УДК 669.04

И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ, В.О.ГОЛУБЕВ,
О.В.ЗИЯЗИТДИНОВА
Санкт-Петербургский государственный
горный институт (*технический университет*)

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА В ШАХТНОЙ ПЕЧИ

Приводится математическое описание технологии обжига кускового известнякового сырья в шахтной печи, оборудованной горелочными устройствами, обеспечивающими предварительное сжигание газа. В модели учтены особенности процесса диссоциации карбонатной составляющей сырья, использованы уравнения, описывающие кинетику процесса сушки, условия противотока газов и материала, закономерности распределения материального и газового потоков по сечению и высоте шахты. Разработанная модель представляет собой стационарное двухмерное решение задачи.

Mathematical formulation of lump limestone raw material roasting technology in gas precombustion port equipped shaft furnace is giving. The features of dissociation process of raw material carbonic part is take into account in this model, so as equations which are describes drying process kinetics, gas and stuff contraflow condition, regularity of staff and gas flow distribution by size and height of freeboard. This model is corresponding to stationary two-dimensional equation.

Для изучения широкого спектра вопросов, связанных с повышением эффективности тепловой обработки материалов в металлургических печах, а также синтеза систем автоматического управления необходимо располагать достоверными сведениями о протекании взаимосвязанных процессов переноса тепла, массы, данными о кинетике физико-химических превращений в объеме рабочей зоны, материале и футеровке.

Решение задачи о теплообмене в пространстве рабочей зоны шахтной печи при протекании в ней технологического процесса может быть осуществлено с использованием различных математических методов. Отправной точкой моделирования является осознанная и обоснованная постановка задачи. Необходимость учета многих технологических и теплотехнических факторов, а также сложность граничных условий, вынуждают прибегать к различным упрощениям общей постановки теплофизической задачи.

Различают так называемые «Лагранжеву» и «Эйлерову» постановки задач моделирования. В предлагаемой модели использована «Лагранжева» постановка, т.е. точкой привязки системы является сам аппарат (шахтная печь) и решение всей совокупности взаимосвязанных задач производится для каждой отдельно взятой точки печи. Этот метод дает возможность для конкретного технологического объекта строить картины распределения любых исследуемых величин (поля значений), которыми могут быть характеристические критерии, параметры состояния, теплофизические свойства веществ и др. С помощью метода можно изучать механизм протекающих явлений с требуемой степенью точности и детализации, что приближает синтезируемые модели к классу прогнозирующих.

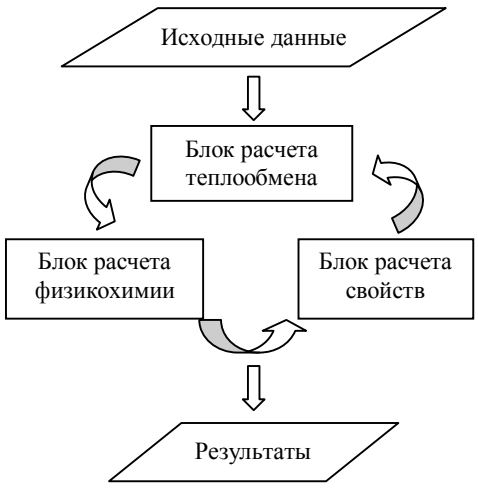
Режим работы большинства шахтных печей близок к стационарному. Определенные отклонения от стационарности процесса вносятся лишь периодичностью загрузки-выгрузки, но, учитывая то, что высота периодически загружаемого и выгружаемого слоя существенно уступает полной высоте плотного слоя в шахтных печах, эти отклонения можно считать несущественными. Учитывая вышесказанное, приходим к выводу, что в первом приближении при моделировании работы шахтных печей

можно ограничиться стационарной одномерной схемой.

Из всей совокупности различных по природе процессов, имеющих место в шахтной печи при обжиге известняка, следует выделить несколько основных: тепловое взаимодействие между газовой и твердой фазой; испарение влаги из материала; диссоциация карбонатной составляющей с выделением CO_2; неравномерное продвижение материала в объеме печи; неравномерное распределение скоростей газового потока.

В основе модели шахтной печи лежит точное решение одномерной стационарной задачи о теплообмене в слое (блок расчета теплообмена). Его результаты используются далее в блоке расчета физикохимии, где с учетом кинетики превращений рассчитываются произошедшие изменения. Эти перемены касаются, в первую очередь, составов материала и газа. С учетом этих изменений блок расчета свойств рассчитывает изменение составов и свойств потоков. Данные вновь поступают в блок теплообмена, и круг замыкается до достижения требуемой степени точности (см. рисунок). Так работает элементарная теплофизическая ячейка модели.

Такая ячейка позволяет рассчитать температуры, составы и свойства потоков материала и газа на выходе из элемента слоя. Величины эти стационарны, поэтому для расчета процесса во всей печи ее высота разбивается на конечное число зон (ячеек), внутри которых эти величины допустимо считать неизменными. Совокупность локальных решений для каждого из этих участков является общим решением одномерной стационарной задачи обжига извести на всей высоте шахтной печи.



