

На правах рукописи

ГОЛУБЕВ Владимир Олегович

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИИ
ШАХТНОЙ ПЕЧИ ИЗВЕСТКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

*Специальность 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких
металлов*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2007**

© 2012, Math Designer

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургском государственном горном институте имени Г.В. Плеханова (техническом университете)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Илья Никитич Белоглазов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Владислав Алексеевич Холоднов

кандидат технических наук, доцент

Александр Юрьевич Баймаков

***Ведущее предприятие:* ОАО «РУСАЛ Всероссийский алюминиево-магниевый институт» (ОАО «РУСАЛ ВАМИ»)**

Защита состоится 22 мая 2007 года в 14 час. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.224.03 при Санкт-Петербургском государственном горном институте (техническом университете) имени Г.В. Плеханова по адресу: 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2, ауд. № 2205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного горного института.

Автореферат разослан 20 апреля 2007 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета,
д.т.н., доцент**

В.Н. БРИЧКИН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Производственные мощности отечественных заводов черной металлургии наращиваются темпом 8-9 % ежегодно. Устойчивый восходящий тренд мирового производства стали, которое за последние 10 лет возросло на 165 %, позволяет прогнозировать дальнейший рост спроса на сырье и оборудование как для основного, так и для вспомогательных производств.

В сталеплавильном и ферросплавном процессах важное место занимает известь, которая применяется в составе твердых шлакообразующих смесей и служит для удаления из расплава фосфора, серы, кремния, марганца. Для производства качественных сталей в установках типа печь-ковш, электропечах и конвертерах требуется известь, отличающаяся высокой активностью, малым временем гашения и низкой зольностью. Отечественные заводы нуждаются в эффективном печном оборудовании с низким энергопотреблением и невысокой стоимостью, позволяющем производить известь, соответствующую мировым стандартам качества.

Многочисленные исследования посвящены улучшению старых и разработке новых конструкций шахтных печей. В этом преуспели крупные зарубежные инженеринговые компании, такие как: "Maerz" («Мерц», Германия), "Cimprogetti" («Симпрогетти», Италия), "Chisaki" («Чисаки», Япония). Заметная роль в развитии теории и практики шахтного обжига известняков принадлежит отечественным ученым: А.В. Монастыреву, Н.П. Табунщикову, Я.М. Гордону, Е.В. Максимову и другим. В области оборудования и способов производства извести зарегистрировано около 150 действующих российских патентов, но не смотря на это отечественные шахтные печи уступают зарубежным как в уровне энергопотребления, так и качестве выпускаемой извести. Причина этого кроется, по-видимому, в недостаточном использовании возможностей шахтного обжига. Мало изученными до сих пор остаются некоторые вопросы, касающиеся кинетики диссоциации известняка, аэродинамики шахты, условий движения материала, особенностей сжигания топлива, режимной оптимизации.

Исследования выполнялись в соответствии с грантом СПГ-ГИ (ТУ) «Подготовка диссертации на соискание ученой степени кандидата наук» (2004 год), госбюджетной тематикой 6.30.00 «Исследование теоретических основ, разработка ресурсосберегающих безопасных технологий с применением компьютерного моделирования в производстве металлов» (I кв. 2005 – IV кв. 2007 г.г.) и хоздоговором ХД 11/2005 «Изучение состава, физико-химических и теплофизических свойств металлургических известняков». Работа соответствует перечню критических технологий РФ в областях «компьютерное моделирование» и «энергосбережение».

Цель работы. Разработка эффективных теплотехнических и аппаратных решений для реализации процесса обжига металлургического известняка в шахтной печи с получением извести сталеплавильной по стандарту ИС-1.

Методы исследований. В работе были использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. При проведении анализов химического состава известняков и извести применялись физические, физико-химические и химические методы изучения свойств: атомно-абсорбционный анализ, гравиметрия, титриметрия. Кинетика обжига известняка изучалась методом термогравиметрии. При выводе аналитических зависимостей применены положения теории математического моделирования и системного анализа. В основу режимной настройки печи положен метод многопараметрической оптимизации с ограничениями. При постановке и проведении лабораторных и опытно-промышленных испытаний реализованы методы планирования эксперимента и статистического анализа, использованы заводские методы технологического контроля.

Научная новизна работы

– в математической модели шахтной печи обжига известняка учтены процессы тепломассообмена между газами и материалом, кинетика химического разложения известняка и выгорания газообразного топлива, гидродинамика газового потока и механика движения дисперсной твердой фазы, что позволяет решать задачу оптимизации печи;

– в математическом описании обжига гранулы карбоната кальция приняты во внимание: внутренний тепломассообмен, кинетика диссоциации карбоната кальция, нестационарный характер внешних условий;

– определены условия получения в шахтной печи быстрогащейся извести с низким содержанием CO_2 по стандарту ИС-1;

– установлена теплотехническая целесообразность применения на шахтной печи известкового производства прямоточно-противоточной схемы теплообмена в сочетании с нижним контуром рециркуляции газов.

