

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 542.49 (669. 784: 536.2.072)

DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-116-125

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОКАЛКИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томилина А.А.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация. Работа направлена на решение актуальной задачи расширения области применения и совершенствования исследований вычислительными экспериментами широко применяемых в промышленности процессов термообработки неинертных материалов в барабанных вращающихся печах.

Цель исследования – разработка новых, учитывающих физико-химические превращения прокаливаемого материала, машинно-ориентированных алгоритмов расчета коэффициентов конвективного обмена для построения уравнений теплового баланса, применяемых при моделировании теплообмена в печах зональным методом.

В статье на примере проковки углеродных материалов в режимах прямотока и противотока выполнен вывод алгоритмов коэффициентов конвективного теплообмена сначала для объемных газовых зон и затем зон на поверхности материала. Алгоритмы, разработанные как для объемных зон, так и зон на поверхности материала по сравнению с ранее используемыми с целью моделирования термообработки инертных материалов, дополнительно учитывают тепловые конвективные потоки, возникающие в результате отгонки летучих веществ из прокаливаемого материала и взаимодействия его и летучих веществ с газовым потоком. Алгоритмы для объемных зон имеют универсальное написание для режимов проковки в противотоке и прямотоке материала и газа, а для поверхностных зон выражаются отличающимися уравнениями.

Приведены полученные с применением разработанных алгоритмов и компьютерной программы данные вычислительного эксперимента проковки нефтяного кокса. Параметрической идентификацией с применением данных промышленной печи подтверждена адекватность усовершенствованной математической модели. Отклонения расчетных параметров от параметров реального процесса составляют менее 5%. Исследования выполнены на кафедре «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей» Северо-Кавказского горно-металлургического института в 2014–2015 годах. Математическая модель и программа эффективно применяются для исследования процессов вычислительными экспериментами. Усовершенствованная комплексная математическая модель процессов термообработки в барабанной вращающейся печи и разработанная компьютерная программа для ее реализации могут быть использованы для исследования широкого круга технологических процессов термообработки как инертных, так и неинертных материалов в барабанных вращающихся печах.

Ключевые слова: углеродные материалы, проковка, барабанная вращающаяся печь, математическая модель, алгоритм, конвективный обмен, идентификация, численный эксперимент.

Введение

Процессы термообработки углеродных (кокс, антрациты) и других материалов в барабанной вращающейся печи широко используются в промышленности. Однако исследование влияния на процесс важнейшего параметра – распределения температуры в промышленных печах инструментальными методами крайне затруднительно.

Эффективным методом решения этой задачи является математическое моделирование тепловой

работы печи и протекающих физико-химических процессов. Математическое моделирование процессов термообработки в барабанных вращающихся печах все чаще используется как в России [1–4], так и за рубежом [5, 6].

Методика моделирования и исследования численными экспериментами обжига в режиме противотока инертного материала – шамота на основе зонального метода описана в [1]. Этот метод основан на широко применяемых нелинейных уравнениях зонального теплового баланса

$$\sum_k (a_{k,i} T_i^4 + g_{k,i} T_k) + g_{0i} - Q_i^p = 0, \quad (1)$$

где k, i – номер зоны источника и приёмника тепла соответственно; $a_{k,i}$ – коэффициент радиационного обмена, Вт/К⁴; T – зональная температура, К; g_{ki} и g_{0i} – коэффициенты конвективного обмена, Вт/К, Вт; Q_i^p , суммарный зональный (результатирующий) тепловой поток, Вт.

Методы исследования

С целью применения зонального метода печь по длине разбивается на определенное рациональное число n участков (рис. 1). На каждом участке выделяется по три зоны: на поверхности обжигаемого материала (материал), на поверхности футеровки печи (футеровка) и объёмная газовая зона (газ). Выделяются также две воображаемые поверхностные зоны по торцам барабана печи (торец 1 и торец 2). Зоны участков имеют следующие номера: $i = 1, \dots, n$ – зоны материал; $i = n + 1, \dots, 2n$ – футеровки; $i = 2n + 1, 2n + 2$ – торцов и $i = m, \dots, l$ – газа, где $m = 2n + 2$ – количество поверхностных зон, а $l = m + n$ – общее количество зон.

