

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ГАЗА НА РАБОТУ ШАХТНЫХ ИЗВЕСТКОВО-ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Одним из энергоемких процессов в металлургии является известково-обжиговое производство. До 30 % извести получают в газовых противоточных шахтных печах, удельный расход топлива в которых составляет 140÷150 кг у.т./т. Анализ их эксплуатационных показателей показывает наличие значительного потенциала в экономии топлива и повышении качества готового продукта. Поэтому, вопросы всестороннего изучения данных агрегатов являются актуальными.

Комплексные расчетно-теоретические исследования известково-обжиговых печей представлены малым количеством работ [1,2]. До конца неизученным является вопрос о закономерностях смесеобразования в слое кускового материала [3]. В этой связи, целью данной работы, явилось исследование влияния турбулентной диффузии газа на технологический процесс обжига известняка.

Схема исследуемого агрегата приведена на рис. 1. Здесь:  $H_{нагр}$  – высота зоны нагрева известняка;  $H_{обж}$  – высота зоны обжига;  $H_{охл}$  – высота зоны охлаждения извести. Печь представляет собой вертикальную цилиндрическую шахту. Загрузка известняка осуществляется сверху скиповым питателем, выгрузка извести – в основании печи. Движение материала и газов противоточное. Печь состоит из трех технологических зон: зоны нагрева известняка, зоны обжига и зона охлаждения извести, в которой нагревается воздух. Подача топлива происходит через два яруса боковых горелок и центральную горелку (кern). Часть дымовых газов, отходящих из печи, направляется на рециркуляцию в центральную горелку.

При математическом моделировании печи была численно решена система дифференциальных уравнений, описывающих ее работу. В общую постановку тепло- и массопереноса были включены задача безвихревого движения газа в плотном слое кускового материала, задача конвективного и диффузионного переноса вещества в потоке, задача горения топлива, задача конвективного переноса теплоты в потоке, задача внутреннего тепло-массообмена в куске материала.

В качестве допущений для газа принято: движение установившееся, потенциальное, симметричное относительно оси печи; плотность теплоносителя не зависит от давления и температуры; теплопроводность в газе и молекулярная диффузия не влияют на процесс; структура слоя постоянная по вы-

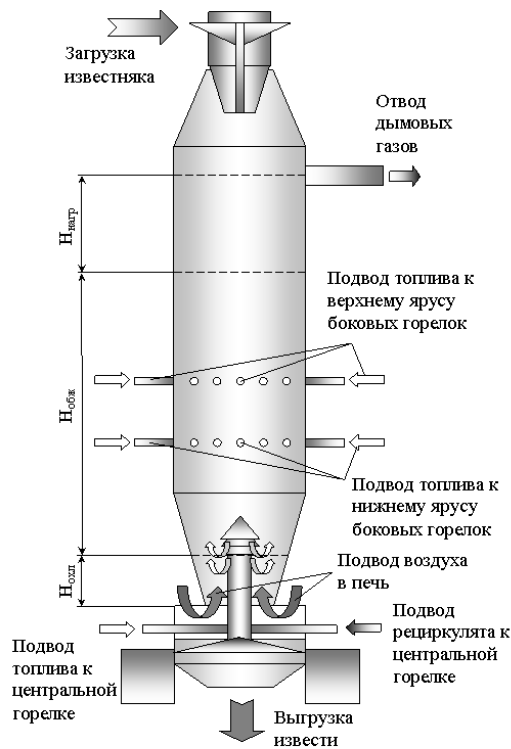


Рисунок 1 – Схема шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе

соте и радиусу. Допущения для материала – кусок имеет сферическую форму; его размеры не изменяются в процессе термообработки; влияние скорости химической реакции и диффузии диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в куске на интенсивность диссоциации пренебрежимо мало; теплопроводность границы раздела фаз «известь-известняк» (фронта диссоциации) определяется термическим сопротивлением прилегающих слоёв; температура выделившегося с поверхности куска  $\text{CO}_2$  равна температуре диссоциации; отсутствует также влияние продольной теплопроводности в слое.