Практическая значимость и реализация результатов работы

– предложены принципиальные технические решения для реализации прямоточно-противоточной схемы теплообмена, исполнению узла отвода печных газов и воздуха в нижней части зоны обжига, обходного борово и камер сгорания верхнего пояса;

– выполнен расчет гидродинамики и выгорания топлива для шахтной печи ОАО «МЗ «Петросталь», производительностью 12-20 т/сут, разработаны рекомендации по совершенствованию ее конструкции и режима работы; в 2006 г печь реконструирована, в период пусконаладочных работ проведена ее режимная оптимизация; за счет конструктивных и режимных изменений расход газа снижен со 140-145 до 66-73 $\text{м}^3/\text{час}$, содержание полезных оксидов повышено с 63-70 до 75-80 % при прежней производительности;

– при разработке проекта строительства шахтной печи производительностью 36-40 т/сут на ФГУП «Литейно-прокатный завод» реализован, предложенный в работе, способ периферийной разгрузки печи через дефлектор с отверстиями; использована методика пуска и разогрева шахтной печи с выводом на оптимальные параметры работы; применен алгоритм регулирования температуры обжига с поддержанием максимума теплового к.п.д.; по результатам опытно-промышленных испытаний в 2007 г установлено, что содержание активных оксидов в извести составляет не менее 88 %.

Достоверность результатов работы. Приводимые результаты, выводы и рекомендации обоснованы путем сопоставления результатов численных расчетов, лабораторных анализов, эксперимен-

тальных и производственных данных. Эффективность предложенных мероприятий подтверждена в ходе опытно-промышленных испытаний и по итогам внедрения.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на Международной конференции «Металлургические технологии и экология» (ВО «РЕСТЭК», Санкт-Петербург, 2005); отраслевом семинаре производителей извести (ОАО «УИК», пос. Угловка, Новгородская обл., 2005); семинаре «Промышленные печи и высокотемпературные реакторы» (ВО «РЕСТЭК», Санкт-Петербург, 2006); конференции «Асеевские чтения» (Санкт-Петербург, 2006); научно-технических конференциях молодых ученых Санкт-Петербургского государственного горного института (Санкт-Петербург, 2005, 2006, 2007); семинарах кафедр печей, контроля и автоматизации металлургического производства, а также автоматизации технологических процессов и производств СПГ-ГИ (ТУ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей.

Автор диссертационной работы выражает благодарность директору ЗАО «Концерн «Струйные технологии» С.И. Жигач, заместителю директора – В.Е. Никольскому, начальнику отдела 96012 ЗАО «Металлургический завод «Петросталь» В.А. Русавскому, зам. генерального директора ФГУП «Литейно-прокатный завод» В.П. Стаину за помощь в организации и проведении исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста (в том числе 35 рис., 23 табл., 3 прил.) и включает введение, четыре главы, выводы, библиографический список из 136 литературных источников.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель, идея и решаемые задачи, названы основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен краткий научно-технический анализ современного состояния и перспектив развития теории и практики производства металлургической извести в шахтных печах.

Вторая глава посвящена вопросам моделирования шахтного обжига известняков, содержит разработанные математические описания диссоциации гранулы карбоната кальция и теплофизики

шахтной печи для обжига известняка, алгоритмы компьютерной реализации этих моделей, программный интерфейс.

В третьей главе изложены условия производства высших марок металлургической извести; содержатся результаты анализов химического состава известняков, реакционной способности извести, данные по кинетике обжига мелкодисперсного и крупнокускового известняка; приводятся результаты численных расчетов обжига известняков на газовых печах типовых отечественных конструкций, объясняются причины снижения их эффективности.

В четвертой главе представлены результаты геометрической и режимной оптимизации шахтной печи, итоги опытно-промышленных испытаний и промышленного внедрения; расчетные данные, связанные с разработкой новой конструкции системы отопления, обеспечивающей нижний контур рециркуляции газов, локальные картины пространственного изменения параметров газового потока, подтверждающие повышение равномерности газораспределения.

Приложения содержат документы и материалы, подтверждающие результаты внедрения.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Учет тепломассообмена между газами и материалом, кинетики химического разложения известняка, выгорания газообразного топлива, гидродинамики газового потока и механики движения дисперсной твердой фазы позволяет синтезировать математическую модель для оптимизации шахтной печи известкового производства.

