наружных ограждений и на его численную реализацию. Все это делает актуальной задачу разработки эффективной численной технологии решения рассматриваемой задачи. В работе [3] не показан также представляющий несомненный научный интерес нестационарный характер процесса переноса тепла.

Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является уточнение физико-математической постановки задачи из [3]; разработка эффективной численной технологии решения поставленной задачи, быстро адаптирующейся под различные конфигурации многослойных наружных ограждений с коннекторами; исследование влияния ТФХ утеплителя и диаметра коннектора на размеры зоны его

теплового влияния; оценка влияния цикличности температуры внешней среды на характеристики теплообмена.

1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Рассмотрим теплоперенос через многослойное наружное ограждение на примере типичного трехслойного наружного ограждения с включением в виде цилиндрического коннектора (рис. 1). Внутренний и наружный слои ограждения – это кирпичная кладка, средний слой — утеплитель. Концы коннектора заделаны во внутренний и наружный слои ограждения. Известны геометрические размеры слоев ограждения и коннектора и их ТФХ ($\lambda_i, \rho_i, c_i, i = \overline{1,4}$), зависящие в общем случае от температуры. Индексы i от 1 до 3 характеризуют внутренний, средний и наружный слои ограждения, индекс 4 — коннектор. Заданы температуры наружной $t_{g,e}(\tau)$ и внутренней $t_{g,ins}$ сред, где τ — время, а также коэффициенты теплоотдачи на наружной α_w и внутренней α_0 поверхностях ограждения. Вне зоны влияния коннектора известен профиль температуры по толщине ограждения, полученный из аналитического решения одномерной стационарной задачи теплопроводности [1, 2].

Сформулированная задача будет решаться в цилиндрической системе координат, начало которой расположим на внутренней поверхности стены, ось x направим по нормали к стене, ось r — вдоль нее; ось коннектора совместим с осью x (см. рис. 1). При численном решении математическую область определения задачи $\{0 \leq x \leq \delta, 0 \leq r < \infty, 0 \leq \tau \leq \tau_{fin}\}$ заменяем замкнутой расчетной областью $\overline{D}\{0 \leq x \leq X_k, 0 \leq r \leq R_k, 0 \leq \tau \leq \tau_{fin}\}$, где $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ — толщина всей стены, а $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ — толщины ее первого, второго и третьего слоев. Расчетную область \overline{D} разбиваем на четыре подобласти, представляющие собой внутренний (1), средний (2) и наружный (3) слои стены без коннектора и коннектор (4). Теплоперенос в каждой из подобластей описывается нелинейным нестационарным двумерным уравнением теплопроводности

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x} \right), \quad i = \overline{1,4}, \quad x, r, \tau \in D. \quad (1)$$

Система уравнений (1) замыкается начальными и граничными условиями:

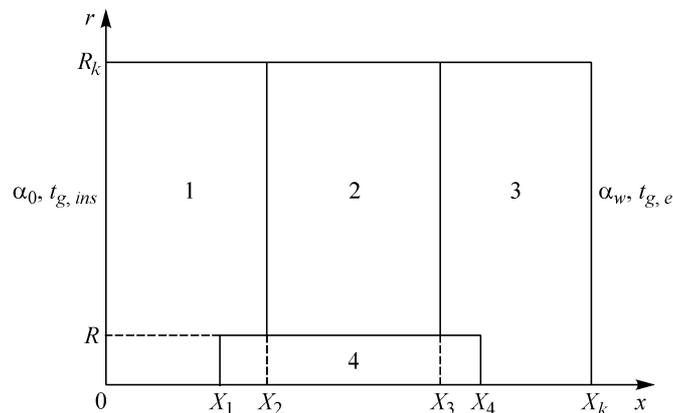


Рис. 1. Схема трехслойного наружного ограждения с коннектором. Внутренний, средний и наружный слои ограждения (1–3), коннектор (4).