В краткой форме математическая постановка задачи представлена в виде системы дифференциальных уравнений (1)–(5):

- уравнение потенциального движения газа в цилиндрической системе координат с учетом источников массы вещества:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi(r, h)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi(r, h)}{\partial h^2} = \frac{\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)}{dV}, \quad (1)$$

где  $\varphi(r, h)$  – потенциал скорости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$  – текущий радиус печи,  $\text{м}$ ;  $h$  – текущая высота печи,  $\text{м}$ ;  $\Delta V_{\text{ист}}^*(r, h)$  – изменение расхода газа в элементарном объеме в результате химических реакций горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $dV$  – элементарный объем,  $\text{м}^3$ .

- уравнение распределения концентраций газообразного вещества в движущемся несжимаемом потоке с учетом конвективного и диффузионного механизмов переноса:

$$\bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} + \bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial h} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial C(r, h)}{\partial r} \right) + G_C(r, h), \quad (2)$$

где  $\bar{w}_r(r, h)$ ,  $\bar{w}_h(r, h)$  – радиальная и вертикальная составляющие вектора скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $C(r, h)$  – концентрация вещества, диффундирующего в слое,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $D_r(r, h)$  – коэффициент радиальной турбулентной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$  [4];  $G_C(r, h)$  – интенсивность выделения (поглощения) вещества в единице объема слоя, вследствие химических реакций горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{с}^{-1}$ .

- уравнение конвективного переноса теплоты в потоке газа:

$$c_r(t_r) \cdot \left[ \bar{w}_h(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial h} + \bar{w}_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot D_r(r, h) \cdot \frac{\partial t_r(r, h)}{\partial r} \right) \right] = q_v(r, h), \quad (3)$$

где  $c_r(t_r)$  – изобарная объемная теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $t_r(r, h)$  – температура теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;  $q_v(r, h)$  – закон распределения мощности источников (стоков) теплоты на основе решения задач горения топлива и диссоциации известняка,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

- уравнение внутреннего теплообмена материала:

$$\begin{aligned} & \rho_{m_i} \cdot c_{m_i}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{\partial}{\partial r_k} \left( \lambda_{m_i}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} \right) + \lambda_{m_i}(t_m) \cdot \frac{2}{r_k} \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k}, \end{aligned} \quad (4)$$

где «i» – индекс соответствующий фазе известняка (i=1) или извести (i=1);  $\rho_m$ ,  $c_m(t_m)$ ,  $\lambda_m(t_m)$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость, Дж/(кг·К), и теплопроводность, Вт/(м·К), материала, соответствующей фазе;  $r_k$  – текущий радиус куска, м;  $\tau$  – текущее время, с;  $t_m(r_k, \tau, r)$  – температура материала, °С.

• граничное условие для фронта диссоциации (на границах раздела фаз «известь»-«известняк»):

$$\begin{aligned} & -\lambda_{CaO}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} = -\lambda_{CaCO_3}(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(r_k, \tau, r)}{\partial r_k} + \\ & + q_{дис} \cdot \rho_{CaCO_3} \cdot \frac{\partial r_\phi}{\partial \tau} + \frac{\rho_{CaCO_3}}{\rho_{CO_2}} \cdot \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CaCO_3}} \cdot c_{CO_2}(t_{дис}) \cdot t_{дис} \cdot \frac{\partial r_\phi}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $q_{дис}$  – тепловой эффект эндотермической реакции диссоциации известняка, Дж/кг;  $\mu$  – мольная масса материала, кг/кмоль; «CaO», «CaCO<sub>3</sub>» – индексы соответствующие теплофизическим свойствам извести и известняка;  $t_{дис}$  – температура диссоциации известняка, °С;  $c_{CO_2}(t_{дис})$  – изобарная объемная теплоемкость диоксида углерода при температуре диссоциации, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $r_\phi$  – текущий радиус, определяющий положение фронта диссоциации в куске, м.

