

— $(q_3 + q_4)$ составляла 96 %. Считается, что процессы горения топлива заканчиваются в циклоне и в топку выбрасываются лишь продукты сгорания. Тем не менее часть продуктов неполного сгорания попадает в топочную камеру и оказывает некоторое влияние на образование окислов азота.

Измерения NO_x по ширине топки (рис. 2, а) на разной высоте показали, что в сечении II, где факел из циклона не успел еще заполнить топку, наблюдается более заметная неравномерность в концентрациях NO_x , чем в сечениях III и IV. Такая же неравномерность концентрации NO_x в сечении II имеет место и по глубине топки. В точке А (примерно на оси факела) концентрация NO_x на 0,1–0,15 г/м³ выше, чем в точке Б (около заднего экрана). По мере уменьшения крутки факела и подмешивания газов из периферийных участков топки неравномерность концентраций NO_x по ширине уменьшается.

Изменение концентрации NO_x по длине факела (рис. 2, б) показывает, что сечение с максимальным значением NO_x располагается на расстоянии 4–5 м от амбразуры циклона (примерно 4–5 калибров выходной горловины). В этом же месте заканчивается догорание продуктов неполного горения. Далее по ходу факела концентрация NO_x снижается из-за подмешивания газов из пристенных зон и присасываемого воздуха.

Характер изменения концентрации NO_x по высоте топки аналогичен изменению по высоте падающих тепловых потоков, которые, в свою очередь, являются функцией температуры газов, что свидетельствует о преобладающем влиянии температуры на значение NO_x . Результаты аналогичных испытаний мазутного котла с подовым расположением горелок приводят к схожим выводам [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж и х а р Г.И., Р у д е н к о в Б.М. Исследование структуры процесса и образования окислов азота при горении мазута в циклонной камере // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. — 1978. — № 11. — С. 55–59.
2. Ж и х а р Г.И., Р у д е н к о в Б.М. Исследование выгорания мазута и образования окислов азота в циклонной камере // Изв. АН БССР, сер. физ.-энерг. наук. — 1980. — № 4. — С. 34.
3. Г о р б а н е н к о А.Д. и др. Экспериментальное исследование процесса образования окислов азота в мазутном факеле мощной горелки // Теплоэнергетика. — 1983. — № 3. — С. 19–22.

УДК 621.1.016.4

Н.П.ВОРОНОВА, А.И.КОЗЛОВ, канд. техн. наук,
Л.Н.СМУРАГА, канд. техн. наук (БПИ)

УТОЧНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Часто на практике возникает необходимость знать температуру тела в каждой точке в любой рассматриваемый момент времени: при планировании и оценке результатов экспериментов; анализе режимов нагрева, закалки метал-

лов; при оптимизации размеров кладки в нагревательных установках и т. п. В работах [1–3] приводятся расчеты и строятся зависимости температуры тела от времени и координат. Для этого применялись такие постоянные значения коэффициентов как плотность ρ , теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ . Эти расчеты неточны и использование их приводит на практике лишь к приблизительным результатам. В общем случае теплофизические коэффициенты надо рассматривать как функции. В работе [4] приведены данные о зависимости этих параметров от температуры, что дает возможность уточнить температурные поля при нагреве различных материалов.

Рассмотрим температурные поля, создаваемые в пластине, цилиндре и шаре из стали марок 10 и 20 при их периодическом нагреве и охлаждении. Такой режим часто применяется при закалке стали и описывается с помощью математических символов, приведенных в работе [5]:

$$t = t_0 + t_m \cos \omega \tau, \quad (1)$$

где t_0 – средний уровень колебаний температуры среды, t_m – амплитуда, $\omega = 2\pi f$, f – частота колебаний.

С помощью численных методов решается стандартное уравнение теплопроводности:

$$\partial t / \partial \tau = a (\partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2),$$

где $a = \lambda / c\rho$ при граничных условиях I–III рода, если тело помещено в среду с температурой, изменяющейся по закону (1). В начальный момент времени температура тела принимается равной температуре окружающей среды. Значения теплофизических коэффициентов выбираются из табл. 1.

Для решения поставленной задачи рассматривался более общий случай решения нелинейного параболического уравнения вида

$$\rho \partial t / \partial \tau = 1x^n \cdot \partial / \partial x (x^n \lambda \cdot \partial t / \partial x) \quad (2)$$

при начальном условии

$$t(x, 0) = \varphi(x) \quad (3)$$

и граничных условиях вида:

$$|A_1 t + A_2 \lambda \partial t / \partial x|_{x=0} = A_3; \quad (4)$$

$$|B_1 t - B_2 \lambda \partial t / \partial x|_{x=l} = B_3, \quad (5)$$

где в каждом конкретном случае подставлялись свои значения коэффициентов и теплофизических параметров. Функция $\varphi(x)$ принималась равной температуре окружающей среды t_{c_0} . Такая постановка предусматривает возможность решения задач теплопроводности в прямоугольной, цилиндрической и сферической системах координат в зависимости от значения параметра n . При $n = 0$ уравнение рассматривается в прямоугольной системе координат; при $n = 1$ – в цилиндрической и при $n = 2$ – в сферической системе координат, что удобно при задании различных геометрических форм образца. Задавая параметры A_1, B_1, A_2, B_2 , можно варьировать краевые условия задачи.