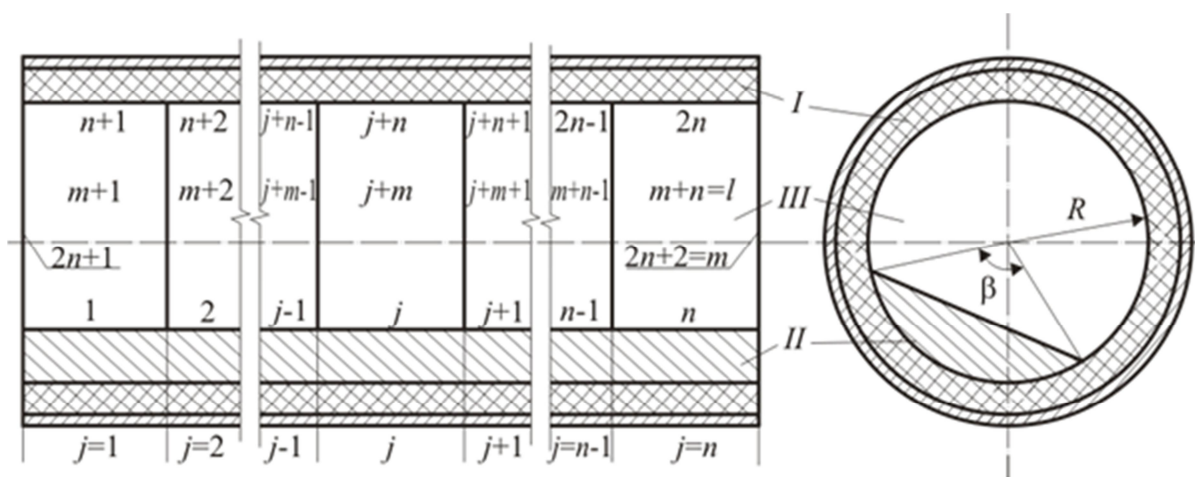


Рис. 1. Схема выделения участков и зон в печи: 1, 2, ..., j, ..., n – номера участков; 1, 2, ..., j, ..., n, ..., т, ..., l – номера зон; I – футеровка, II – материал, III – газ; R – внутренний радиус печи, β – центральный угол сегмента материала

Для каждой зоны составляется уравнение теплового баланса (1). Система этих нелинейных уравнений (например, для двадцати участков составляется 62 уравнения), где неизвестными являются зональные температуры, решается итерационным методом. После задания первого приближения зональных температур на каждом шаге итерационной процедуры уточняется значение этих температур, одновременно рассчитываются все величины, входящие в уравнения математической модели, и составляется новая система уравнений. Для получения конечных значений зональных температур обычно требуется 7–9 шагов итерационной процедуры.

Такой громадный объем вычислений можно выполнить только с применением компьютера. Поэтому с целью реализации каждой математической модели необходимо еще разрабатывать компьютерную программу. Для исследования процессов термообработки неинертных материа-

лов, участвующих в процессах горения и других превращениях, необходима разработка или совершенствование моделей как тепловой работы, так и физико-химических превращений.

Учитывая, что при прокатке углеродных материалов в барабанной вращающейся печи, кроме горения топлива и изменения свойств прокаливаемого материала, горят летучие вещества, образующиеся в результате пиролиза органики [7], и прокаливаемый материал, прототип – математическая модель [1] дополнена нами (рис. 2) подсистемой уравнений физико-химических превращений [2].

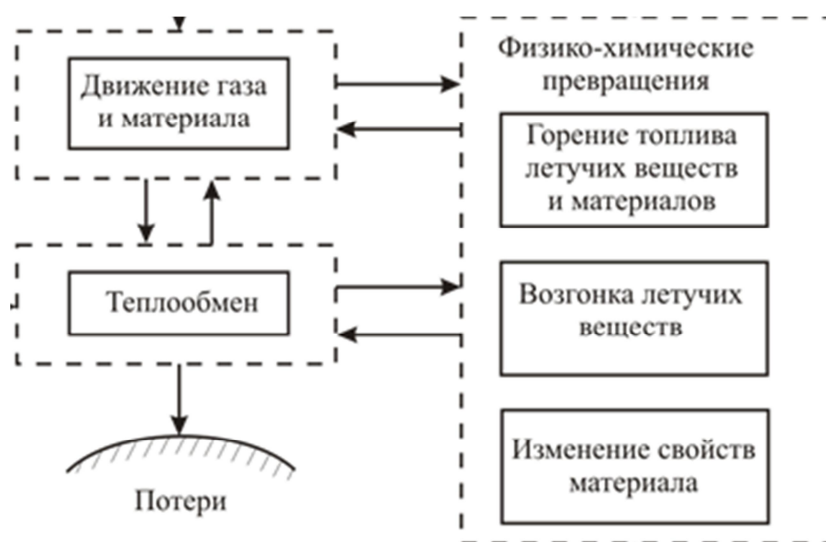


Рис. 2. Структура комплексной математической модели

Система уравнений комплексной математической модели прокатки углеродных материалов приведена в работе [8].