Ввиду тесной связи протекающих явлений решение задачи оптимизации шахтной печи должно осуществляться совокупно на всех уровнях иерархии физико-химической системы. В работе синтезирована динамическая математическая модель шахтной печи обжига известняка, структурированная по иерархическому принципу. Модель высшего ранга создана для осесимметричной геометрии. Ее обобщенное уравнение можно записать в простой форме

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial}{\partial t}[\gamma_i \rho_i \varphi_i] + \frac{\partial}{\partial x}[\gamma_i \rho_i u_i \varphi_i] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \gamma_i \rho_i v_i \varphi_i] - \\
& -\frac{\partial}{\partial x} \left[\gamma_i \psi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \gamma_i \psi_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right] = S_i,
\end{aligned} \tag{1}$$

где t , x и r – соответственно время, вертикальная и радиальная координаты печи, с, м; i – индекс, указывающий на принадлежность параметров твердой или газовой фазе; γ – объемная доля фазы; φ – зависимая переменная; ψ – коэффициент переноса (диффузионный коэффициент); S – источниковый член.

В таблице 1 дается расшифровка величин, превращающих уравнение (1) в систему балансовых уравнений неразрывности, массы, энтальпии и инерции, отражающих состояние гранулированной твердой и газообразной фаз. Указанная система решается при граничных условиях I и II рода.

Состояние газовой фазы в областях печи, не заполненных материалом, может определяться по уравнениям, составленным для плотного слоя, если при использовании выражений из таблицы 1 принять: $\gamma = \varepsilon = 1$, $\Sigma S_j = S_{i=j} = 0$, $Q_{gm} = 0$, $F_{gs} = 0$.

Коэффициент межфазного переноса тепла при расчете Q_{gm} определяется по известному критериальному выражению Ранца-Маршала. Движение материала описывалось моделью механики жидкости, адаптированной к механике гранулированных сред Жангом и Ю (Zhang и Yu). Силовое взаимодействие между газом и материалом учтено с помощью закона Эргуна.

Для описания процесса диссоциации кускового известняка разработана усовершенствованная математическая модель, возникшая на базе работ В.Г. Пивоварова, В. Моффата и Р.В. Валмсли. В модели совместно рассмотрены процессы теплопроводности, конвекции и диффузии, кинетика и физические условия реакции диссоциации карбоната (рис. 1). Разработанная модель является динамической, что позволяет при переменных значениях внешних факторов получать данные о состоянии гранулы в каждый момент времени.

Таблица 1

Подстановочные выражения для уравнения (1)

Балансовое уравнение	i	γ	φ	ψ	S
<i>для газовой фазы в плотном слое</i>					
неразрывности	g	ε	1	0	ΣS_j
массы вещества	g	ε	χ_{gi}	$\rho_g D_{gi}$	$S_{i=j} + \sum_k v_{ik} R_k$
энтальпии	g	ε	h_g	λ_g / c_{pg}	$Q_{gm} + \sum_k (-\Delta H_k) R_k + \sum_j \Delta H_{sgj} \cdot S_j$
импульса	x	g	u_g	μ_g	$-\varepsilon(\partial p / \partial x) + \varepsilon \rho_{g0} g \beta_g (T_g - T_{g0}) - F_{x,gs}$
	r	g	v_g	μ_g	$-\varepsilon(\partial p / \partial r + \mu_g v_g / r^2) - F_{r,gs}$
<i>для твердой фазы в плотном слое</i>					
неразрывности	s	$(1-\varepsilon)$	1	0	$-\Sigma S_j$
массы вещества	s	$(1-\varepsilon)$	χ_{gi}	0	$-\kappa_j \cdot S_j$
энтальпии	s	$(1-\varepsilon)$	h_s	λ_s / c_s	$-Q_{gm} + \sum_j (-\Delta H_{sj}) \kappa_j \cdot S_j - \sum_j \Delta H_{sgj} \cdot S_j$
импульса	x	s	u_s	μ_s	$(1-\varepsilon)(\rho_s g - \partial p_s / \partial x)$
	r	s	v_s	μ_s	$-(1-\varepsilon)(\partial p_s / \partial r + \mu_s v_s / r^2)$

где g и s – индексы, указывающие на принадлежность параметра газовой или твердой фазе; ε – порозность слоя; χ_{gi} – массовая доля j -го компонента в твердой фазе, причем i меняется от 1 до 5 (H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 , CH_4); h – энтальпия, Дж/кг; u и v – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие вектора скорости потока, м/с; ΣS_j и $S_{i=j}$ – соответственно суммарный и покомпонентный перенос массы из твердой фазы в газовую с испаряющейся водой в зоне сушки $S_{i=1}$ и выделяющимся углекислым газом в зоне обжига $S_{i=2}$, кг/(м³·с); v_{ik} – стехиометрический коэффициент i -го компонента газа в k -ой реакции; R_k – скорость k -ой реакции, кг/(м³·с); Q_{gm} – перенос тепла между газом и материалом в результате конвекции, Вт/м³; ΔH_k и H_{sgj} – соответственно изменение энтальпии газа в

