

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ИЗВЕСТКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Е. П. Протасова, доцент Нижегородского  
государственного архитектурно-строительного  
университета;*

*Н. Т. Пузиков, к.т.н., доцент кафедры «Механика»  
Нижегородский государственный инженерно-  
экономический институт*

На российском рынке, как показывает анализ, основными конкурентными преимуществами печных систем являются низкий удельный расход топлива, компактность установок и приемлемая стоимость оборудования [4]. Высокие расценки на импортные печи не позволяют рассчитывать на широкое их внедрение на территории России, а качество российских альтернатив недостаточно.

Большое количество работ, проводимых в настоящее время, посвящено совершенствованию старых и разработке новых конструкций отечественных шахтных печей [2,3,5]. Существует около 150 действующих российских патентов в области оборудования и способов производства извести, однако целый ряд мероприятий, эффективность использования которых установлена опытом работы некоторых разновидностей шахтных печей зарубежной конструкции [7,8], в отечественной практике шахтного обжига известняка, применения пока не нашел. Повышенное внимание уделяется и вопросам автоматизации установок обжига известняка [6]. Реализация создаваемых этими мероприятиями возможностей, разработка новых эффективных систем отопления, устройств загрузки и выгрузки, точная режимная настройка шахтных

печей требуют глубокого изучения теплотехнических особенностей шахтного обжига и их пристального анализа методами физического и математического моделирования, компьютерного расчета. Недостаточно изученными остаются и некоторые вопросы, касающиеся кинетики диссоциации известняка, аэродинамики шахты, условий движения материала, эффективности сжигания топлива, стойкости футеровок, режимной оптимизации шахтных печей. Все это сдерживает инновационную динамику и увеличивает остроту проектных рисков при реализации новых конструкторских идей в области технологии и оборудования шахтного обжига известняков.

С учетом вышеизложенного задачей исследования является синтез прогнозирующей математической модели шахтной печи с газовым отоплением на базе современных представлений о кинетике диссоциации карбонатных пород, механизме тепломассообменных процессов, аэродинамики газового потока и движения гранул, модели сгорания газообразного топлива (метана).

При анализе процессов, протекающих в шахтной печи, их условно можно разделить на два уровня: микро- и макроуровень, поэтому и общую модель шахтной печи целесообразно разбить на две части: микро- и макрокинетическую [1]. Совокупность факторов, определяющих скорость физико-химических процессов в малых областях шахтной печи, можно отнести к микрокинетике. Микрокинетическая группа включает уравнения состояния единичной гранулы материала, реакции горения в газовой фазе. На эффекты микроуровня оказывают влияние крупномасштабные тепловые, диффузионные, гидродинамические явления, которые относятся к макрокинетической группе. Их специфика зависит от конструкции печи, способа и условий ввода топлива, воздуха, структуры плотного слоя и других факторов.

С точки зрения системного анализа можно выделить пять базовых уровней, на которых моделируются процессы, протекающие в шахтной печи обжига известняка:

1) физико-химическая кинетика (реакции горения топлива, испарение влаги, диссоциация карбонатов);

2) протекание процессов в отдельно взятой грануле материала (теплоперенос, диффузия, напорное течение в узких поровых каналах);

3) обстановка в пограничном слое вокруг гранулы (гидродинамика обтекания, теплообмен газами, диффузия);

4) характер взаимодействия в пределах рассматриваемой зоны аппарата (преимущественно гидродинамика);

5) обстановка в масштабе аппарата (гидродинамика печи, движение материала, теплоперенос).

Ввиду тесной связи перечисленных явлений решение задачи моделирования шахтной печи должно осуществляться совокупно на всех уровнях иерархии. Такой подход позволяет создать завершенную модель аппарата и объединить общие закономерности теплофизических процессов с конкретной технологией, режимными параметрами и конструкцией шахтной печи. Для этого были изучены и применены следующие методы:

1) оценки порозности слоя;

2) теплообмена в плотном фильтруемом слое;

3) анализа аэродинамики газового потока и гидродинамического сопротивления шихты;

4) численного моделирования движения материала;

5) расчета горения газообразного топлива;

6) диссоциации кускового известняка;

7) многопараметрической оптимизации с ограничениями.

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

$$-\frac{\partial}{\partial t}[\gamma_i \rho_i \varphi_i] + \frac{\partial}{\partial x}[\gamma_i \rho_i u_i \varphi_i] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \gamma_i \rho_i v_i \varphi_i] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \gamma_i \mu_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \gamma_i \mu_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right] = S_i,$$

