

**О ТЕПЛОПЕРЕНОСЕ В КАМЕРЕ
КОКСОВАНИЯ
СООБЩЕНИЕ 1: МОДЕЛЬ
ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

© 2011 Власов Г.А., д.т.н. (ОАО "АКХЗ"),
Барский В.Д., д.т.н., Рудницкий А.Г.
(УДХТУ)

Разработана математическая модель теплопереноса в коксуемой угольной загрузке, учитывающая влияние основных технологических факторов процесса коксования.

The mathematical model of carrying over of heat in the coked coal loading, considering agency of the basic technology factors of process of a carbonisation is developed.

Ключевые слова: камера коксования, изменение свойств загрузки, температурные поля, теплоперенос, моделирование.

.....
I. Постановка задачи

Количественное описание динамики температурных полей в промышленной камере коксования можно отнести к прямым способам анализа механизма протекающих в ней процессов пиролиза угольного вещества для определения путей воздействия на выход и качество образующихся продуктов. В связи с этим нами теплоперенос в камере коксования рассмотрен с точки зрения динамики образования и выхода парогазовых продуктов пиролиза (ППП) с максимальным учетом кинетики протекающих процессов [1]. При этом конкретная задача состояла в создании математической модели теплопереноса в коксуемой загрузке и исследовании на ней действия основных технологических факторов: продолжительности коксования, распределения температур по высоте греющей стенки, насыпной плотности шихты, степени ее измельчения и др.

II. Допущения

1. Внутренние источники тепла (теплоты химических и фазовых превращений), явления теплопереноса с ППП и тепловые эффекты фазовых переходов структурирования твердых остаточных продуктов пиролиза учитываются использованием эффективных оценок теплофизических свойств. Это позволяет в качестве обобщенного механизма различных видов теплопереноса (конвекции, радиации и теплопроводности), имеющих место в процессе коксования, использовать механизм теплопереноса теплопроводностью [2].

2. Из-за периодичности процесса коксования теплоперенос в загрузке не стационарный, так что температура загрузки меняется как по объему камеры, так и в течение всего периода коксования.

3. Теплоемкость загрузки как функция температуры определяется в виде средневзвешенной по участию в шихте воды и углей марок Г, Ж, К, ОС и Т их эффективных теплоемкостей. При этом теплоемкость воды определяется с учетом теплоты парообразования, а кинетика выхода водяных паров – как линейная функция температуры в интервале T_1 - T_2 .

4. Теплопроводность загрузки определяется как функция температуры, насыпной плотности шихты, ее гранулометрического состава и влажности, а также выхода летучих веществ.

5. Плотность загрузки определяется с изменением температуры в зависимости от насыпной плотности шихты, влажности, зольности, выхода летучих веществ и общей поперечной и вертикальной усадки загрузки.

6. Перемещение материала загрузки вдоль теплового потока и перемещение его по вертикали описываются как функции видимой реальной усадки [3].

III. Модель теплопереноса в загрузке

В соответствии с п. 1 допущений основное уравнение теплопереноса в загрузке представили в виде*

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\omega_x \frac{\partial T}{\partial x} - \omega_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1),$$

где x и y – расстояния соответственно по ширине и высоте камеры коксования, м;

τ – время, прошедшее от начала процесса, ч;

T – температура загрузки в точке с координатами x и y в любой момент времени τ , К;

ω_x, ω_y – скорости усадочных перемещений загрузки по направлениям x и y , м/ч;

ρ – плотность загрузки, кг/м³;

C_p – теплоемкость загрузки, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

λ – теплопроводность загрузки, $\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{К}}$.

При определении пространственных границ области исследования по горизонтали отсчет вели от вертикальной оси отопительного простенка, а по высоте камеры – от ее пода. В

результате получили границы сечения камеры, перпендикулярного греющей стенке в виде*:

$$x_2 \leq x \leq x_3 \quad (2),$$

$$y_0 \leq y \leq y_2. \quad (3).$$

При формулировке начальных условий стремились учесть температуру загружаемой в печь шихты $T_{ш}$, температуру греющей стенки в момент загрузки $T_{ст}(y)$, температуру на поду $T_{под}$ и в подсводовом пространстве $T_{п.с.}$ в это же время.