результате k -ой реакции в газовой фазе и выделения вещества из материала, Дж/кг; p и p_s – давление в газовой и твердой фазе соответственно, Па; T_g и T_{g0} – соответственно фактическая и опорная температура, К; ρ_{g0} – плотность газа при опорной температуре, кг/м³; β_g – коэффициент температурного расширения газа, К⁻¹; g – ускорение свободного падения, м/с²; $F_{x,gs}$ и $F_{r,gs}$ – вертикальная и радиальная составляющая объемной силы F_{gs} взаимодействия газа и материала, Н/м³; κ_j – стехиометрический коэффициент пропорциональности, причем $\kappa_j = 1$ для зоны сушки, $\kappa_j = 100/44$ для зоны диссоциации; μ_g и μ_s – соответственно динамический коэффициент вязкости газа и приведенный коэффициент вязкости гранулированной среды, Па·с.

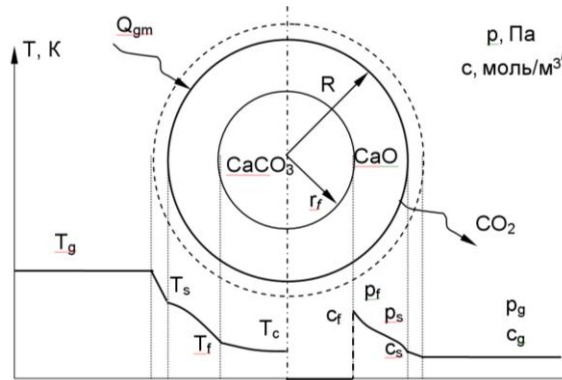


Рис. 1. Тепломассообменные процессы в грануле известняка при диссоциации: R – радиус гранулы, м; r_f – радиус фронта диссоциации, м; T – температура, К; c – концентрация CO_2 , моль/м³; p – давление, Па; Q_{gm} – тепловой поток от газов к материалу, Вт; нижние индексы: g – газ; s – поверхность гранулы; f – фронт реакции; c – центр гранулы.

В ее основе лежит дифференциальное уравнение 2-го порядка для одномерной симметричной задачи

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \psi \left(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right) - \gamma \cdot \frac{2}{r} \left(u \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} + \varphi_i \frac{\partial u}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где t и r – соответственно временная и радиальная координаты, м; φ – зависимая переменная; ψ и γ – коэффициенты уравнения; u – ско-

рость газа в пористой оболочке оксида кальция, м/с; i – индекс, указывающий на принадлежность параметров оксидной оболочке $i = 1$ и ядру $i = 2$ гранулы.

Система балансовых уравнений, отражающих состояние гранулы известняка, составляется на базе таблицы 2, аналогично предыдущему случаю.

Таблица 2

Подстановочные выражения для уравнения (2)

Уравнение	i	φ	ψ	γ
Тепловой баланс	1	T	a_{eff}	$\rho_g C_g / \rho_{eff} C_{eff}$
	2	T	a_2	0
Материальный баланс	1	c	D	1
Силовой баланс	1	p	k/μ_g	0

где ρ_g – плотность газа, находящегося в порах оболочки, кг/м³; T – температура, К; c и p – соответственно концентрация углекислого газа в объеме пористой оболочки и давление, моль/м³ и Па; a_{eff} , ρ_{eff} и C_{eff} – соответственно эффективные значения температуропроводности, плотности и удельной теплоемкости оболочки, м²/с, кг/м³ и Дж/(кг·К); ρ_g и C_g и μ_g – плотность, удельная теплоемкость динамический коэффициент вязкости газа, находящегося в порах, кг/м³, Дж/(кг·К) и Па·с; D – коэффициент диффузии, м²/с; k – проницаемость пористой структуры, м².

Скорость газа в порах определяется по уравнению неразрывности с допущением, что газ несжимаем. Давление во фронте гранулы формулируется с помощью граничного условия II рода. Кинетика реакции разложения известняка рассчитывается по известной методике с учетом величины равновесного давления CO₂ и температурной зависимости для константы скорости. Условие сохранения тепловой энергии во фронте реакции учитывает сток тепла при диссоциации. Также рассчитывается скорость смещения фронта реакции, объемная и массовая степени диссоциации гранулы. Описанные модели реализованы в пакете Comsol Multiphysics 3.3.

Для эффективного решения задачи оптимизации математическая модель шахтной печи приведена к стационарному одномерному виду и реализована совместно с моделью диссоциации грану-

лы и блоком многофакторной оптимизации в программной среде Matlab R2006b. В разработанной программе «LSF Wizard» при поиске решения используется метод прогонки (рис. 2). Модель идентифицирована на основе промышленных данных. Сравнение с заводскими данными показало, что отклонение расчетных от практических значений содержания СаО в извести не превышает 2 %.

2. На шахтной печи с прямым профилем футеровки за счет оптимизации конструкции и режима на основе предложенной математической модели реализуется энергосберегающий режим работы и достигается возможность получения металлургической извести высших марок.