Коэффициенты радиационного обмена в уравнении (1) определяются по известным формулам [1]. Наибольшую трудность при этом составляет расчёт угловых коэффициентов излучения в рабочем пространстве барабанной вращающейся печи. Вопросы их автоматизированного расчёта рассмотрены в публикациях [9,10].

Вывод алгоритмов расчета коэффициентов конвективного обмена выполнен с применением аналитического метода, исходными уравнениями для которого являются уравнения зонального теплового баланса. С целью исследования процесса прокатки использованы методы математического моделирования и численного эксперимента, основу которых составляет усовершенствованная математическая модель процесса прокатки углеродных материалов в барабанной вращающейся печи.

При идентификации этой модели применены данные реального промышленного эксперимента и проведен прямой подбор ее настроечных коэффициентов так, чтобы расчетные данные численного эксперимента не отличались более чем на 5% от реальных значений контролируемых параметров. Настраиваемыми коэффициентами модели являются макроконстанты процессов пиролиза органики, горения топлива и прокаливаемого материала, коэффициент распределения тепла от его горения и коэффициенты поглощения излучения газовыми зонами.

Результаты исследования и их обсуждение

Настоящая работа направлена на совершенствование математической модели теплообмена с целью учета возникающих конвективных тепловых потоков при термообработке углеродных материалов. Рассмотрим вывод машинно-ориентированных алгоритмов расчёта коэффициентов конвективного обмена $g_{k,i}$ и $g_{o,i}$ на примере объёмных зон (рис.3).

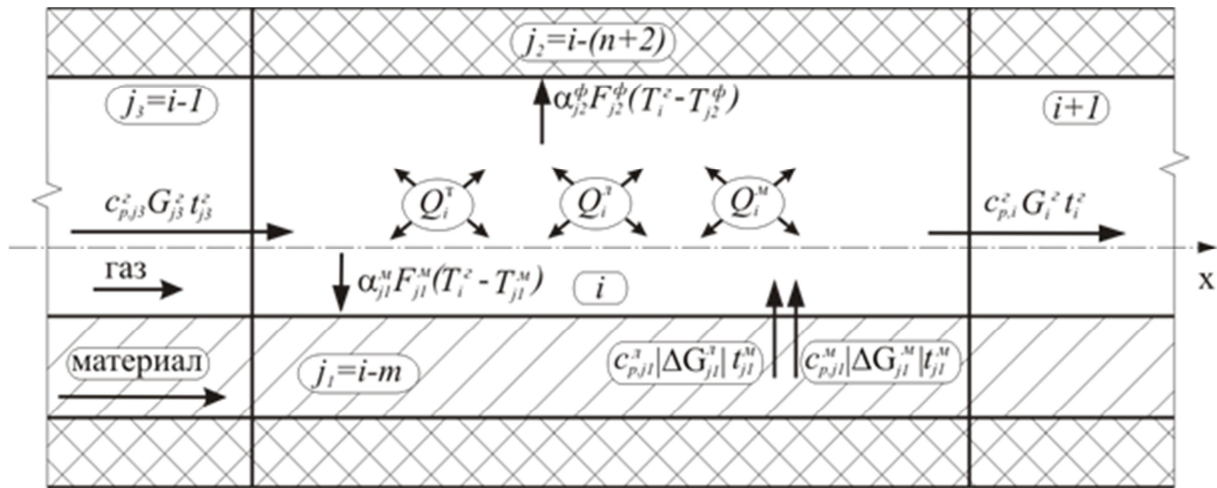


Рис. 3. Схема конвективных тепловых потоков, источников и стоков для объемных зон: i – номер объемной газовой зоны; j_1 – номер смежной зоны на поверхности материала; j_2 – номер смежной зоны на поверхности футеровки; j_3 – номер предыдущей по ходу газа смежной объемной зоны; m, ϕ, T, l – индексы, обозначающие материал, футеровку, топливо и летучие соответственно; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); G – массовый расход, кг/с; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); t – температура, °С; F – площадь поверхности зоны, м²; ΔG – изменение массового расхода, кг/с; Q – мощность теплового потока, Вт