где  $t$ ,  $x$  и  $r$  – соответственно время, вертикальная и радиальная координаты печи, с, м;  $i$  – индекс, указывающий на принадлежность параметров твердой или газовой фазе;  $\gamma$  – объемная доля фазы;  $\mu$  – зависящая переменная;  $\nu$  – 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. В таблице приняты следующие обозначения:  $g$  и  $s$  – индексы, указывающие на принадлежность параметра газовой или твердой фазе;  $g_i$  – массовая доля  $j$ -го компонента в твердой фазе, причем  $i$  меняется от 1 до 5 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ );  $h$  – энтальпия, Дж/кг;  $u$  и  $v$  – соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие вектора скорости потока, м/с;  $S_j$  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/(м<sup>3</sup>с);  $\nu_{ik}$  – стехиометрический коэффициент  $i$ -го компонента газа в  $k$ -ой реакции;  $R_k$  – скорость  $k$ -ой реакции, кг/(м<sup>3</sup>с);  $Q_{gm}$  – перенос тепла между газом и материалом в результате конвекции, Вт/м<sup>3</sup>;  $H_k$  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;  $g_0$  – плотность газа при опорной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $g_g$  – коэффициент температурного расширения газа, К<sup>-1</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $F_{x,gs}$  и  $F_{r,gs}$  – вертикальная и радиальная составляющая объемной силы  $F_{gs}$  взаимодействия газа и материала, Н/м<sup>3</sup>;  $j$  – стехиометрический коэффициент пропорциональности, причем  $j=1$  для зоны сушки,  $j=100/44$  для зоны диссоциации;  $g$  и  $s$  – соответственно динамический коэффициент вязкости газа и приведенный коэффициент вязкости гранулированной среды, Пас. Указанная система решается при граничных условиях I и II рода.

Таблица 1

**Подстановочные выражения для уравнения (1)**

Балансовое уравнение	$i$				$S$	
неразрывности массы вещества	$g$		1	0	$S_j$	
	$g$		$g_i$	$g D_{gi}$	$S_{i=j} + \sum_k v_{ik} R_k$	
энтальпии	$g$		$h_g$	$g/c_{pg}$	$Q_{gm} + \sum_k (-\Delta H_k) R_k + \sum_j \Delta H_{sgj} \cdot S_j$	
	$x$	$g$	$u_g$	$g$	$-\varepsilon(\partial p / \partial x) + \varepsilon \rho_{g0} g \beta_g (T_g - T_{g0}) - F_{x,gs}$	
импульса	$r$	$g$	$v_g$	$g$	$-\varepsilon(\partial p / \partial r + \mu_g v_g / r^2) - F_{r,gs}$	
неразрывности	$s$	(I-)	1	0	$-S_j$	
массы вещества	$s$	(I-)	$g_i$	0	$-\kappa_j \cdot S_j$	
энтальпии	$s$	(I-)	$h_s$	$s/c_s$	$-Q_{gm} + \sum_j (-\Delta H_{sj}) \kappa_j \cdot S_j - \sum_j \Delta H_{sgj} \cdot S_j$	
импульса	$x$	$s$	(I-)	$u_s$	$s$	$(1 - \varepsilon)(\rho_s g - \partial p_s / \partial x)$
	$r$	$s$	(I-)	$v_s$	$s$	$-(1 - \varepsilon)(\partial p_s / \partial r + \mu_s v_s / r^2)$

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:  $S_j = S_{i=j} = 0$ ,  $Q_{gm} = 0$ ,  $F_{gs} = 0$ .

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.

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

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

где  $t$  и  $r$  – соответственно временная и радиальная координаты, м;  $\varphi_i$  – зависимая переменная;  $\psi$  и  $\gamma$  – коэффициенты уравнения;  $u$  – скорость газа в пористой оболочке оксида кальция, м/с;  $i$  – индекс, указывающий на принадлежность параметров оксидной оболочке  $i = 1$  и ядру  $i = 2$  гранулы.

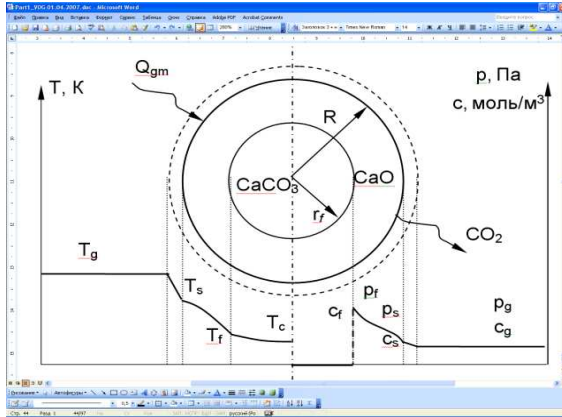


Рис. 1. Тепломассообменные процессы в грануле известняка при диссоциации:

$R$  – радиус гранулы, м;  $r_f$  – радиус фронта диссоциации, м;

$T$  – температура, К;  $c$  – концентрация  $\text{CO}_2$ , моль/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление, Па;  $Q_{gm}$  – тепловой поток от газов к материалу, Вт; нижние индексы:  $g$  – газ;  $s$  – поверхность гранулы;  $f$  – фронт реакции;  $c$  – центр гранулы.