Расчет горения топлива представлен уравнениями реакций окисления горючих компонентов и окислительно-восстановительной реакции водяного газа. Система уравнений (1)–(5) дополнена рядом граничных условий: на поверхности материала, внутренних стенах печи, нижнем и верхнем торцах слоя, – обеспечивающих их совместное решение. Кроме того, учтены потери теплоты через боковую изоляцию.

Поставленная задача решена интегро-интерполяционным методом. Полученные в результате конечно-разностные уравнения реализованы на ПЭВМ в языке Visual Basic. Адекватность модели проверена путем ее сравнения с результатами известных численно-аналитических решений и экспериментальных данных работы печи.

Влияние турбулентной диффузии в газе изучалось в условиях шахтной печи №2 цеха обжига известняка ОАО «Алчевский металлургический комбинат» [5]. Печь отапливается природным газом, высота слоя материала 18 м, внутренний диаметр шахты 4,3 м. Нижний и верхний ярусы боковых горелок расположены соответственно на уровне 6 м и 8 м, центральная горелка – на уровне 2 м. Суточная производительность печи составляет 200 т/сут. Содержание (CaO+MgO)<sub>общ</sub> в извести – 75÷85 % при степени обжига известняка 84÷91 %. Размер обрабатываемых фракций известняка – 40÷100 мм.

В исследованном режиме работы печи: расход природного газа на центральную горелку составил 700 м<sup>3</sup>/ч, на нижний ярус боковых горелок – 200 м<sup>3</sup>/ч, на верхний ярус боковых горелок – 200 м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха – 12000 м<sup>3</sup>/ч; расход рециркулята на центральную горелку – 1200 м<sup>3</sup>/ч.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 2–4.

Таблица 1 – Показатели работы шахтной печи №2

Источник данных	Состав дымовых газов (сухая часть), %							Химический недожог, %	Степень обжига, %
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>		
Эксперимент	20,5	6,8	0,2	0,4	70,3	1,6	0,2	27,3	86,0*
Расчет с учетом диффузии	21,0	6,7	0,7	1,1	69,3	1,2	0,0	25,1	74,7
Расчет без учета диффузии	9,6	13,1	0,6	1,0	71,3	4,4	0,0	64,4	34,1

\* – по данным теплотехнической лаборатории завода.

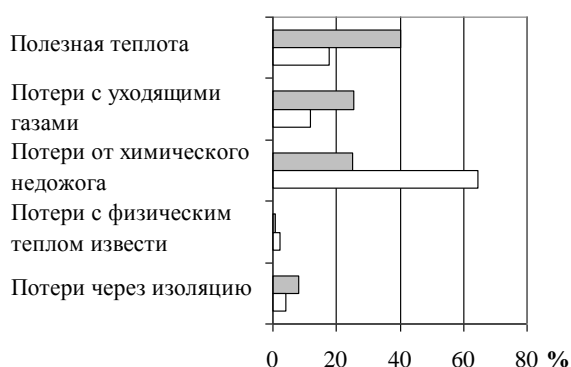


Рисунок 2 – Тепловой баланс шахтной известково-обжиговой печи  
 ■ С учетом диффузии  
 □ без учета диффузии

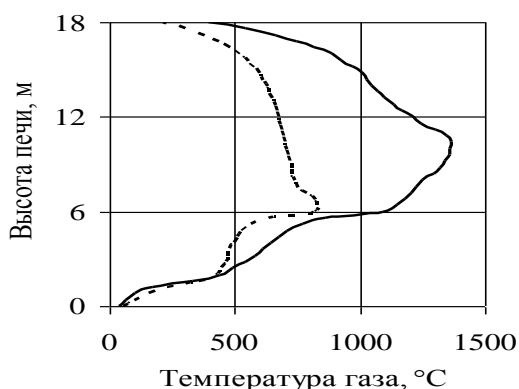


Рисунок 3 – Изменение средней температуры газа по высоте печи  
 — с учетом диффузии  
 - - - без учета диффузии