$$t_i|_{\tau=0} = t_{i,in}(x), \quad x \in \bar{D}, \quad i = \overline{1,4}; \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0(t_{g,ins} - t_0), \quad 0 \leq r \leq R_k, \quad (3)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_k} = \alpha_w(t_{g,e} - t_w), \quad 0 \leq r \leq R_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad i = 1, 3, 4, \quad 0 \leq x \leq X_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial r} \Big|_{r=R_k} = 0, \quad i = \overline{1,3}, \quad 0 \leq x \leq X_k, \quad (6)$$

$$t_1|_{x=X_1} = t_4|_{x=X_1}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_1}, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (7)$$

$$t_4|_{x=X_4} = t_3|_{x=X_4}, \quad \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=X_4} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_4}, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (8)$$

$$t_1|_{x=X_2} = t_2|_{x=X_2}, \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2}, \quad R < r \leq R_k, \quad (9)$$

$$t_2|_{x=X_3} = t_3|_{x=X_3}, \quad \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=X_3} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=X_3}, \quad R < r \leq R_k, \quad (10)$$

$$t_4|_{r=R} = t_1|_{r=R}, \quad \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad X_1 \leq x \leq X_2, \quad (11)$$

$$t_4|_{r=R} = t_2|_{r=R}, \quad \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad X_2 < x < X_3, \quad (12)$$

$$t_4|_{r=R} = t_3|_{r=R}, \quad \lambda_4 \frac{\partial t_4}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad X_3 \leq x \leq X_4, \quad \tau \in [0, \tau_{fin}]. \quad (13)$$

На границах расчетной области $x = 0$ и $x = X_k$ выполняются условия конвективного теплообмена (3), (4); на оси $r = 0$ — условия симметрии (5); на периферии области при $r = R_k$ — условие независимости процесса теплопереноса от r (6); на внутренних границах подобластей 1–4 — условия четвертого рода (7)–(13); $D\{0 < x < X_k, 0 < r < R_k, 0 < \tau \leq \tau_{fin}\}$ — открытая расчетная область задачи; индексы in и fin соответствуют начальному и конечному состояниям системы.

Численное решение задачи осуществлялось с помощью метода расщепления Н.Н. Яненко [10]. Полученные в результате расщепления одномерные уравнения теплопроводности в однослойных и многослойных областях в направлениях x и r рассчитывались итерационно-интерполяционным методом (ИИМ) [4, 11], хорошо зарекомендовавшим себя при решении многих прямых и обратных задач механики реагирующих сред [4–6, 12]. Системы нелинейных разностных уравнений с трехдиагональными матрицами решались методом прогонки [13] с итерациями по коэффициентам с заданной точностью. Поскольку материалы подобластей в общем

случае различны, то на внутренних границах области \bar{D} использовались особые разностные уравнения, полученные с помощью ИИМ [4, 12].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Численное решение задачи по вышеизложенному алгоритму осуществлялось с помощью программы, разработанной на языке программирования ФОРТРАН. При создании программы использовался модульный принцип. Основной программный модуль, реализующий решение уравнения параболического типа общего вида с граничными условиями первого-четвертого рода в однослойных и многослойных областях и состоящий из более мелких модулей расчета коэффициентов разностной схемы ИИМ и решения системы разностных уравнений с трехдиагональной матрицей методом прогонки, тестировался на известных аналитических решениях [4, 13] и решениях, полученных с помощью метода пробных функций. Программа в целом без учета коннектора тестировалась известным стационарным аналитическим решением из [1]. Результаты, полученные с учетом коннектора, проверялись также путем сравнения с результатами работы [3]. Модульный принцип построения программы позволяет быстро адаптировать ее под любую конфигурацию многослойного наружного ограждения с числом слоев, больше трех, и любую глубину заделки коннектора. Интерполяция исходных данных и результатов расчетов осуществлялась с помощью кубических сплайн-функций [14].

