

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИЗВЕСТНЯКА В ШАХТНОЙ ПЕЧИ

Приведены результаты численных исследований аэродинамики плотного слоя и полых областей шахтной печи; механизма движения материала; кинетики диссоциации кускового известняка. Разработана математическая модель шахтной печи с распределенными параметрами. Составлена компьютерная программа, позволяющая осуществлять прогнозные расчеты обжига и оптимизировать режимные и определяющие геометрические параметры установки. Внесены предложения по модернизации действующих шахтных печей.

Results of numerical researches of a packed bed and hollow areas aerodynamics of the shaft surface; the mechanism of material movement; a lumpy limestone dissociation kinetics are presented. The mathematical model of the shaft furnace with distributed parameters is developed. The computer program is made, allowing to carry out prediction calculations of a roasting and to optimize regime and determinative geometrical parameters of the unit. Offers on upgrading working shaft furnaces are brought.

Современное металлургическое производство испытывает растущую потребность в высококачественной извести, отвечающей жестким требованиям по содержанию оксидов кальция и магния, и времени гашения. Известь не может транспортироваться на большие расстояния, и поэтому строительство известеобжигательных участков ведется в непосредственной близости от объекта-потребителя. Помимо металлургических нужд известь активно применяется в строительстве, химической промышленности, производстве пищевых продуктов и целом ряде других производств, со стороны которых требования к качеству продукта и аппаратурному оформлению процесса обжига также заметно возросли.

На сегодняшний день наибольшие объемы производства извести приходятся на шахтные печи. В нашей стране эксплуатируются преимущественно шахтные печи образца 1960-1970-х гг., не претерпевшие с тех пор значимой реконструкции. Многие из них были спроектированы для работы на твердом топливе по пересыпному принципу, но позже были переведены на газовое отопление, например установки, изготовленные по типовым проектам НИИ Ленгипростром. Эти печи отличаются высоким удельным расходом топлива ( $150-155 \text{ м}^3/\text{т}$ ), сравни-

тельно низким качеством извести (65-75 %  $\text{CaO}$ ), не отвечают существующим требованиям промышленной безопасности, современному уровню автоматизации.

Основными конкурентными преимуществами шахтных печных систем на отечественном рынке являются низкий удельный расход топлива и приемлемая стоимость. Разработка эффективного оборудования и создание оптимальных условий его работы базируется на подробном изучении внутренних обусловленностей физико-химических процессов в шахтной печи при обжиге карбонатной породы. В выполненном исследовании на математических моделях проанализирована аэродинамика плотного слоя и полых областей; изучен механизм движения материала; оценена кинетика диссоциации кускового известняка.

При анализе аэродинамики шахтной печи изучались струи газов, поступающие из газовых горелок в слой материала, условия формирования зон трех- двух- и одномерного движения газового потока в среде плотно прилегающей кусковой засыпки (плотном слое), влияние на поле скоростей этого течения точки забора отходящих газов, оценивалось участие архимедовой силы в распределении газов в объеме печи.

Уравнение Навье – Стокса с набором граничных условий было применено для моделирования течения газов в полых (не занятых плотным слоем) областях

$$-\nabla\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho(u\nabla)u + \nabla p = 0, \quad (1)$$

$$\nabla u = 0,$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $u$  – скорость течения;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление.

Уравнение Бринкмана с термом Буссинеска, учитывающим вклад архимедовой силы, использовано для расчета газового течения в слое материала

$$-\nabla\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{\mu}{k}u + \nabla p\right) = \rho_0 g \beta (T - T_0), \quad (2)$$

$$\nabla u = 0,$$

где  $k$  – проницаемость;  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $T_0$  и  $T$  – температуры, соответствующие нормальным и текущим условиям.

Расчеты подтвердили и уточнили результаты работ других исследователей [2], позволили распространить их на более широкий ряд геометрических очертаний печей. В качестве примера взяты результаты численного расчета аэродинамики плотного слоя цилиндрических шахтных печей ОАО «Угловский известковый комбинат» (ОАО «УИК») внутренним диаметром 3,2 м. Нашла подтверждение гипотеза о преобладании кольцевого режима течения горячих газов в печах этой конструкции. Суть этого явления состоит в том, что в зоне обжига наибольшие скорости газового потока устанавливаются вблизи печных стен, в то время как центр, где скорости теплоносителя в 1,5-2 раза ниже, испытывает недостаток тепла. В конечном счете кольцевой режим течения приводит к неравномерному обжигу карбонатной породы и оплавлению кусков вблизи стен с возможной приваркой их к футеровке.

Движение материалов в шахтных печах моделировалось с использованием последних представлений о механике перемещения сыпучей среды, истечения ее из отверстий конечных размеров и аналитических выводов,

изложенных в работах других исследователей [3, 5]. По результатам расчетов сделаны выводы о заметном влиянии геометрических особенностей узла разгрузки на время пребывания материала в каждой из зон печи. В частности, использование системы разгрузки с выпуском через центральное отверстие приводит к различию времени пребывания материала у оси и на периферии вплоть до 20 %. Системы разгрузки конструкции Антонова, напротив, обеспечивают высокую равномерность выгрузки по всему сечению с различием в скоростях не более 10 %.

