

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОЙ ПЕЧИ ПРИ ПРОКАЛКЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Для улучшения свойств углеродного материала необходимо проведение его высокотемпературной прокали, которая обеспечивает протекание в материале физико-химических превращений, в результате которых совершенствуется его структура путем образования кристаллов графита. Приведена структура комплексной математической модели процесса прокали углеродных материалов в барабанных вращающихся печах и характеристика возможностей компьютерной программы, разработанной для ее реализации.

Доказательством получения требуемых свойств материала является получение конечного значения удельного электрического сопротивления продукта не выше 1000 мкОм·м. При помощи усовершенствованной математической модели термообработки углеродных материалов, основанной на зональном методе расчета, выполнены численные эксперименты прокали углеродных материалов в барабанных печах, отличающихся длиной рабочего пространства. Показано распределение параметров по длине печи, работающей в режиме противотока, зависимость удельных затрат для печи длиной 45 м, а также зависимость удельных затрат для печи 60 м. Эксперименты осуществлены путем варьирования основных независимых параметров: производительности печи, расхода природного газа и времени прокали. Проведен анализ данных численных экспериментов, в результате которого определены их сочетания и оптимальные значения, при которых получен прокаленный продукт требуемого качества и получены адекватные уравнения регрессии, описывающие зависимости удельных затрат на прокали и угара материала от этих параметров. Полученные данные представлены в виде таблицы. Приведены данные численного эксперимента прокали нефтяного кокса и результат идентификации математической модели на основе использования данных промышленной печи, подтверждающий адекватность расчетных данных результатам реального процесса.

Ключевые слова: барабанная вращающаяся печь, прокали, математическая модель, оптимальные параметры, численный эксперимент, теплообмен, конвекция.

Abstract

For the improvement of carbon-base material quality it is necessary to make its high-temperature calcination, which provides streaming in the physic-chemical transformations material. As a result its structure is developed by the graphite crystals formation. It is formulated the structure of complex numerically simulated model of carbon-base materials calculation process in rotary-drum-type furnaces and computer program possibilities characteristic which is developed for its realization. The provement of obtaining the required properties of the material is to obtain a final value of the specific electrical resistance of the product not higher than 1000 mCom·m. With the help of an improved mathematical model of thermal treatment of carbon materials based on the zonal calculation method, the numerical experiments of calcination carbon-base materials in rotary drum-type furnace, characterized by the length of the working space. Shows the distribution of parameters

along the length of furnace operating in the countercurrent mode, the dependence of unit costs for a furnace with a length of 45 m, and the dependence of unit costs for oven 60 m. Experiments carried out by varying the main independent parameters: the productivity of the furnace, the natural gas consumption and time of calcination. The analysis of the data of numerical experiments, which are defined by their combination and optimal values as obtained calcined product of the required quality and obtained adequate regression equations describing the dependence of unit costs on the calcination and waste material from these parameters. The data obtained are presented in table. The data of numerical experiment calcination of petroleum coke and the result of identification of mathematical models based on data usage industrial furnace, confirming the adequacy of the calculated data to the results of the real process.

Key words: rotary drum-type furnace, calcination, numerically simulated model, optimal parameters, numerical experiment, thermo exchange, convection.

В качестве прототипа, для моделирования сложного, радиационно-конвективного теплообмена, использованы нелинейные уравнения зонального теплового баланса [1], составленные для каждой зоны печи

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

Данные уравнения составлены для прокали инертного материала, шамота. В случае прокали не инертного углеродного материала необходимо учесть, что его высокотемпературная обработка сопровождается не только тепловыделением от сжигания топлива, эндо – и экзотермических реакций, но и горением материала, пиролизом органики с выделением летучих веществ, а также образованием кристаллической решетки графита и других процессов. При протекании именно этих процессов достигаются необходимые свойства прокаленного продукта (высокие электропроводность, плотность, прочность и другие) [2]. Поэтому при моделировании теплообмена в печи учтен конвективный теплоперенос в газовую фазу продуктами горения материала и летучими веществами, а также выделение тепла при сгорании материала и летучих веществ.