При проведении базового варианта расчета использовались следующие значения параметров: $\lambda_1 = \lambda_3 = 0,8$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К), $\lambda_4 = 60$ Вт/(м·К), $\rho_1 = \rho_3 = 1800$ кг/м³, $\rho_2 = 150$ кг/м³, $\rho_4 = 7850$ кг/м³, $c_1 = c_3 = 880$ Дж/(кг·К), $c_2 = 1340$ Дж/(кг·К), $c_4 = 482$ Дж/(кг·К), $X_1 = 0,325$ м, $X_2 = 0,38$ м, $X_3 = 0,53$ м, $X_4 = 0,585$ м, $X_k = 0,65$ м, $R_k = 0,2$ м, $R = 0,002$ м, $\alpha_0 = 8,7$ Вт/(м²·К), $\alpha_w = 23$ Вт/(м²·К), $t_{g,ins} = 20$ °С, $t_{g,e} = -40$ °С, $\tau_{fin} = 72$ ч. Материал коннектора — арматурная сталь.

Разностная схема ИИМ хотя и получена для самого общего случая, с целью облегчения анализа численных результатов использовались постоянные значения ТФХ материалов слоев ограждения и коннектора. Расчетные шаги по пространству в направлениях x и r в общем случае брались переменными из-за большого различия в ТФХ материалов слоев стены и коннектора. Решение задачи проверялось на сгущающихся сетках по пространству и времени. Приемлемое число узлов разностной сетки по x и r для базового варианта расчета оказалось равным 65×200 при шаге, равном 30 с. Дальнейшее увеличение числа точек по пространству и уменьшение шага по времени вдвое давало уточнение решения, не превышающее 0,05 %. Значение величины R_k , моделирующей верхнюю границу расчетной области по r , выбиралось из условия совпадения численного решения исходной двумерной задачи при $r = R_k$ и $\tau = \tau_{fin}$ с известным аналитическим решением одномерной стационарной задачи из [1]. Время счета базового варианта задачи при физическом времени процесса $\tau_{fin} = 72$ ч оказалось не более 3,5 мин на ПЭВМ PENTIUM-3.

Для тестирования численного алгоритма и программы вначале была решена двумерная задача теплообмена в трехслойном ограждении без коннектора при постоянной температуре внешней среды. При установлении стационарного режима численное решение двумерной задачи сравнивалось с известным аналитическим решением одномерной линейной стационарной задачи через расчетные сопротивления теплопередаче

$$t(x) = t_{g,ins} - \frac{R^t(x)}{R_0^t} (t_{g,ins} - t_{g,e}), \quad (14)$$

где $R^t(x)$ — расчетное сопротивление теплопередаче ограждения со стороны помещения до плоскости с координатой x , а R_0^t — сопротивление теплопередаче всего ограждения, вычисляемое по формуле [1, 2]

$$R_0^t = \frac{1}{\alpha_0} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_w}. \quad (15)$$

В результате численных расчетов было показано, что независимо от задания начального условия, которое варьировалось от -40 до $+20$ °С, численное решение двумерной задачи стремится к единственному стационарному решению, совпадающему с известным аналитическим решением (14), что является одним из подтверждений достоверности результатов расчетов. При решении двумерной задачи с коннектором в качестве начального условия выбирался стационарный профиль температуры по x , полученный из аналитического решения одномерной задачи теплопроводности в трехслойной области (14). Это позволило сократить время счета задачи из-за ускорения достижения стационарного режима теплообмена при $t_{g,e} = \text{const}$.

На рис. 2 показано влияние ТФХ утеплителя и величины радиуса коннектора на распределение перепада температур в радиальном направлении r . Кривые 1–3 соответствуют утеплителям с ТФХ $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К), $\rho_2 = 150$ кг/м³, $c_2 = 1340$ Дж/(кг·К) (кривая 1); $\lambda_2 = 0,075$ Вт/(м·К), $\rho_2 = 200$ кг/м³, $c_2 = 840$ Дж/(кг·К) (кривая 2); $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К), $\rho_2 = 200$ кг/м³, $c_2 = 840$ Дж/(кг·К) (кривая 3). Общая тенденция формирования температурного поля трехслойного наружного ограждения с коннектором происходит согласно выводам работы [3]. По сравнению со стационарным профилем температуры в ограждении без коннектора наличие коннектора приводит к понижению температуры в зоне его размещения до сечения $x = 0,455$ м и повышению температуры после этого сечения. Большая часть теплоты до сечения $x = 0,455$ м поступает в коннектор через боковые