Зависимости теплофизических параметров от температуры t , град

	$0 < t < 700$	$700 < t < 750$	$750 < t < 800$	$800 < t < 850$	$850 < t < 900$	$900 < t < 1100$	$1100 < t < 1200$	$1200 < t < 1300$
C_p , кДж/(м·град)	$0,465 + 0,0138 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,00624 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$	1,39	$-1,867 + 0,818 \cdot 10^{-2} \cdot t - 0,0587 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$	”	”	$0,656 + 0,00003 \cdot (t - 900)$	”	”
ρ , г/см ³	$7,861 - 0,0306 \cdot 10^{-2} - 0,000532 \cdot 10^{-4}$	7,589	”	”	”	$7,873 - 0,013 \cdot 10^{-2} t - 0,002 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$	”	”
λ , Вт/(м·град)	$59,5 - 2,33 \cdot 10^{-2} - 0,195 \cdot 10^{-4}$	”	”	27,8	$41,9 - 3,48 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,206 \cdot 10^{-4} \cdot t^2$	”	”	”

Так, при $A_2 = B_2 = 0$ создаются граничные условия I рода, при $A_2 = B_2 = 1, A_1 = B_1 = 0$ – граничные условия II рода, а при $A_1 \neq 0, B_1 \neq 0$ – граничные условия III рода. Задача в аналогичной постановке при наличии источников решалась в работе [2], но теплофизические параметры рассматривались как константы и не учитывалось гармоническое изменение температуры среды.

Для решения задачи (2)–(5) применялся метод конечных разностей. Неявная разностная схема позволила без дополнительных исследований определить скорость сходимости решений, равную порядку аппроксимации дифференциального уравнения, и не доказывать устойчивость разностной схемы.

Уравнение (2) в конечно-разностной форме, записанное с помощью неявной схемы с точностью аппроксимации $O(h^2 + r)$, имеет вид

$$\rho_{ij} \frac{u_{ij} - u_{ij-1}}{r} = 1/x_i^n \cdot 1/h^2 (x_{i+1/2}^n T\Pi_{i+1/2j} (u_{i+1j} - u_{ij}) - x_{i-1/2}^n T\Pi_{i-1/2j} (u_{ij} - u_{i-1j})), \quad (6)$$

где h, r – шаги соответственно по пространственной и временной координате:

$$T\Pi_{i+1/2j} = T\Pi\left(\frac{u_{i+1j} + u_{ij}}{2}\right).$$

Для решения системы уравнений (4)–(6) применялся метод прогонки, в процессе которого уравнение (6) преобразуется в трехточечное уравнение с известной правой частью:

$$A_i u_{i-1j} - C_i u_{ij} + B_i u_{i+1j} = -F_{ij}, \quad i = 2, N, \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_i &= 2x_{i-1/2}^n T\Pi_{i-1/2j} \cdot r; \\ C_i &= 2\rho_{ij} x_i^n h^2 + 2rx_{i+1/2}^n + 1/2 T\Pi_{i+1/2j} + 2rx_{i-1/2}^n T\Pi_{i-1/2j}; \\ B_i &= 2rx_{i+1/2}^n T\Pi_{i+1/2j}; \\ F_i &= 2x_i^n h^2 \rho_{ij} u_{ij-1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Граничные условия записываются в виде

$$u_{ij} = P_2 u_{2j} + Q_2, \quad (9)$$

$$u_{N+1j} = R u_{Nj} + S. \quad (10)$$

Параметры $A_i, B_i, C_i, F_i, P_2, Q_2, R, S$ определяются из коэффициентов уравнения (6) и граничных условий (4), (5). Связь между значениями искомой функции в двух соседних узловых точках на одном временном слое принимается в виде

$$u_{ij} = P_{i+1j} u_{i+1j} + Q_{i+1j}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (6), получаем рекуррентные соотношения:

$$P_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - P_i A_i}, \quad Q_{i+1} = \frac{A_i Q_i + F_i}{B_i} P_{i+1}.$$

Определив значения P и Q в граничных точках рассматриваемой области и подставив их в (11), получим значения u_{ij} для данного временного слоя. Выход