В России [4–8] и за рубежом [9–10] разрабатывают различные методы математического моделирования процессов термообработки различных материалов в барабанных вращающихся печах, которые бы помогали улучшать

Усовершенствованы алгоритмы расчета коэффициентов конвективного обмена для объемных зон ($i=m+2$), первой по ходу газа объемной зоны ($i=m+1$) и зон на поверхности материала ($i=2, \dots, n-1$) [3], в результате чего получена дополненная система зональных уравнений для прокали углеродных материалов

$$\begin{cases} \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + k1^m Q_H^{p,m} |\Delta G_i^m| - Q_{пот i}^m = 0, & \text{при } i=1, \dots, n; \\ \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) - Q_{пот i}^\phi = 0, & \text{при } i=n+1, \dots, 2n; \\ \sum_k a_{ki} T_k^4 - Q_{пот i}^{tp} = 0, & \text{при } i=2n+1, m; \\ \sum_k (a_{ki} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + Q_H^{p,\tau} |\Delta G_i^\tau| + & \text{при } i=m, \dots, l. \\ (+1 - k1^m) Q_H^{p,m} |\Delta G_i^m| + Q_H^{p,l} |\Delta G_i^l|, \end{cases} \quad (2)$$

Данная система зональных уравнений является подсистемой теплообмена комплексной математической модели процесса прокали углеродных материалов в барабанных вращающихся печах.

На рисунке 1 приведена структура комплексной математической модели процесса прокалки углеродных материалов в барабанных вращающихся печах.

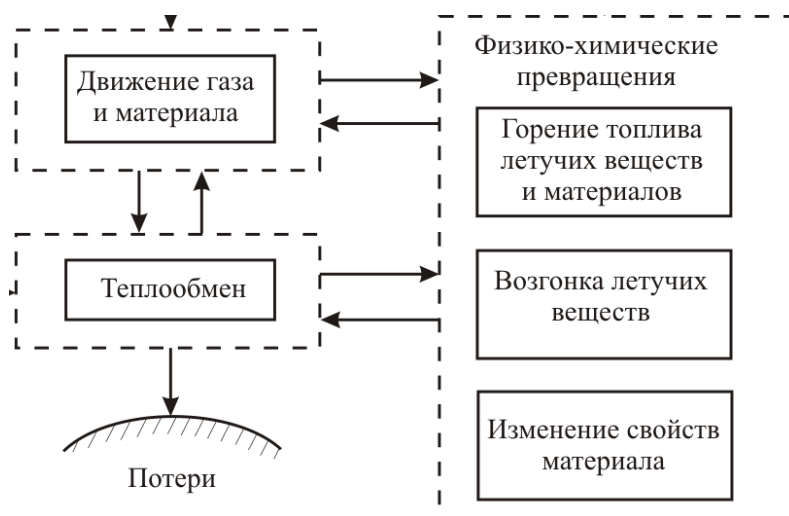


Рис. 1. Структура комплексной математической модели процесса прокалки углеродных материалов в барабанных вращающихся печах

Так как решение данной модели осложняется большим объемом вычислений, для реализации комплексной модели, исследования прокалки углеродных материалов численными экспериментами разработана программа для персональных компьютеров.

В результате проведения численных экспериментов получено поле зональных температур и значения двадцати параметров в виде распределения их по длине печи. В том числе: распределение по длине печи расхода прокаливаемого материала, расхода топлива, кислорода, летучих веществ, распределение удельного сопротивления материала, скорости движения и состава газовой фазы и другие.

Программа позволяет изменять пятьдесят входных технологических и конструктивных параметров, основными из которых являются: производительность печи, расход и теплота сгорания топлива, время прокалки, размеры рабочего пространства печи, физико-химические свойства прокаливаемого материала.