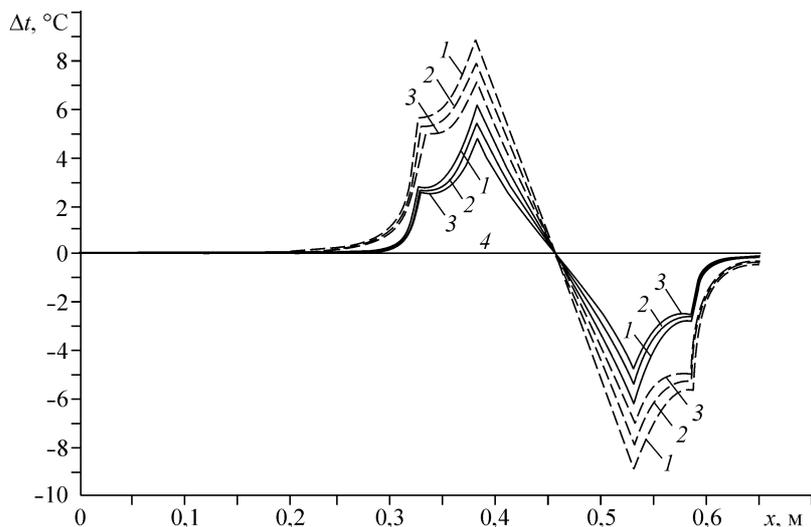


Рис. 2. Распределение перепада температур $\Delta t(x) = t(x, \infty) - t(x, 0)$ в момент времени $\tau = 72$ ч для коннекторов из арматурной стали радиусом 2 (сплошные) и 4 мм (пунктирные линии) при разных ТФХ утеплителя (1–3). Начальный перепад температур (4).

поверхности. В зоне отрицательных температур теплота отводится от коннектора через его боковые поверхности и торец к материалам окружающих слоев стены. Максимальные возмущения температурного поля происходят в местах контакта внутреннего ($x = 0,38$ м) и внешнего ($x = 0,53$ м) слоев стены с утеплителем. Меньшие возмущения температурного поля имеют место у торцов коннектора по сравнению с его боковой поверхностью. Максимальное возмущение температурного поля Δt_{\max} вносит коннектор при наличии утеплителя с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К) ($\Delta t_{\max} \approx 6,1^\circ$ при радиусе коннектора $R = 2$ мм (сплошная кривая 1) и $\Delta t_{\max} \approx 8,8^\circ$ при $R = 4$ мм (штриховая кривая 1)). Минимальное возмущение температурного поля наблюдается при наличии утеплителя с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К) ($\Delta t_{\max} \approx 4,7^\circ$ при радиусе коннектора $R = 2$ мм (сплошная кривая 3) и $\Delta t_{\max} \approx 7,0^\circ$ при $R = 4$ мм (штриховая кривая 3)). Возмущения, вносимые коннектором с промежуточным значением коэффициента теплопроводности $\lambda_2 = 0,075$ Вт/(м·К), лежат внутри коридора возмущений, вносимых коннекторами с $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К).

Рисунок 3 демонстрирует влияние ТФХ утеплителя и толщины коннектора на распределение перепада температур в радиальном направлении r в симметричных относительно центра коннектора точках с координатами $x = 0,38$ и $0,53$. Нумерация и тип кривых на рис. 2 и 3 совпадают. По толщине коннектора ввиду его высокой теплопроводности перепад температур $\Delta t(r)$ практически отсутствует. Основное изменение перепада температур наблюдается вблизи боковой поверхности коннектора с дальнейшим быстрым по мере удаления от поверхности выходом его на асимптоту. Максимальная зона влияния для коннектора радиусом $R = 2$ мм (сплошная кривая) не превышает $0,05$ м и для коннектора радиусом $R = 4$ мм (штриховая кривая) не превышает $0,1$ м. С увеличением теплопроводности утеплителя зона влияния коннектора уменьшается.