На отечественных предприятиях основное распространение получили газовые шахтные печи цилиндрического и щелевого типа с прямым профилем футеровки, производительностью от 100 до 250 т/сут и диаметром шахты от 3,2 до 5,4 м. Чаще всего на них используются системы отопления с центральной и двумя рядами периферийных инжекционных горелок без высова. Таким печам характерен высокий удельный расход топлива, составляющий 980-1120 ккал/кг продукта повышенное остаточное содержание CO_2 в извести – до 10 % и длительное время ее гашения – 5-25 мин. Ввиду этого производство металлургической извести с остаточным CO_2 менее 2 %, содержанием активных оксидов более 80 % и временем гашения до 2 мин на таких печах затруднено. В работе использованы данные о работе 16 печей, эксплуатируемых на территории СНГ. С использованием разработанной математической модели по режимным параметрам действующих печей выполнена идентификация протекающих в них процессов.

Движение материала в цилиндрической шахтной печи при центральной выгрузке характеризуется отличием приосевой и пристенной скоростей в зоне обжига на 5-6 % с преобладанием приосевой, эта неравномерность сглаживается с применением системы горизонтально смещающегося стола выгрузки или с использованием несколько отверстий для выгрузки, расположенных вблизи стен.

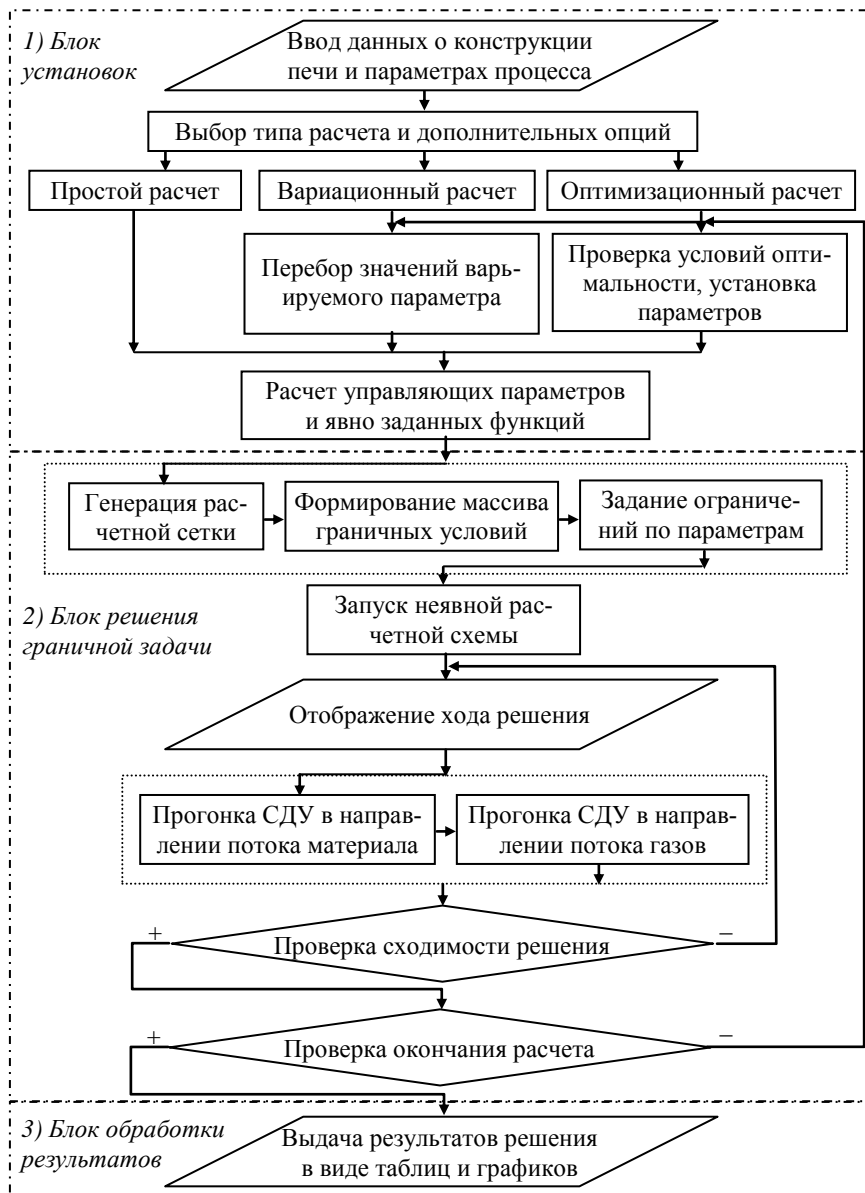


Рис. 2. Структура решения математической модели.