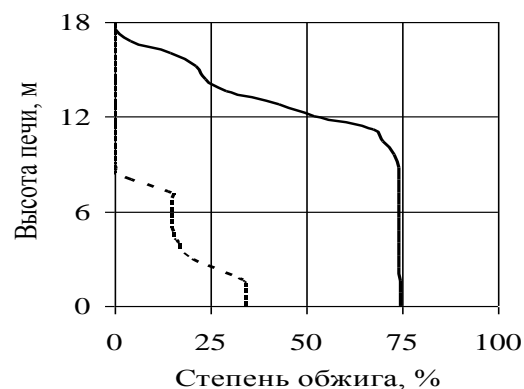


Рисунок 4 – Изменение степени обжига известняка по высоте печи  
 — с учетом диффузии  
 - - - без учета диффузии

Согласно расчетным и экспериментальным данным, установленный режим является неэффективным с точки зрения использования топлива, поскольку величина химического недожога достигает 27 %.

Наиболее близкие результаты к реальным показаниям работы печи имеет решение с учетом турбулентной диффузии газа, о чем свидетельствуют состав дымовых газов и конечная степень обжига (табл. 1).

Без учета переноса вещества на микроуровне процесс смесеобразования определяется только лишь конвекцией.

В результате, расчетное значение химического недожога составляет 64,4 %, средняя температура газов по высоте печи не превышает 900 °С, а конечная степень обжига известняка равна 34,1 %.

С учетом диффузии происходит перераспределение между расходными статьями теплового баланса печи. Снижается химический недожог, увеличивается полезная теп-

лота и потери теплоты с уходящими дымовыми газами. При этом, расчетные потери теплоты через изоляцию печи увеличиваются с 4 % до 8 %.

Анализ рис. 3–4 показывает значительную неравномерность хода печи. При средней температуре газа в сечении печи 500 °С наблюдается обжиг известняка, что свидетельствует у наличии очагов горения в верхних слоях материала.

Таким образом, турбулентная диффузия оказывает существенное влияние на характер тепло- и массообменных процессов в известково-обжиговой печи. Можно заключить, что учет данного фактора при моделировании является обязательным и существенно повышает точность модели.

### **Выводы**

Решена задача тепло- и массопереноса в шахтной известково-обжиговой печи на газообразном топливе с учетом особенностей движения газа в плотном слое кускового материала, конвективного и диффузионного переноса вещества в потоке, кинетики выгорания топлива, внешнего переноса теплоты конвекцией в потоке, теплофизических процессов внутри куска материала.

На основе расчетно-теоретических исследований установлено, что турбулентная диффузия газа оказывает существенное влияние на характер тепло- и массообменных процессов в известково-обжигowych печах. Учет данного фактора при моделировании повышает точность модели.

### **Литература**

1. Ляшенко Ю.П. Разработка и внедрение эффективных газодинамических и тепловых режимов шахтных печей для обжига известняка: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.14.04. – Днепропетровск, 1985, – 22 с.
2. Швыдкий Д.В. Разработка новой технологии получения металлургической извести в шахтных печах: Автореф. дис... канд.техн.наук: 05.16.02.: – Екатеринбург, 1997. – 19 с.
3. Розенгарт Ю.И., Федоров О.Г., Ляшенко Ю.П. и др. Движение газов в шахтных известково-обжигowych печах // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – №6. – С. 79–81.
4. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем.– Л.: Химия, 1968.– 512 с.
5. Федоров О.Г., Бойко В.Н., Сазонов С.И., Форись С.Н. Методика определения тепло-технологических показателей работы шахтных известково-обжигowych печей по результатам химического анализа уходящих газов // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. – Т. 9. – Днепропетровск: НМетАУ, – 2003. – С. 10–15.

УДК 51-74:669.162-669.181.4

Форись С.М., Федоров С.С., Федоров О.Г.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТУРБУЛЕНТНОЇ ДИФУЗІЇ ГАЗУ НА РОБОТУ ШАХТНИХ ВАПНЯНО-ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Розроблено математичну модель шахтної вапняно-випалювальної печі на газоподібному паливі. У моделі враховані особливості зовнішнього й внутрішнього теплообміну, газодинаміки, конвективного та дифузійного переносу речовини, горіння палива. Встановлено, що врахування турбулентної дифузії газу при моделюванні істотно впливає на точність моделі.