Некоторые результаты численного эксперимента прокалки нефтяного кокса в барабанной вращающейся печи длиной 45 м, с внутренним диаметром 2,37 м приведены на рисунке 2. Основные технологические параметры эксперимента: время прокалки 60 мин, производительность по загрузке 3,1 кг/с и расход природного газа 0,12 кг/с, удельное электрическое сопротивление прокаленного продукта 1000 мкОм·м.

Параметрическая идентификация комплексной математической модели прокалки, проведенная с использованием данных промышленной печи и численных экспериментов, показала, что максимальное отклонение контролируемых в промышленных условиях параметров: температура отходящих газов и выходящего из печи кокса, а также его угар, от расчетных не превышает 5 %.

Основными затратами в процессе прокалки углеродных материалов являются затраты на топливо и прокаливаемый материал. Поэтому для оценки экономических показателей процесса можно не учитывать другие затраты, а использовать оценочно экономический критерий

$$Z_{уд} = \frac{C_m \cdot P + C_t \cdot B_t}{P - \Delta G^m} \cdot 1000 \quad (3)$$

С целью определения влияния конструктивных параметров печи на технико-экономические показатели процесса выполнены исследования прокалки антрацита в барабанных вращающихся печах различной длины и диаметра барабана: одной печи 45 м и 3 м, а второй печи 60 м и 4 м. При варьировании основных входных параметров:

производительности, времени пребывания материала в печи и расхода топлива, – определяли удельные затраты, удельное электрическое сопротивление продукта и угар прокаливаемого материала. Некоторые результаты этих экспериментов приведены на рисунке 3 и 4.