В зоне подогрева скорость подъема температуры известняка зависит от расхода продуктов сгорания, причем при коэффициенте расхода кислорода на печь в диапазоне $\alpha = 1,2-1,3$ высота зоны подогрева составляет 4-5 м, а при $\alpha = 2,2-2,6$ сокращается до 0,5-1 м. Этим достигается удлинение зоны обжига, но скорость диссоциации карбоната кальция замедляется из-за снижения температуры обжига до 900-920 °С.

На нижней границе зоны обжига в противоточной печи наблюдается резкий спад температуры материала, объясняемый приходом снизу холодного воздуха. Расчеты на модели диссоциации показали, что в этой области, при температурах ниже 1000 °С и степени диссоциации 80-85 %, дальнейший обжиг практически прекращается, не позволяя получить годный продукт. Показано, что за счет создания зоны адиабатной выдержки, удается поднять степень обжига только на 1-2 %. С использованием прямого тока газов и материала зона обжига удлиняется, что позволяет увеличить производительность печи на 10-15 % и достичь более высокой полноты декарбонизации известняка.

Показатель полидисперсности материала оказывает существенное влияние на потери напора в плотном слое. Использование на ряде печей рабочих фракций известняка 30-80 и 40-120 мм увеличивает общее гидродинамическое сопротивление слоя до 2,5 кПа, вызывая повышенный расход электроэнергии дымососом.

Распределение скоростей газового потока по сечению шахты оказывает существенное влияние на качество и равномерность обжига известняка. Установлено, что более рыхлое строение плотного слоя вблизи стен, возникающее при контакте кусков материала с футеровкой, не приводит к существенному изменению здесь локальной скорости газа, однако из-за сегрегации по крупности при загрузке неравномерность поля скоростей в сечении может достигать 3-4 %. При использовании систем периферийного отопления на противоточной печи возникает явление кольцевого тока газов. Оценено, что монтаж подвешенного центрального коллектора дымовых газов, при установке его выше уровня засыпи, использование горелок с высокой скоростью истечения не устраняют это явление. Использование фурм с водяным охлаждением нецелесообразно из-за

возрастающих тепловых потерь и частых прогаров, что показано на примере 20-тонной печи ЗАО «МЗ «Петросталь» (Санкт-Петербург).

Распределение температур продуктов сгорания в объеме печи изучалось с учетом газовых реакций. С привлечением пакета компьютерной гидродинамики установлено, что при введении газообразного топлива в слой известняка без предварительного смешения с окислителем, или отделенного от него прослойкой балластного газа, горение происходит в узкой диффузионной области на границе контакта топлива и воздуха, при этом в очаге горения реализуются температуры, вызывающие пережог поверхностного слоя кусков. Время пребывания извести при таких температурах определяется шириной фронта горения и изменяется в пределах от 30 до 180 мин. Эта особенность диффузионного горения, по-видимому, и объясняет причину низкой активности извести, получаемой в упомянутых выше печах. Для печей с центральными горелками исследованы условия устойчивого горения. Отмечено, что при избыточном расходе рециркулята на центральную горелку область горения смещается к верхней границе зоны обжига и возрастает эмиссия продуктов недожога с печным газом.

Для выявления условий успешного производства сортовой металлургической извести проведены экспериментальные исследования. С целью установления максимальных температур в печи, гарантирующих получение извести марки ИС-1 с реакционной способностью 2 мин (1 сорт) и 5 мин (2 сорт), проведены контрольные обжиги, определено время гашения. Анализ были подвергнуты известняки Добрятинского (Д), Касимовского (К), Пореченского (П) и Жилетовского (Ж) месторождений (рис. 3). Испытания проводились параллельно по ГОСТ 22688-77 (общее время) и DIN/EN 459-2 (до достижения температуры 60 °С). Наилучшую реакционную способность проявил касимовский известняк.

Кинетика обжига известняка изучалась эмпирически и численно на модели диссоциации гранулы. В ходе эксперимента куски известняка размером от 20 до 50 мм подвешивались на платиновой нити и обжигались в муфельной печи при разных температурах. Изменение веса кусков фиксировалось непрерывным взвешиванием. В относительных координатах времени и массы, если последняя рас-

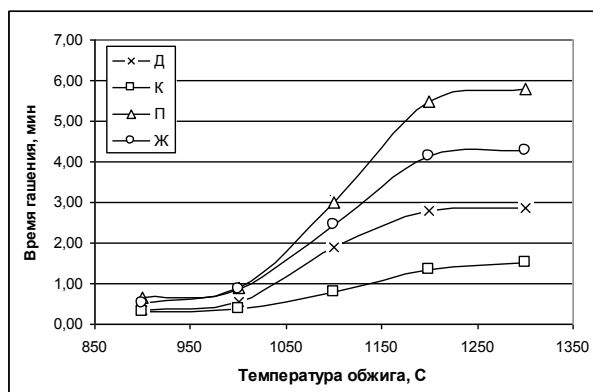


Рис. 3. Влияние температуры обжига на длительность гашения извести по DIN/EN 459-2.