Диссоциация кускового известняка исследовалась на модели, разработанной в работе Пивоварова [6], в которой учтены тепловые, кинетические и диффузионные факторы. Расчетным путем выявлены температурные и концентрационные условия, при которых обеспечиваются наивысшая скорость обжига известняка при оговоренных требованиях к активности извести и скорости ее гашения. Для получения металлургической извести с активностью 88 % и временем гашения 5 мин точке оптимума отвечает температура 1150 °С, при крупности материала не более 80 мм. При этой температуре с повышением парциального давления  $\text{CO}_2$  от нуля до 1 атм скорость обжига линейно снижается на 19 %.

Предварительные исследования указали на необходимость синтеза разрозненных математических описаний в общую математическую модель шахтной печи. Такая модель может базироваться либо на системе уравнений в частных производных, по аналогии с одномерной динамической моделью трубчатой вращающейся печи, представленной в работе [Там же], или путем уравнивания материального и теплового балансов в отдельно выделенных областях (интервалах), методом пошаговой прогонки. Шахтные печи часто имеют многоуровневые системы отопления, что в математической формулировке соответствует задаче с распределенными параметрами, для решения которой наиболее удобен второй метод, который и был реализован при составлении компьютерной программы [1, 4].

Ввиду сложности поставленной задачи и высоких требований к вычислительному ре-

сурсу в окончательном исполнении модель стала статической одномерной. Поля всех ключевых характеристик, составов и свойств строятся по единственной высотной координате. Программа реализована в пакете Matlab 7.01 с использованием инструментов GUI.

К модели подключен блок условной оптимизации, в основе которого лежит метод комбинированных штрафов. Модуль оптимизации позволяет выполнять поиск оптимальных режимных условий процесса и определяющих геометрических размеров в заданном пользователем диапазоне параметров и в различном их сочетании. Задачей оптимизации является поиск максимума теплового КПД печи.

С помощью программы были выполнены численные расчеты и оптимизация ряда шахтных печей как проектируемых, так и уже действующих. Расчеты выполнялись для шахтных печей ОАО «Мечел», ОАО «УИК», ОАО «Алексеевский известковый завод», ОАО «Петросталь»; предпроектные расчеты выполнены для шахтной печи ФГУП «Литейно-прокатный завод» (г.Ярцево, Смоленская область), ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат», ОАО «УИК».

Численные оценки теплофизики шахтной печи показали, что тепловой КПД и качество выпускаемой извести могут быть повышены за счет перераспределения расходов теплоносителя между горелочными поясами, изменения высот этих поясов, регулирования соотношения газ – воздух, внесении конструктивных изменений.

По результатам исследований разработаны способы улучшения аэродинамического режима шахтной печи за счет изменения проницаемости слоя, улучшении геометрии области горелочной зоны, использования системы импульсного отопления, создания томильной зоны.

Выполненные численные и экспериментальные исследования способствуют эффективным конструкторским решениям и возможности воплотить их в современных технологических комплексах по производству металлургической извести в шахтных печах, включающих систему отопления печи (горелки, газовоздушные регулирующие устройства, система автоматического управле-

ния), саму печь и системы обслуживания. Часть результатов использована при проектировании шахтной печи на ФГУП «Литейно-прокатный завод», где построена печь с проектной производительностью 36-40 т/сут, цилиндрической формы, с высотой рабочего пространства 12 м. Печь смонтирована в помещении цеха со всем комплексом основного и вспомогательного оборудования.

Конструктивной особенностью этой печи является наличие форкамерной зоны, опоясывающей слой материала на уровне горелочного пояса. Сгорание большей части топлива происходит в пределах этой зоны, а далее продукты горения попадают в слой, чем обеспечивается равномерное распределение температур по сечению печи и требуемый температурный градиент по высоте слоя.

В настоящее время ведутся работы по созданию трехмерной модели шахтной печи с распределенными параметрами, в которой наряду с закономерностями тепломассообмена будут учтены условия выгорания топлива (кинетика горения газообразного топлива, влияние балластных газов); введен инерционный коэффициент сопротивления слоя в уравнение течения газового потока; учтено различие в скоростях движения материала. Модель придаст большую надежность прогнозным оценкам завершенности обжига в шахтных печах со сложными системами отопления, в том числе с зоной томления и различными рециркуляционными схемами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н. Математическое моделирование и численный анализ шахтной печи / И.Н.Белоглазов, В.О.Голубев // Цветные металлы. №7. 2005.
2. Гордон Я.М. Механика движения материалов и газов в шахтных печах / Я.М.Гордон, Е.В.Максимов, В.С.Швыдкий. Алма-Ата: Наука, 1989.
3. Малахов Г.М. Выпуск руды из обрушенных блоков. М.: Металлургия, 1952.
4. Математические модели в практике проектирования и оптимизации известеобжигательных шахтных печей / С.И.Жигач, В.Е.Никольский, И.Н.Белоглазов, В.О.Голубев // Промышленные печи и высокотемпературные реакторы. № 1. 2006.
5. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. ГОНТИ. М., 1931.
6. Пивоваров В.Г. Математическое описание процесса регенерации извести во вращающейся печи и синтез системы автоматического управления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинградская лесотехническая академия. Л., 1974.