В процессе решения задачи помимо двумерных полей температур рассчитывались двумерные поля плотностей тепловых потоков в направлениях x ($q_x(x, r)$) и r ($q_r(x, r)$). По найденным значениям плотностей тепловых потоков в направлении x по формуле

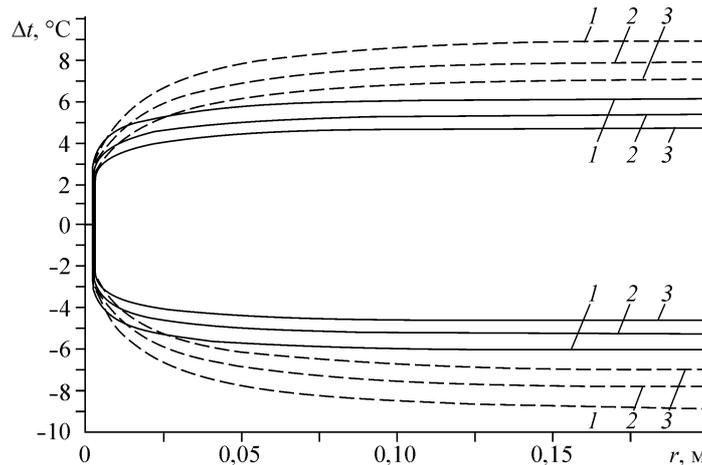


Рис. 3. Распределение перепада температур $\Delta t(r) = t(x, r) - t(x, 0)$ в момент времени $\tau = 72$ ч для коннекторов из арматурной стали радиусом 2 (сплошные) и 4 мм (пунктирные линии) при разных ТФХ утеплителя (1–3).

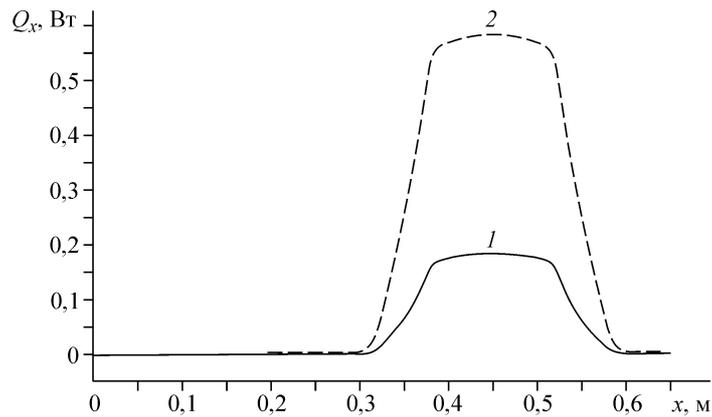


Рис. 4. Количество теплоты, проходящее через радиальное сечение ограждения с радиусом 2(1) и 4 мм (2) для различных значений x в момент времени $\tau = 72$ ч.

$$Q_x(x) = \int_S q_x(x, r) ds$$

находилось количество теплоты, проходящее через радиальное сечение ограждения с площадью, равной площади радиального сечения коннектора S , в зависимости от координаты x (рис. 4) для коннекторов из арматурной стали с двумя разными радиусами. Максимум трансмиссионной теплоты наблюдается в центре коннекторов, причем для коннектора с радиусом 4 мм этот максимум примерно в четыре раза больше по сравнению с коннектором радиусом 2 мм.

Исследовался вопрос о влиянии коннектора на тепловое состояние наружного ограждения при циклическом изменении температуры внешней среды

$$t_{g,e} = t_{e,0} + A_{te} \cos(2\pi(t-15)/T),$$

где $t_{e,0}$ — средняя температура наружного воздуха за период T ($-19,1$ °C для января); A_{te} — амплитуда колебаний ($8,7$ °C); T — период (24 часа). Здесь максимум