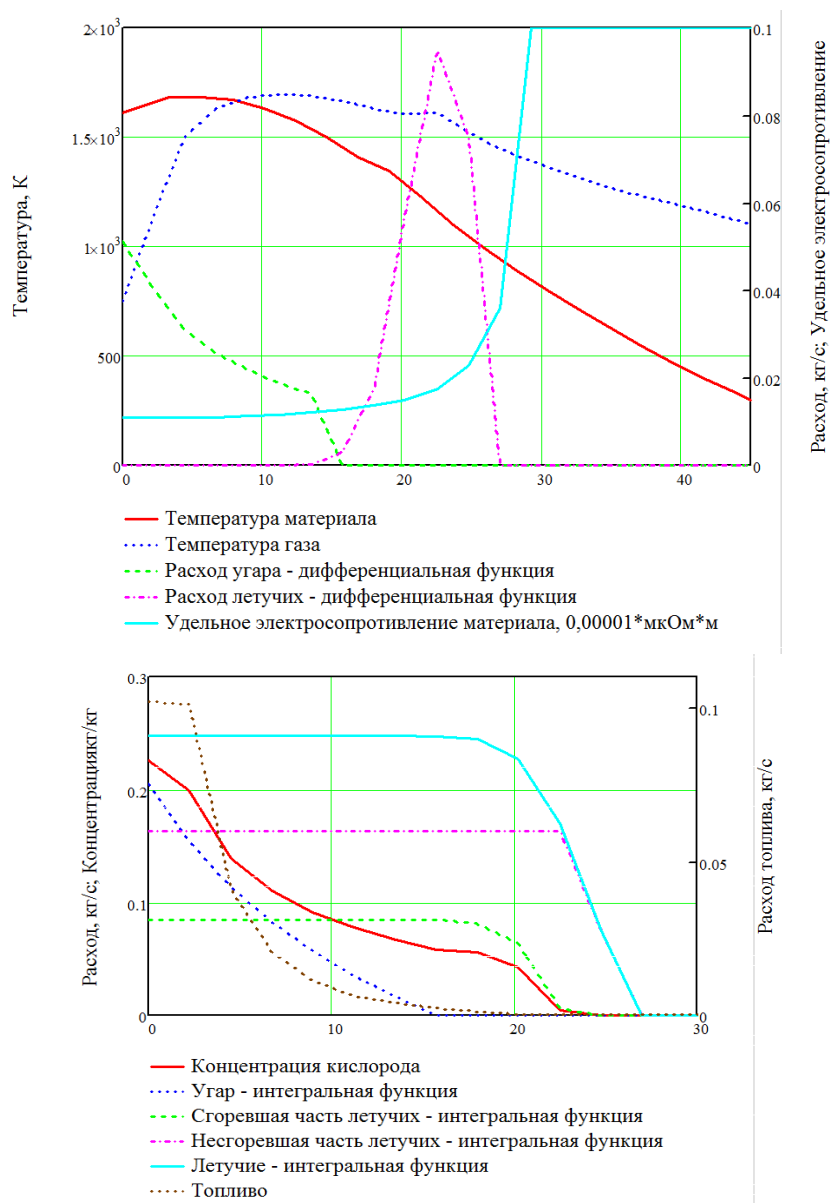


Рис. 2. Распределение параметров по длине печи, работающей в режиме противотока

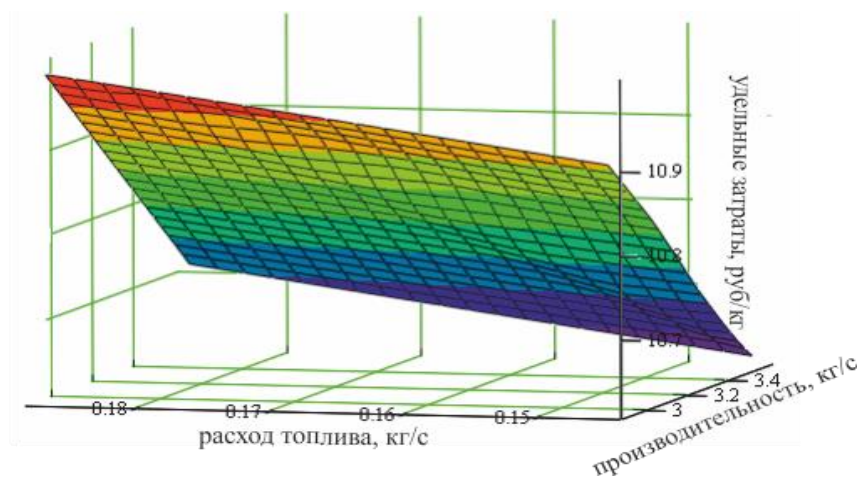


Рис. 3. Зависимость удельных затрат для печи длиной 45 м

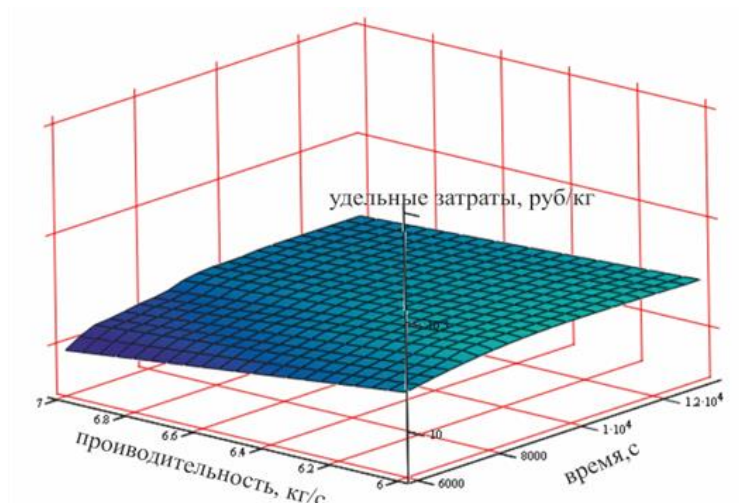


Рис. 4. Зависимость удельных затрат для печи длиной 60 м

Из всего массива данных отбирали данные экспериментов, в которых получено требуемое качество продукта, определяемое значением его удельного электрического сопротивления не более 1000 мкОм·м. Для каждой печи количество таких экспериментов составило 12.