В соответствии с рис. 3 и с учетом замены температуры t на $(T-273)$ суммарный конвективный тепловой поток объемных зон, кроме первой по ходу газа, выражается следующим образом:

$$Q_i^k = \alpha_{j_1}^m F_{j_1}^m (T_{j_1}^m - T_i^c) + \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi (T_{j_2}^\phi - T_i^c) + c_{p,j_3}^c G_{j_3}^c (T_{j_3}^c - 273) + (c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^m |\Delta G_{j_1}^m|) (T_{j_1}^m - 273) - c_{p,i}^c G_i^c (T_i^c - 273) . \quad (2)$$

В результате разделения переменных получим

$$Q_i^k = (\alpha_{j_1}^m F_{j_1}^m + c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^m |\Delta G_{j_1}^m|) T_{j_1}^m + \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi T_{j_2}^\phi + c_{p,j_3}^c G_{j_3}^c T_{j_3}^c - (c_{p,i}^c G_i^c + \alpha_{j_1}^m F_{j_1}^m + \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi) T_i^c - 273 (c_{p,j_3}^c G_{j_3}^c - c_{p,i}^c G_i^c + c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^m |\Delta G_{j_1}^m|) . \quad (3)$$

В соответствии с этим выражением алгоритмы расчёта коэффициентов конвективного обмена уравнения (1) для объёмных зон ($i=m+2, \dots, l$) имеют вид

$$g_i^0 = -273 (c_{p,j_3}^c G_{j_3}^c - c_{p,i}^c G_i^c + c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^m |\Delta G_{j_1}^m|) , \quad (4)$$

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j_1, k \neq j_2, k \neq j_3, k \neq i; \\ \alpha_{j_1}^m F_{j_1}^m + c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^m |\Delta G_{j_1}^m| & \text{при } k = j_1; \\ \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi & \text{при } k = j_2; \\ c_{p,j_3}^c G_{j_3}^c & \text{при } k = j_3; \\ -(c_{p,i}^c G_i^c + \alpha_{j_1}^m F_{j_1}^m + \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi) & \text{при } k = i . \end{cases} \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) и далее символы, написанные вертикально, отображают написание алгоритмов математической модели – прототипа.

Аналогично получены алгоритмы расчета конвективных коэффициентов и для следующих зон:

- Первой по ходу газа объемной зоны ($i=m+1$)

$$g_i^0 = -273 \left(-c_{p,i}^z G_i^z + c_{p,2n+1}^T G^T + c_{p,2n+1}^e G^e + c_{p,2n+1}^n G^n \right), \quad (6)$$

где e, n – индексы, обозначающие воздух, подаваемый в горелку, и подсос воздуха в горячую головку печи соответственно.

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j_1, k \neq j_2, k \neq 2n+1, k \neq i; \\ \alpha_{j_1}^M F_{j_1}^M + c_{p,j_1}^n |\Delta G_{j_1}^n| + c_{p,j_1}^M |\Delta G_{j_1}^M| & \text{при } k = j_1; \\ \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi & \text{при } k = j_2; \\ c_{p,2n+1}^T G^T + c_{p,2n+1}^e G^e + c_{p,2n+1}^n G^n & \text{при } k = 2n+1; \\ -\left(c_{p,i}^z G_i^z + \alpha_{j_1}^M F_{j_1}^M + \alpha_{j_2}^\phi F_{j_2}^\phi \right) & \text{при } k = i, \end{cases} \quad (7)$$

где n – индекс, обозначающий подсос воздуха в горячую головку печи.

- Поверхностных зон материала ($1=2, \dots, n-1$), кроме первой и последней

$$g_{0i} = -273 \left[\left(\pm \left(c_{p,j_2}^n G_{j_2}^n - c_{p,i}^n G_i^n \right) - c_{p,i}^n |\Delta G_i^n| - c_{p,i}^M |\Delta G_i^M| \right) \right]. \quad (8)$$

Здесь и далее верхний знак относится к режиму прямотока, а нижний – к режиму противотока, ' и ' – индексы, обозначающие начало и конец зоны соответственно; j_1 и j_2 – номера зон смежных с i -й зоной объемной зоны и предыдущей зоны материала соответственно.

$$g_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq j_1, k \neq j_2, k \neq i, k \neq i+1; \\ \pm c_{p,j_2}^n G_{j_2}^n / 2, & \text{при } k = j_2; \\ \pm \left(c_{p,j_2}^n G_{j_2}^n - c_{p,i}^n G_i^n \right) / 2 - \alpha_i^M F_i^M - & \\ -c_{p,i}^n |\Delta G_i^n| - c_{p,i}^M |\Delta G_i^M|, & \text{при } k = i; \\ \mp c_{p,i}^n G_i^n / 2, & \text{при } k = i+1; \\ \alpha_i^M F_i^M, & \text{при } k = j_1. \end{cases} \quad (9)$$

Вывод алгоритмов прокалки в режиме противотока газа и материала выполнен при подаче материала в зону с номером n , а топлива в зону $2n+1$.