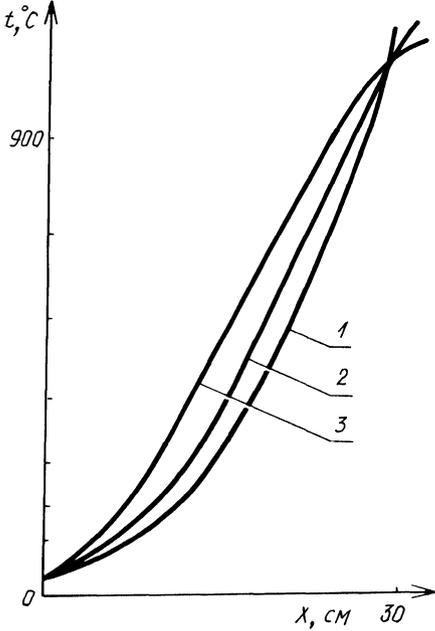


Рис. 1. Изменение распределения температуры с течением времени в случае граничных условий I рода и гармонического изменения температуры среды: 1 — пластина; 2 — цилиндр; 3 — шар.

(На двух последующих рисунках условные обозначения формы исследуемых тел соответствуют рис. 1.)

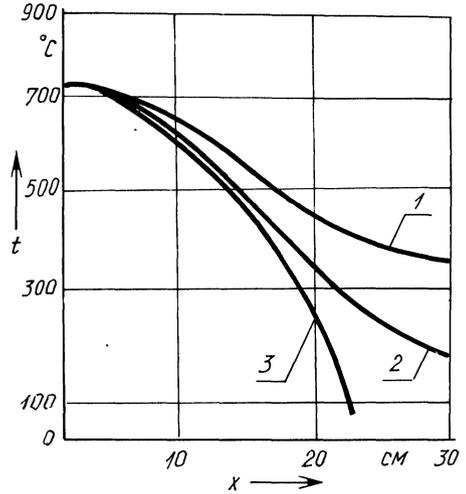


Рис. 2. Изменение распределения температуры с течением времени в случае граничных условий II рода и гармонического изменения температуры среды.

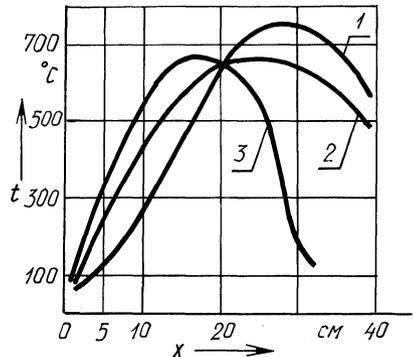


Рис. 3. Изменение распределения температуры с течением времени в случае граничных условий III рода и гармонического изменения температуры среды.

из итерационного цикла осуществляется, если последующая итерация отличается от предыдущей на значение, не превосходящее заданную точность ϵ . Сходимость процесса итераций контролировалась методом удвоения числа точек на пространственной и временной осях.

Уравнение теплопроводности решалось для значений $t_{c_0} = 20^\circ\text{C}$. Граничное условие I рода имело вид $t/x = 0 = t/x = 32 = t_{c_0}$ для прямоугольной системы координат, а для цилиндрической и сферической $t/x = -16 = t/x = 16 = t_{c_0}$. В формуле (1) $t_0 = 900^\circ\text{C}$, $t_m = 50^\circ\text{C}$, $f = 2/3$.

Полученные результаты представлены на рис. 1. Изменение распределений температуры с течением времени при граничных условиях II рода показано на рис. 2, а при граничных условиях III рода – на рис. 3.

Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что погрешность вычислений при данном подходе не превышает 1 %, в отличие от расчетов без учета зависимости коэффициентов c , ρ , λ от температуры, которые дают ошибку порядка 5–10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с. 2. Колесников П.М. Методы теории переноса в нелинейных средах. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 335 с. 3. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1978. – 328 с. 4. Колесников П.М. Введение в нелинейную электродинамику. – Мн.: Наука и техника, 1971. – 328 с. 5. Цой П.В. Методы расчета отдельных задач тепломассопереноса. – М.: Энергия, 1971. – 383 с.

УДК 621.725.377

Л.Н.СМУРАГА, канд.техн.наук (БПИ)

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О РАБОТЕ ПЕЧЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КОМБИНАЦИЕЙ ФУТЕРОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статистические, динамические и энергетические характеристики печей существенно зависят от материала, из которого выполнено их ограждение. На смену плотным огнеупорным приходят огнеупорные волокнистые материалы (ОВМ), получившие самое широкое распространение за рубежом. Тем не менее, в настоящее время большинство термических устройств зафутеровано плотными огнеупорами. Это объясняется тем, что, с одной стороны, существует дефицит в волокнистых материалах, а с другой, – до сих пор не определена область их использования, нет опыта их эксплуатации. Поэтому на данном этапе для исследователей большой интерес представляет проведение сравнительного анализа характеристик печей с различной комбинацией футеровочных материалов, включая ОВМ.

Подобная работа проводилась над электрическими камерными печами типа П-650, служащими для отжига ковкого чугуна. Она осуществлялась также потому, что предполагалось улучшить характеристики процесса отжига – одного из самых длительных и низкоэффективных термических процессов.