По этим данным построены уравнения регрессии, адекватно с коэффициентами множественной корреляции более 0,99 и доверительной вероятностью 0,99 описывающие зависимости удельных затрат и угара материала от времени прокалки, производительности и расхода топлива:

– для печи длиной 45 м

$$Z_{уд} = 14,499 + 8,647 \cdot 10^{-9} \tau^2 - 1,228P - 0,49B_T,$$

$$\Delta G^M = 0,276 + 6,459 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^2 + 0,019P - 0,314 \cdot B_T;$$

– для печи длиной 60 м

$$Z_{уд} = 9,121 - 1,457 \cdot \tau^2 + 0,157P - 1,729B_T,$$

$$\Delta G^M = -1,796 - 1,528 \cdot 10^{-9} \tau^2 + 0,349P + 0,857B_T.$$

Анализ данных численных экспериментов показал, что экономически оптимальными условиями проведения процесса прокалки антрацита с получением прокаленного продукта с удельным электрическим сопротивлением не более 1000 мкОм·м при минимальных удельных затратах являются следующие:

Таблица 1

Зависимость удельных затрат от времени прокалки, производительности и расхода топлива

Длина печи, м	τ , с	P , кг/с	$Z_{уд}$, р/кг
45	7200	3,8	10,66
60	12000	6,6	10,14

Из этого следует, что при увеличении размеров печи обеспечивается повышение производительности при снижении удельных затрат на прокалку и одинаковом качестве продукта.

Заключение

Программа обеспечивает возможность варьирования многих входных технологических и конструктивных параметров. Позволяет получать в виде распределения по длине печи более двадцати выходных параметров. Отличие реальных значений, контролируемых на

промышленной печи прокали нефтиного кокса параметров, от их расчетных значений не превышает 5 %. В результате исследования численными экспериментами прокали антрацита в печах длиной 45 м и 60 м определены совокупности значений производительности печи, времени прокали и расхода топлива, обеспечивающие получение заданного, 1000 мкОм·м удельного электрического сопротивления прокаленного продукта. Печь большего размера обеспечивает повышение производительности прокали при снижении удельных затрат и одинаковом качестве продукта.

Список использованных источников

1. Суринов Ю.А. Об итерационно зональном методе исследования и расчёта локальных характеристик лучистого теплообмена. Теплофизика высоких температур. 1972. Т.Х. № 4. С. 844–852.
2. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий, Москва: Металлургия, 1972.
3. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томилина А.А. Совершенствование и идентификация математической модели прокали углеродных материалов в барабанной вращающейся печи
4. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей, Москва: Металлургия, 1990.
5. Мешков Е.И. Развитие теории и совершенствование технологии производства графитированной электродной продукции на основе математических моделей массо- и теплопереноса. Автореф. дис. ... докт. техн. наук, Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2009.
6. Zurabov A.T., Meshkov E.I., Gerasimenko T.E. Investigation of Calcination of Anthracite in new Technological Complex. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2007. Vol. 48, № 3. Pp. 231 – 235.
7. Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Математическое моделирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами, Калининград: Изд. ФГОУ ВПО КГТУ, 2011.
8. Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами, Москва: Теплоэнергетик, 2004.
9. 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.
10. 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.

УДК 669.02.01

В. П. Цымбал, И. А. Рыбенко, П. А. Сеченов, А. А. Оленников

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ КАК ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПАКТНОГО И МАЛОЭНЕРГОЕМКОГО СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО ПРОЦЕССА И АГРЕГАТА

Аннотация

Рассмотрены принципы создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора (СЭР), основой которых является организация вынужденного движения двухфазной рабочей (реакционной) смеси в замкнутой системе под давлением, что позволило создавать значительное отклонение от термодинамического равновесия и получать неравновесные диссипативные структуры. Показана роль диссипативных структур в