- Первой и n -й зон материала ($i=1, i=n$):

для режима прокалки в прямотоке

$$g_{01} = c_{p,1}^M P T m - 273 \left(c_{p,1}^M P - c_{p,1}^n G_1^n - c_{p,1}^n |\Delta G_1^n| - c_{p,1}^M |\Delta G_1^M| \right), \quad (10)$$

где P – производительность печи по материалу в загрузке, кг/с; Tm – температура этого материала, К.

$$g_{0n} = -273 \left(c_{p,n}^M G_{n-1}^M - c_{p,n}^n G_n^n - c_{p,n}^n |\Delta G_n^n| - c_{p,n}^M |\Delta G_n^M| \right), \quad (12)$$

$$g_{kn} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq j_1, k \neq n-1, k \neq n; \\ c_{p,n-1}^* G_{n-1}^M / 2, & \text{при } k = n-1; \\ (c_{p,n}^* G_{n-1}^M - 3c_{p,n}^* G_n^M) / 2 - \\ - \alpha_n^M F_n^M - c_{p,n}^* |\Delta G_n^*| - c_{p,n}^M |\Delta G_n^M|, & \text{при } k = n; \\ \alpha_n^M F_n^M & \text{при } k = j_1, \end{cases} \quad (13)$$

для режима прокатки в противотоке

$$g_{01} = -273 (c_{p,1}^* G_1^M - c_{p,1}^* G_1^M - c_{p,1}^* |\Delta G_1^*| - c_{p,1}^M |\Delta G_1^M|), \quad (14)$$

$$g_{k1} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq j_1, k \neq 1, k \neq 2; \\ (c_{p,1}^* G_2^M - 3c_{p,1}^* G_1^M) / 2 - \alpha_1^M F_1^M - \\ - c_{p,1}^* |\Delta G_1^*| - c_{p,1}^M |\Delta G_1^M|, & \text{при } k = 1; \\ (c_{p,1}^* G_2^M + c_{p,1}^* G_1^M) / 2, & \text{при } k = 2; \\ \alpha_1^M F_1^M, & \text{при } k = j_1. \end{cases} \quad (15)$$

$$g_{0n} = c_{p,n}^* G_n^M Tm - 273 (c_{p,n}^* P - c_{p,n}^* G_n^M - c_{p,n}^* |\Delta G_n^*| - c_{p,n}^M |\Delta G_n^M|), \quad (16)$$

$$g_{kn} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq j_1, k \neq n-1, k \neq n; \\ -c_{p,n-1}^* G_{n-1}^M / 2, & \text{при } k = n-1; \\ -(c_{p,n-1}^* G_{n-1}^M / 2 + \alpha_n^M F_n^M + \\ + c_{p,n}^* |\Delta G_n^*| + c_{p,n}^M |\Delta G_n^M|), & \text{при } k = n; \\ \alpha_n^M F_n^M & \text{при } k = j_1. \end{cases} \quad (17)$$

- Поверхностных зон футеровки ($i=n+1, \dots, i=2n$)

$$g_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq i, k \neq i+n+2; \\ -\alpha_i^\phi F_i^\phi, & \text{при } k = i; \\ \alpha_i^\phi F_i^\phi, & \text{при } k = i+n+2. \end{cases} \quad (18)$$

- Поверхностных зон на торцах печи
для зоны на первом торце ($i=2n+1$)

$$g_i^0 = c_p^m G^m T^m + c_p^s G^s T^s + c_p^n G^n T^n - 273 (c_{p,i}^* G_i^* + c_p^m G^m + c_p^s G^s + c_p^n G^n), \quad (19)$$

$$g_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq m+1; \\ -c_{p,i}^z G_i^z, & \text{при } k = m+1; \end{cases} \quad (20)$$

- для зоны на втором торце ($i=2n+2$)

$$g_i^0 = -273G_n^z (c_{p,n}^z - c_{p,i}^z), \quad (21)$$

$$g_{ki} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \neq n, k \neq i; \\ c_{p,n}^z G_n^z, & \text{при } k = n; \\ -c_{p,i}^z G_n^z, & \text{при } k = i. \end{cases} \quad (22)$$

Алгоритмы (4)–(18) в отличие от прототипа учитывают конвективные тепловые потоки, возникающие при массопереносе в газовые зоны выделяющихся летучих веществ и сгорающего прокаливаемого материала, а алгоритмы (19)–(22) – не учтенные в прототипе потоки газов, участвующие в теплообмене торцовых зон.