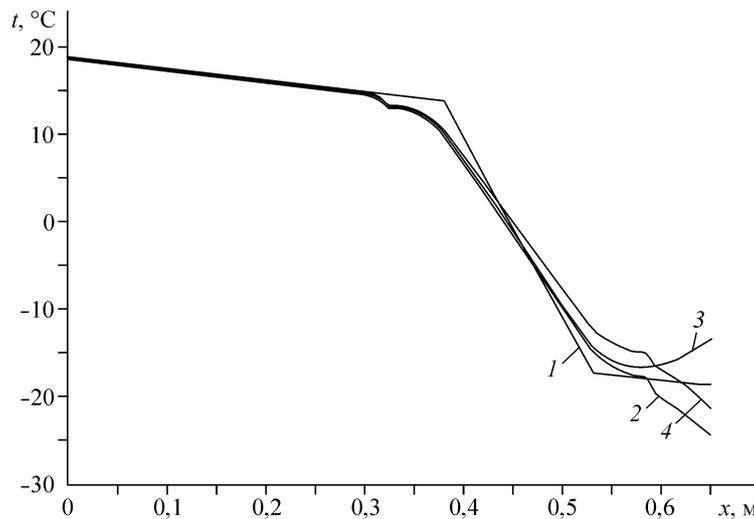


Рис. 5. Распределение температуры по толщине ограждения x на оси $r = 0$ при циклическом изменении температуры $t_{g,e}$ в различные моменты времени τ , ч: 3 (2), 15 (3), 24 (4).

Стационарный профиль температуры без коннектора (1).

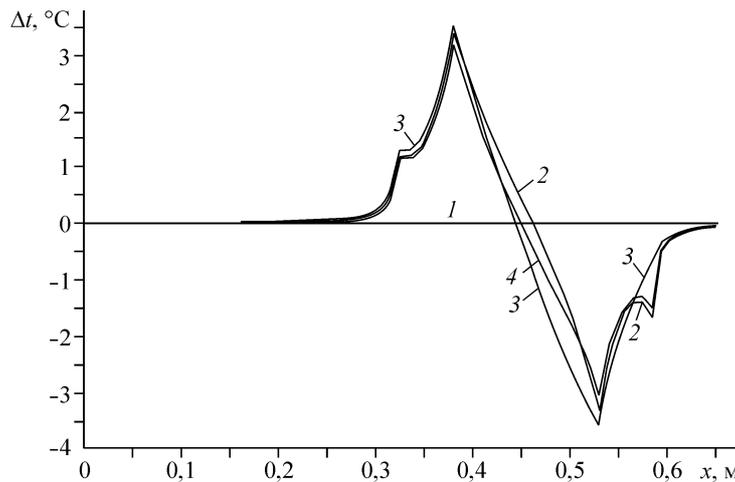


Рис. 6. Распределение перепада температур $\Delta t(x) = t(x, \infty) - t(x, 0)$ при циклическом изменении температуры $t_{g,e}$ в моменты времени τ , ч: 0 (1), 3 (2), 15 (3), 24 (4).

температуры соответствует времени — 15,00, минимум —3,00.

На рис. 5, 6 показано качественное и количественное влияние цикличности температуры внешней среды на распределение по толщине ограждения x температуры на оси $r = 0$ (см. рис. 5) и перепада температур в радиальном направлении r (рис. 6). Можно выделить следующий интересный эффект, вытекающий из рис. 5: температура на конце коннектора при $x = 0,585$ не опускается ниже стационарной температуры без коннектора. Цикличность изменения температуры внешней среды меняет не только качественное поведение кривых (см. рис. 2, 6), но дает существенное количественное отличие в значениях перепада температур Δt на участках с его резким изменением по x (см. рис. 6).

Рисунок 7 показывает влияние цикличности изменения температуры внешней среды на количество теплоты, проходящей через радиальное сечение ограждения с площадью, равной площади радиального сечения коннектора, в зависимости от координаты x . Как видно из рисунка, максимальное отличие в значениях теплоты при циклическом законе изменения температуры внешней среды по сравнению с постоянной температурой может достигать 50 %.