Элементарная теплофизическая ячейка модели

В основу функционирования ячейки заложено точное решение задачи о нагреве шаров в противотоке с газовой фазой, полученное В.Н.Тимофеевым [3]. С его помощью можно определить температуру газа, а также температуры для поверхности, центра и средней массы шара. Для этого достаточно располагать сведениями о температурах материала и газов на входе, а также трех теплообменных критериях: отношение теплоемкостей потоков материала и газа m, критерий Био (Bi), критерий Фурье (Fo). Решение В.Н.Тимофеева представляет собой систему из нескольких алгебраических зависимостей и трансцендентных уравнений.

Блок физикохимии представлен двумя самостоятельными подмоделями, одна из которых служит для расчета кинетики сушки известняка, другая – кинетики диссоциации карбонатов с выделением CO_2.

Скорость сушки, если материал имеет дисперсную структуру, зависит от формы и размеров частиц, порозности слоя, формы и состояния межфазной поверхности, теплофизических свойств материала и газа, вида связи влаги с материалом и иных факторов. Закон изменения температур влагосодержаний определяется гидродинамическими и тепломассообменными параметрами процесса. В критериальной постановке они заменяются определяющими критериями сушки, величина которых, в свою очередь, является функцией критериев Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Гухмана (Gu) и др. Для упрощения расчета в модели сушки использованы именно критериальные уравнения, полученные различными исследователями при анализе большого объема экспериментальных данных.

При описании процессов, протекающих при обжиге известняка, рассматриваются явления теплопроводности, диффузии, кинетика и физические условия протекания реакций в материале и на его поверхности. В модели учтена диффузия газа через сфе-

рический слой, определяемая законом Фика, тепловой поток через сферическую оболочку CaO, расход поступающего к поверхности гранулы тепла, идущего на реакции разложения. Результатом решения по модели декарбонизации является величина потока CO_2 на единицу массы гранулы, исходя из чего определяется интенсивность массообмена в зоне декарбонизации, отнесенная к вертикальной скорости материала.

В модели движения дисперсного материала в объеме шахтной печи принята гипотеза М.М.Протодьяконова, подтвержденная исследованиями Бовэ и др., о независимости давления материалов на дно сосуда или плоскость отверстия [1]. Учеными замечено, что в первые моменты выпуска материалы выходят из расположенного над отверстием почти цилиндрического по форме объема, постепенно по мере увеличения дозы выпуска все более приближающегося к эллипсоиду. Как следует из работы [2], эти эллипсоиды образованы частицами с равной скоростью движения. Математические выкладки названных исследователей, касающиеся скоростей движения материалов в точке, с учетом условий выпуска материала из отверстий, размеров и расположения этих отверстий использованы при построении модели.

Течение газов также имеет неравномерный характер. Для того чтобы учесть эту неравномерность, разработана модель аэродинамики шахты. В первом приближении, анализируя газораспределение в стволе шахтной печи, можно рассматривать вариант потенциального движения неизотермичного газового потока. Такой расчет выполняется путем совместного решения уравнений теплообмена для газа, материала, уравнение движения для потенциального течения несжимаемой жидкости, уравнений состояния газа. Всю процедуру решения повторяют итерационно до тех пор, пока не будет достигнуто достаточное приближение полей плотности, потенциала, скорости и давления. Таким образом, решение задачи движения газового потока в недеформируемом слое сводится к решению системы уравнений из шести дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями.

Модели движения слоя материала и течения газового потока решаются в первую очередь. Затем, исходя из заданной дискретизации расчета по радиусу печи, считываются (или интерполируются) данные о локальных скоростях движения газа и материала в окрестности точек получающейся сетки. Значения этих скоростей используются далее в расчетах по модели теплофизики. Таким образом, окончательное решение задачи носит двухмерный стационарный характер; этого достаточно для моделирования работы печей, шахта которых имеет цилиндрическую форму.

Описанная математическая модель была реализована на интегрированном языке MatLab 6.5 и оснащена GUI-интерфейсом. Модельные расчеты, выполненные с помощью этой программы, были использованы при проектировании шахтной печи обжига известняка с усеченной высотой шахты. Благодаря тому, что общая высота такой печи не превышает 12 м, она может быть смонтирована в помещении любого металлургического цеха, вблизи непосредственного потребителя обожженной извести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордон Я.М. Механика движения материалов и газов в шахтных печах / Я.М.Гордон, Е.В.Максимов, В.С.Швыдкий. Алма-Ата: Наука, 1989.

2. *Малахов Г.М.* Выпуск руды из обрушенных блоков. М.: Металлургия, 1952.

3. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И.Китаев, В.Н.Тимофеев, Б.А.Боковиков и др. М.: Металлургия, 1972.