Алгоритмы расчета коэффициентов конвективного обмена (4)–(22) использованы с целью совершенствования математической модели для синтеза системы зональных уравнений теплового баланса, которая в случае прокатки углеродных материалов имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + k^M Q_n^{p,M} |\Delta G_i^M| - Q_{ni}^M = 0, \quad i=1, \dots, n; \\ \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) - Q_{ni}^p = 0, \quad i=n+1, \dots, 2n; \\ \sum_k a_{ki} T_k^4 - Q_{ni}^{Tp} = 0, \\ \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + Q_n^{p,l} |\Delta G_i^l| + \\ (+1 - k^M) Q_n^{p,M} |\Delta G_i^M| + Q_n^{p,l} |\Delta G_i^l|, \quad \begin{array}{l} i=2n+1, m; \\ i=m, \dots, l, \end{array} \end{array} \right. \quad (23)$$

где k^M – доля теплового потока от горения материала, потребляемая на его нагрев; Q_{ni} – тепловой поток потерь.

С целью реализации комплексной математической модели [8] и проведения численных экспериментов прокатки углеродных материалов разработана компьютерная программа в операционной среде визуального программирования Delphi XE2. Данными таких экспериментов являются поле зональных температур и значения двадцати параметров в виде распределения их по длине печи. При этом обеспечивается возможность варьирования пятидесяти входных технологических и конструктивных параметров.

Параметрическая идентификация разработанной математической модели выполнена с применением данных, полученных на промышленной барабанной вращающейся печи прокатки нефтяного кокса длиной 45 м, с внутренним диаметром барабана 2,37 м.

Значения технологических контролируемых параметров промышленного процесса и вычислительного эксперимента были одинаковыми: время прокатки 60 мин, производительность по загрузке 3,1 кг/с и расход природного газа 0,12 кг/с. Все величины технологических параметров получены усреднением за сутки 96 значений и являются их математическими ожиданиями. Некоторые результаты вычислительного эксперимента при этих условиях приведены на рис. 4, а данные идентификации – в таблице.

Качество прокаленного кокса оценивается по величине его удельного электросопротивления, которое в процессе прокатки снижается с 10000 мкОм·м до соответствующего значения техническим требованиям в 1000 мкОм·м.