считывается за вычетом примесей, кинетические кривые обжига известняков разной крупности при разных температурах совпадают. Совпадение расчетных и экспериментальных данных по кинетике обжига не превышает 2 %. При последующих модельных расчетах изучалось влияние на кинетику обжига куска температуры, концентрации углекислого газа и положения фронта реакции. В частности показано, что при степени диссоциации $\eta > 80\%$, процесс обжига известняка лимитируется внутренним массообменом в грануле, поэтому температура не является эффективной мерой воздействия на скорость процесса в этот период.

С учетом результатов предшествовавших исследований сформулированы параметрические ограничения и выполнен оптимизационный расчет для задачи диссоциации известняка в шахтной печи. Варьировались как режимные, так и геометрические параметры. Ограничения были наложены по минимуму содержания оксида кальция в извести, температурам в зоне обжига, отходящих газов, извести на выгрузке и другим параметрам. Критерием оптимальности служил максимум теплового к.п.д. печи. Установлено, что повышение тепловой эффективности печи успешнее всего обеспечивается снижением общего расхода воздуха, введением рециркуляционного газа, переносом точки забора рециркулята ниже горелочных устройств.

На основании результатов оптимизации предложена конструкция прямоточно-противоточной шахтной печи (рис. 4-а), отвечающая оптимальному профилю температур газов и материала, при котором обеспечивается заданная степень обжига $\eta = 0,95$ (рис. 4-б) и получение извести со временем гашения не более 2 мин. Расчетное значение температуры отходящих газов составляет около 220 °С, температура материала на выгрузке близка к 50 °С, удельный расход тепла – 1040-1080 ккал/кг извести.

Наиболее ответственная часть печи – обходной газовый тракт от нижнего газового коллектора к горелочным камерам. Для подачи воздушно-рециркулянтной смеси предлагается использовать высокотемпературный эксгаустер и систему футерованных борозов из легковесного наливного огнеупора. В работе определены условия функционирования печи, производительность эксгаустера, необходимая величина высова горелочных амбразур, температура рециркуляционных газов, температура газов при выходе из камеры сгорания, необходимый перепад давлений.

Программные возможности по оптимизации режимных параметров шахтных печей использованы для настройки после частичной реконструкции печи обжига известняка на ЗАО «МЗ «Петросталь» с производительностью 12-20 т/сут и полной высотой 9,9 м. Оптимизационный расчет использован для определения общего коэффициента расхода кислорода, соотношения между расходами воздуха на горелки и в зону охлаждения. Выполнен динамический расчет сушки печи, создана методика вывода на оптимальный режим, использованная в период пуско-наладочных работ. По результатам работы на печи отмечено снижение расхода газа в 2,3 раза, увеличение степени обжига в среднем на 7 %.

Другим объектом внедрения результатов работы стала вновь спроектированная шахтная печь производительностью 36-40 т/сут на ФГУП «ЛПЗ» (г. Ярцево). Для нее выполнен расчет движения материала, с учетом которого рекомендовано использование дефлектора с отверстиями в зоне разгрузки; проведен оптимизационный расчет, разработана методика выхода на режим, в период опытно-промышленных испытаний подтверждено заявленное содержание активных оксидов в извести на уровне 88 %.