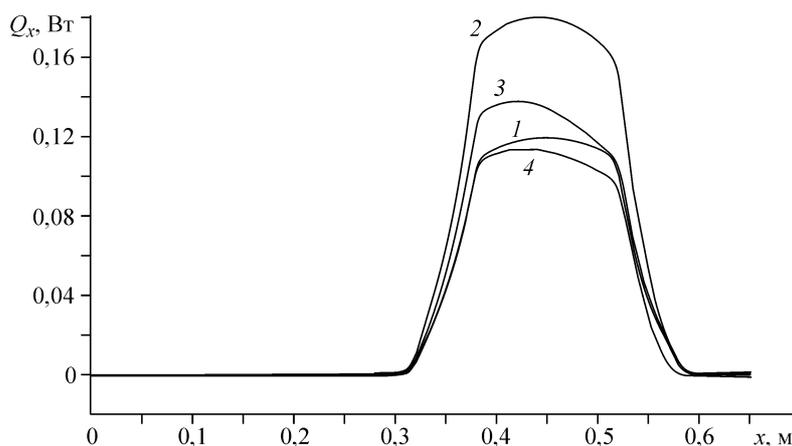


Рис. 7. Количество теплоты, проходящее через радиальное сечение ограждения с радиусом 2 мм для различных значений x при $t_{g,e} = \text{const}$ (1) и циклическом законе изменения $t_{g,e}$ (2–4) в моменты времени τ , ч: 3 (2), 15 (3), 24 (4).

Разработанная численная технология может быть использована для экспресс-диагностики теплового состояния проектируемых наружных ограждений с коннекторами при реальном изменении температуры наружной среды.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

q — плотность теплового потока, Вт/м²;
 X_i ($i = 1, 4$) — координаты внутренних границ расчетных подобластей по x , м;
 R — радиус коннектора, м;
 X_k, R_k — верхние границы расчетных областей по x и r .
 Q — тепловой поток.

ИНДЕКСЫ

g — воздух;	r — направление r .
ins — внутренняя среда;	k — конечная величина;
e — внешняя среда;	0 — внутренняя поверхность ограждения;
x — направление x ;	w — внешняя поверхность ограждения;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. — М.: Высш. шк., 1970. — 376 с.
2. СНиП П-3-79*. Строительная теплотехника / Госстрой России. — М.: ГУП ЦПП, 2000. — 29 с.
3. Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Скачков С.И. Теплоперенос в плоской трехслойной системе с теплопроводным несквозным включением // ИФЖ. — 2002. — Т. 75, № 5. — С. 146–148.
4. Гришин А.М., Кузин А.Я., Миков В.Л. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1987. — 247 с.
5. Кузин А.Я. Идентификация процессов тепломассопереноса в реагирующих средах // Сопряженные задачи механики и экологии: Избр. докл. междунар. конф. Томск. 4–9 июля 1998 г. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2000. — С. 190–205.
6. Кузин А.Я. Обратные задачи механики реагирующих сред // Междунар. конф. по математике и механике: Избр. докл. / Под общ. ред. Н.Р. Щербакова. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2003. — С. 229–234.
7. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. — М.: Высш. шк., 1974. — 320 с.
8. Передовые термические технологии и материалы: Сб. аннот. докл. I Междунар. симп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. — 198 с.
9. Зинченко В.И., Несмелов В.В., Якимов А.С., Костин Г.Ф. Влияние динамики изменения физико-химических свойств фенольного углепластика на нестационарный тепло- и массообмен при высокотемпературной деструкции в потоке газа // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 5. — С. 76–84.
10. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967. — 195 с.
11. Гришин А.М., Берцун В.Н. Итерационно-интерполяционный метод и теория сплайнов // Докл. АН СССР. — 1974. — Т. 214, № 4. — С. 751–754.
12. Исаков Г.Н., Кузин А.Я. Моделирование тепломассопереноса в многослойных тепло- и огнезащитных покрытиях при взаимодействии с потоком высокотемпературного газа // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 2. — С. 82–89.
13. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. — М.: Наука, 1978. — 592 с.
14. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. — М.: Наука, 1980. — 352 с.

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2004 г.