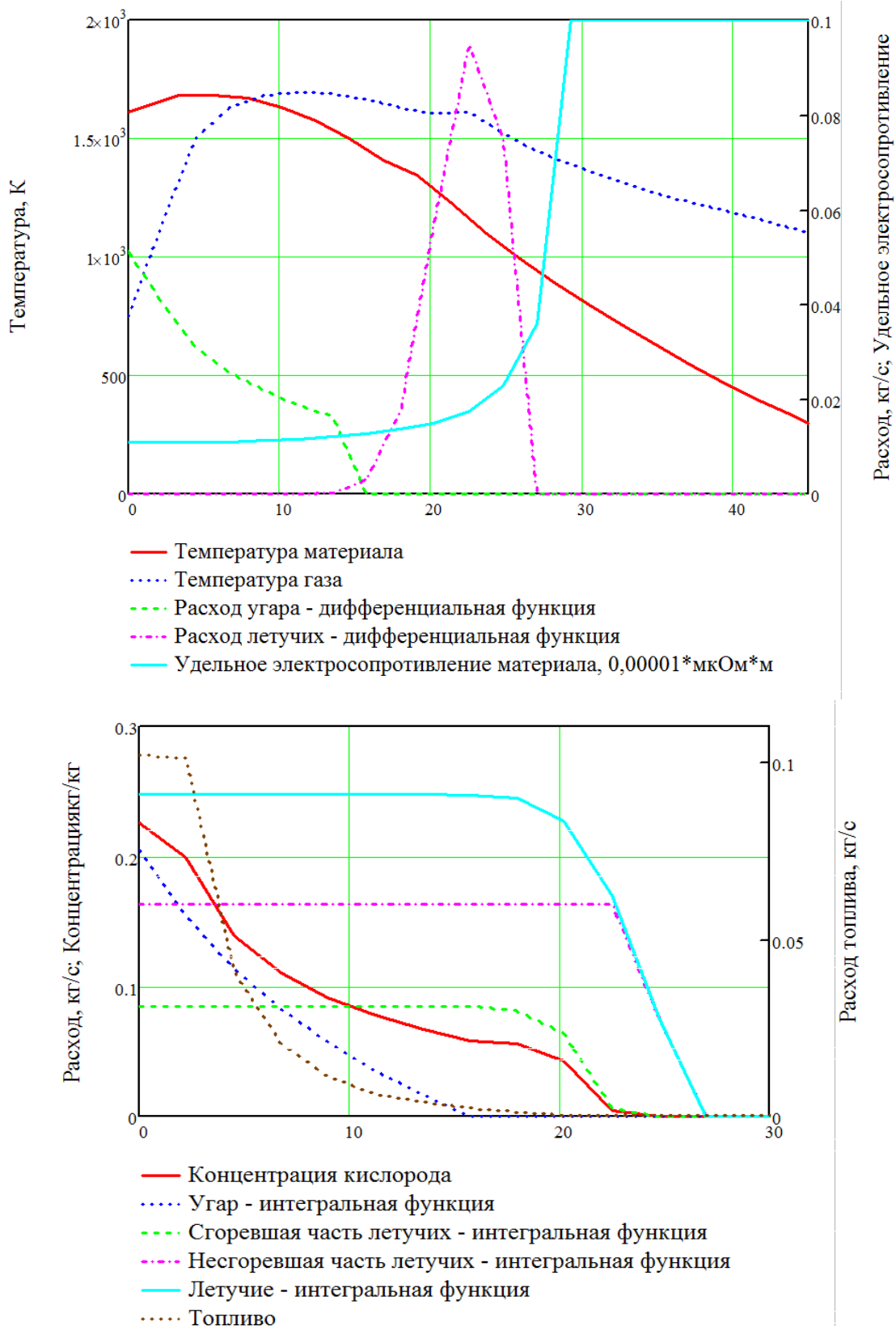


Рис. 4. Распределение параметров по длине печи, работающей в режиме противотока

Данные параметрической идентификации математической модели

Наименование параметра	Размерность	Значение параметра			Отклонение расчетного параметра, %
		промышленной печи		численного эксперимента	
		математическое ожидание	дисперсия		
Температура: - кокса - отходящего газа	°С	1336	428	1339	0,22
	°С	710	1666,26	712	0,28
Угар кокса	кг/с	0,23	-	0,225	-2,17
	т/ч	0,828	-	0,81	

Данные таблицы подтверждают адекватность усовершенствованной математической модели, так как отклонения значений расчетных параметров от реальных значений не превышают 5%, требуемых для технических расчетов.

Выводы

Результаты работы показывают, что разработанные алгоритмы расчета коэффициентов конвективного обмена повышают точность моделирования теплообмена в барабанной вращающейся печи и комплексной математической модели процесса прокаливания углеродных материалов в ней. Эта модель и разработанная компьютерная программа для ее реализации позволяют выполнять исследования численными экспериментами указанного процесса как в режиме противотока материала и газа, так и в режиме прямотока. Параметрической идентификацией подтверждена адекватность данных численного эксперимента реальным данным промышленного эксперимента.

Список литературы

1. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / под науч. ред. В.А. Арутюнова. М.: Metallurgy, 1990. 240 с.
2. Мешков Е.И. Развитие теории и совершенствование технологии производства графитированной электродной продукции на основе математических моделей массо- и теплопереноса: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2009.
3. Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Математическое моделирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО КГТУ, 2011. 304 с.
4. Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами. М.: Теплоэнергетик, 2004. 240 с.
5. Khan J.A., Pal D. and Morse J.S. Numerical modeling of a rotary kiln incinerator// Hazardous Waste & hazardous Materials. 1993, 10 (1), pp. 81–95.
6. Leger C.B., Cundy V.A. and Sterling A.M. A three dimensional detailed numerical model of a field-scale rotary kiln incinerator // Environmental Science & Technology. 1993, 27, pp. 677–690.
7. Химическая технология твёрдых горючих ископаемых: учебник для вузов / под ред. Г.Н. Макарова и Г.Д. Харламповича. М.: Химия, 1986. 496 с.
8. Мешков Е.И., Герасименко Т.Е., Ковалёва М.А. // Цветная металлургия. 2012. №4. С. 53–56.
9. Мешков Е.И. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2006. № 4. С. 71–79.
10. Мешков Е.И. // Цветные металлы. 2007. № 5. С. 36–39.