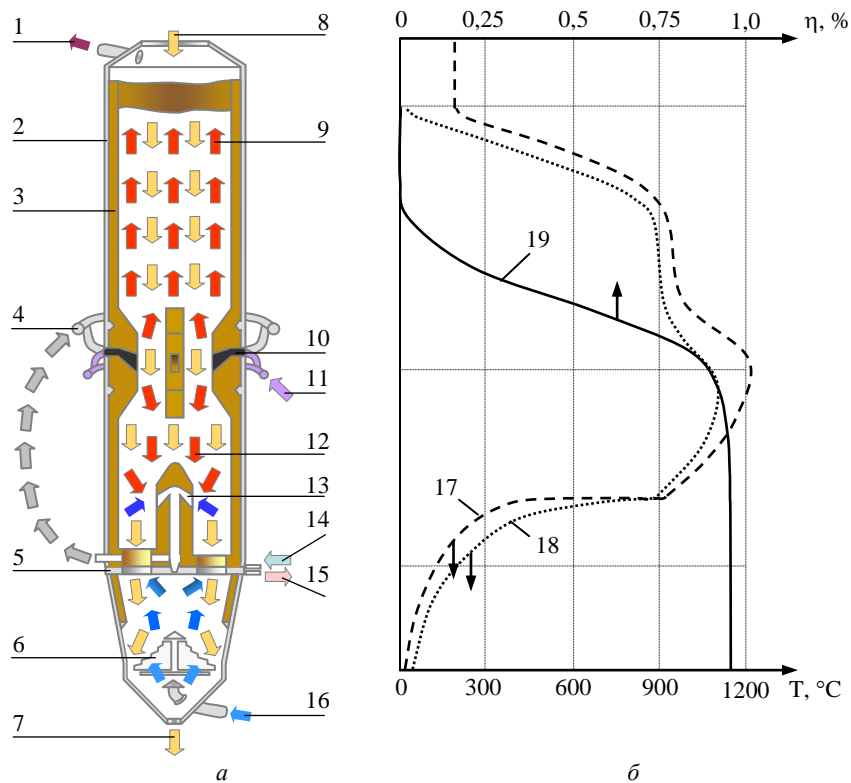


Рис. 4. Схема конструкции (а), распределение температур и степени обжига по высоте шахтной печи обжига известняка (б):

1 – отвод газов; 2 – корпус печи; 3 – футеровка; 4 – коллектор рециркуляционных газов; 5 – дефлектор с отверстиями; 6 – механизм разгрузки; 7 – известь; 8 – известняк; 9 – восходящий поток газов; 10 – камера смешения с горелочной амбразурой; 11 – топливо; 12 – нисходящий поток газов; 13 – газовый коллектор; 14, 15 – охлаждающий воздух на вход и с выхода дефлектора; 16 – воздух в зону охлаждения печи; 17, 18 и 19 – график температуры газов, материала и степени обжига.

ВЫВОДЫ

1. Совокупность процессов, протекающих в шахтной печи, удовлетворительно описывается предложенной системой уравнений, отклонение расчетных значений содержания СаО в извести от экспериментальных и производственных данных не превышает 2 %.

2. Математическая модель, учитывающая тепломассообмен в оксидной оболочке, химическую кинетику процесса диссоциации карбоната кальция и нестационарный характер влияния внешних факторов удовлетворительно описывает разложение гранул известняка различной крупности в широком диапазоне температур и концентраций CO_2 в газовой фазе.

3. Диссоциация кускового известняка на начальном этапе процесса определяется фактором температуры, а при степени обжига куска свыше 80-85 % лимитирующим механизмом обжига становится внутренний массоперенос в поверхностной оболочке извести.

3. Максимально допустимая температура обжига кускового известняка, обеспечивающая получение извести с требуемым временем гашения может быть установлена путем анализа реакционной способности извести, полученной при температурах 900, 1000 и 1300 °С. Для получения сталеплавильной извести 1 сорта марки ИС-1 температура в печи в большинстве случаев не должна превышать 1000 °С; у отдельных известняков увеличение температуры обжига с 1000 до 1300 °С сопровождается незначительным увеличением времени гашения.

5. Перспективным направлением совершенствования шахтных печей с прямым профилем футеровки является перевод на прямоточно-противоточный принцип теплообмена и устройство нижнего контура рециркуляции продуктов сгорания с последующим их сжиганием в смеси с топливом и воздухом.

6. Конструкция прямоточно-противоточной шахтной печи с нижним контуром рециркуляции позволяет выпускать марочную известь для металлургических нужд с проектным расходом тепловой энергии не более 1040 ккал/т извести.

7. Методика вывода печи на режим и функционирования в рабочем режиме с поддержанием максимума теплового к.п.д. может успешно использоваться на шахтных печах обжига известняка. Снижение расхода топлива в 2,3 раза и повышение содержания CaO в извести на 7 % на ЗАО «МЗ «Петросталь» оказалось возможным за счет изменения положения горелок и оптимизации теплового режима. Выгрузка извести через дефлектор с отверстиями, размещенными

ми вдоль стен, сглаживает различие приосевой и периферийной скоростей материала при центральной разгрузке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО:

1. Белоглазов И.Н. Математическое моделирование и численный анализ шахтной печи / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев // Цветные металлы, 2005. №7. С. 31-35.

2. Жигач С.И. Математические модели в практике проектирования и оптимизации известеобжигательных шахтных печей / С.И. Жигач, В.Е. Никольский, И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев // Черные металлы, 2006. июль-август. С. 28-33.

3. Белоглазов И.Н. Модель технологии обжига известняка в шахтной печи / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев, О.В. Зиязитдинова // Записки горного института, 2006. Т. 169. С. 71-73.

4. Голубев В.О. Исследование процесса обжига металлургического известняка в шахтной печи // Там же. С. 101-103.

5. Голубев В.О. Математическая модель диссоциации одиночной гранулы карбоната кальция / В.О. Голубев, И.Н. Белоглазов // Там же. С. 104-107.

6. Никольский В.Е. Математические модели в практике разработки высокоэффективных шахтных печей для обжига карбонатных пород / В.Е. Никольский, С.И. Жигач, И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев // Сб. тр. конф. «Промышленные печи и высокотемпературные реакторы». СПб: «Руда и металлы», 2006. С. 73-75.