Система балансовых уравнений, отражающих состояние гранулы известняка, составляется на базе таблицы 2, аналогично предыдущему случаю. В таблице приняты следующие обозначения:  $\rho_g$  – плотность газа, находящегося в порах оболочки, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К;  $c$  и  $p$  – соответственно концентрация углекислого газа в объеме пористой оболочки и давление, моль/м<sup>3</sup> и Па;  $a_{ef}$ ,  $\rho_f$  и  $C_{ef}$  – соответственно эффективные значения теплопроводности, плотности и удельной теплоемкости оболочки, м<sup>2</sup>/с, кг/м<sup>3</sup> и Дж/(кгК);  $\rho_g$  и  $C_g$  и  $\mu_g$  – плотность, удельная теплоемкость динамический коэффициент вязкости газа, находящегося в порах, кг/м<sup>3</sup>, Дж/(кгК) и Пас;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $k$  – проницаемость пористой структуры, м<sup>2</sup>.

Таблица 2

**Подстановочные выражения для уравнения (2)**

Уравнение	<i>i</i>			
Тепловой баланс	1	<i>T</i>	$a_{ef}$	${}_g C_{g/ef} C_{ef}$
	2	<i>T</i>	$a_2$	0
Материальный баланс	1	<i>c</i>	<i>D</i>	1
Силовой баланс	1	<i>p</i>	$k/g$	0

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  $CO_2$  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 3.5a.

Для эффективного решения задачи оптимизации математическая модель шахтной печи приведена к стационарному одномерному виду и реализована совместно с моделью диссоциации гранулы и блоком многофакторной оптимизации в программной среде Matlab R2006a. В разработанной программе «LSF Wizard» при поиске решения используется метод прогонки (рис. 2). Модель идентифицирована на основе промышленных данных.

Проверка достоверности модели проводилась на основе данных о работе шахтных печей, предоставленных ОАО «Силикатный завод №1» (г. Нижний Новгород) и ЗАО «Борский силикатный завод» (г. Нижний Новгород),



на базе НПФ ООО «Промэнергогаз-2». 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 %. Математическая модель, учитывающая теплообмен 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  $\text{CO}_2$  в газовой фазе.

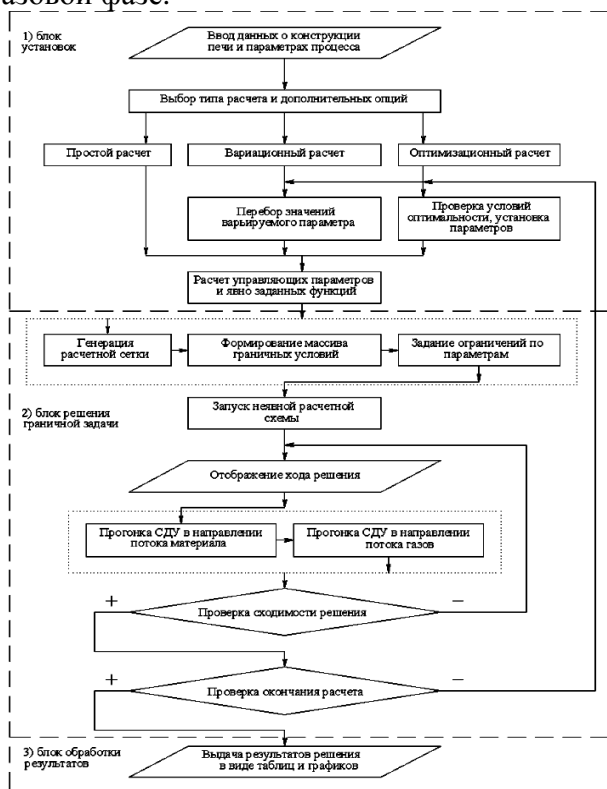


Рис. 2. Алгоритм решения математической модели

## *Список литературы*

1. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии: основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 498 с.

2. Косников, А. А. Разработка математических моделей кинетики окислительно-восстановительных процессов шахтной свинцовой плавки: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.16.03 / А. А. Косников; Ин-т металлургии и обогащения. – Алма-Ата, 1991. – 24 с.

3. Котельников, Ю. В. Комовая известь. Оборудование для обжига извести [Электронный ресурс] / Ю. В. Котельников. – Красково: Спецпромтех, 2006. – Режим доступа : <http://www.spsss.ru>.

4. Материалы отраслевого семинара производителей извести (пос. Угловка, октябрь 2005 г.) / ОАО «УИК». – Угловка [пос.]: УИК, 2005.

5. Шубин, А. Ф. Прямоточно-противоточная шахтная печь для производства активной извести / А.Ф. Шубин [и др.] // Сталь. – 2001. – № 5 – С. 80–81.

6. Constantinescu, R. MRAC strategy for the temperature profile control of a lime kiln [Electronic resource] / R. Constantinescu. – Bellingham : IDEAS Simulation Inc. – Режим доступа: <http://www.ideas-simulation.com/downloads/LimeKiln.pdf>.

7. Piringer, H. Process optimization on Maerz lime kilns / H. Piringer // ZKG Int. – 2005. – Vol. 58, № 1. – P. 41–48.

8. Predescu, L. Improving the Vertical Lime Kiln / L. Predescu // Steel Times Int. – 1997. – Vol.