Материал поступил в редакцию 10.12.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-2-116-125

IMPROVEMENT AND IDENTIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF CARBON MATERIALS CALCINATION IN A ROTARY KILN

Gerasimenko Tatiana Evgenyevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (The State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Meshkov Evgeniy Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (The State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: eimeshkov@gmail.com.

Tomilina Aleksandra Aleksandrovna – Postgraduate Student, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (The State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Abstract. This work is aimed at expanding the application and improving numerical experiment-based studies of heat treatment processes extensively applied to non-inert materials in rotary kilns.

The purpose of the research is to develop new computer-oriented algorithms for the calculation of convective heat transfer coefficients used to build heat balance equations applied in the zone method simulation of heat transfer processes that take place in kilns. The article describes a case of carbon materials calcinated in parallel-flow and counterflow modes and demonstrates an algorithm building procedure for the convective heat transfer coefficients identified, first for volumetric gas zones and subsequently for surface zones. Unlike the algorithms used before in heat treatment simulation of inert materials, these new algorithms account for the convective flows resulting from stripping volatiles from the treated material and the interaction of the material and the volatiles with the gas flow. The algorithms designed for volumetric zones are identical for the parallel-flow and counterflow modes. As for the surface zones, some of the equations included in the algorithms are different.

The article presents numerical experimental data for a petroleum coke calcination process which were obtained with the help of the developed algorithms and computer software. The accuracy of the improved mathematical model was verified by means of parametric identification based on actual kiln data. Deviation of the calculated parameters from the actual process parameters is less than 5%. The research was carried out by the Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy in 2014 and 2015. The mathematical model and the software are effectively applied in numerical experiment-based research. The advanced comprehensive mathematical model designed for heat treatment processes of a rotary kiln and the software developed for the above model can be used to study a broad

range of heat treatment processes applied to both inert and non-inert materials in rotary kilns.

Keywords: Carbon materials, calcination, rotary kiln, mathematical model, algorithm, convective heat transfer, identification, numerical experiment.

References

1. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoi raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical modeling of the thermal performance of industrial furnaces]. Ed. Arutyunov V.A. M.: Metallurgiya. 1990, 240 p.
2. Meshkov E.I. Developing the theory and improving the technology for production of graphite electrodes based on mathematical models of mass and heat transfer. *Aftoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Abstract of a doctoral dissertation]. Vladikavkaz: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy, 2009.
3. Arunyants G.G., Rutkovskii A.L. *Matematicheskoe modelirovanie v zadachakh proektirovaniya sistem upravleniya slozhnyimi ob'yektami* [Mathematical modelling in the design of management systems for complex objects]. Kaliningrad, Publ. Kaliningrad State Technical University. 2011, 304 p.
4. Salikhov Z.G., Arunyants G.G., Rutkovskii A.L. *Sistemy optimal'nogo upravleniya slozhnyimi tekhnologicheskimi ob'yektami* [Adequate management system for complex technological objects]. Moscow: Teploenergetik. 2004, 240 p.
5. Khan J.A., Pal D. and Morse J.S. Numerical modeling of a rotary kiln incinerator. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*. 1993, 10 (1), pp. 81–95.
6. Leger C.B., Cundy V.A. and Sterling A.M. A three-dimensional detailed numerical model of a field-scale rotary kiln incinerator. *Environmental Science & Technology*. 1993, 27, pp. 677–690.
7. Chemical technology of solid combustible minerals. *Uchebnyk dlya vuzov* [Textbook for Universities]. Edited by Makarov G.N., Kharlampovich G.D. Moscow: Khimiya. 1986, 496 p.
8. Meshkov E.I., Gerasimenko T.E., Kovalyova M.A. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy]. 2012, no.4, pp. 53–56.
9. Meshkov E.I. *Izv. Vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of Russian universities. Non-Ferrous Metallurgy]. 2006, no.4, pp. 71–79.
10. Meshkov E.I. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2007, no. 5, pp. 36–39.

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томила А.А. Совершенствование и идентификация математической модели прокаливания углеродных материалов в барабанной вращающейся печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 116–125. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-116-125

Gerasimenko T.E., Meshkov E.I., Tomilina A.A. Improvement and identification of the mathematical model of carbon materials calcination in a rotary kiln. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 116–125. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-116-125