Обобщая существующие представления о характере «теплового удара» при загрузке шихты в камеру коксования, приняли экспоненциальный характер кривой падения температуры по мере удаления от источника внешней теплоты (стен, пода и верхней границы загрузки). При этом для привязки начальных условий к пространственным координатам использовали величины:

$\alpha_{ст}$, $\alpha_{п.с.}$ и $\alpha_{под}$ – коэффициенты, уравновешивающие масштабы изменения x и y вдоль тепловых потоков от греющей стенки, подсводового пространства и пода камеры, соответственно;

$d_{ст}$, $d_{п.с.}$ и $d_{под}$ – доли тепловых потоков в загрузку со стороны греющей стенки, подсвода и пода камеры, соответственно;

$T_{ст}(y)$ – температуру загрузки на границе с греющей стенкой, заданную как функция высоты камеры, К;

$T_{п.с.}$ и $T_{под}$ – температуры загрузки на границах с подсводовым пространством и подом камеры, соответственно, К;

* Обратим внимание на то, что в [4] λ помещена под оператор дифференцирования в виде $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$, что предполагает зависимость λ от координаты. В действительности коэффициент теплопроводности используется как функция температуры.

* y_0 – координата пода камеры; y_2 – координата верха загрузки; x_0 – координата оси греющего простенка; x_1 – координата стенки со стороны отопительного канала; x_2 – координата стенки со стороны камеры коксования; x_3 – координата оси камеры.

$T_{ш}$ – температура шихты в момент загрузки, К.

Положили, что температуры загрузки на границах с греющей стенкой, подсводом и подом равны температурам этих тел и сохраняются постоянными в течение всего периода коксования. Это дало условия сопряжения загрузки со стенкой, подсводом и подом в виде:

$$T_{cm}(y) = T_{cm}^{\Gamma}(y) \Big|_{\tau} = \text{const} \quad (4),$$

$$T_{п.с.} = T_{cm}^{\Gamma} \Big|_{\tau} = \text{const} \quad (5),$$

$$T_{нод} = T_{нод}^{\Gamma} \Big|_{\tau} = \text{const} \quad (6).$$

В уравнениях (4) – (6) $T_{cm}^{\Gamma}(y)$, $T_{п.с.}^{\Gamma}$ и $T_{нод}^{\Gamma}$ – температуры на границах с загрузкой.

Вместе с тем известно [5] и подтверждено нашими экспериментами: в момент загрузки температура греющей стенки падает на 150-250 К, что очевидно следует отнести также к подсводу и поду камеры. Поскольку этот факт не соответствует условиям (4) – (6), вместо них использовали:

$$\left. \begin{aligned} T_{cm}(y) &= T_{cm}^{\Gamma}(y) \\ T_{п.с.} &= T_{п.с.}^{\Gamma} \\ T_{нод} &= T_{нод}^{\Gamma} \end{aligned} \right\} = \begin{cases} a_0 + a_1\tau, & \text{если } 0 \leq \tau \leq \tau_1 & (7), \\ b_0 + b_1\tau, & \text{если } \tau_1 < \tau \leq \tau_2, & (8), \end{cases}$$

где a_0 – температура тела до загрузки, К;

b_0 – минимальная температура, до которой охладилось тело после загрузки, К;

τ_1 – время до достижения минимальной температуры тела, ч;

τ_2 – время от начала загрузки до возврата к исходной температуре, ч.

Значения a_0 и b_0 зависят от условий конкретного производства, тогда как, по нашим данным, $\tau_1 = 0,2$ ч; $\tau_2 = 0,5$ ч; $a_1 = -1250$ К/ч; $b_1 = 500$ К/ч.

Выражения (7) и (8) – это кусочно-линейное приближение кривых изменения температур греющей стенки, подсвода и свода: (7) описывает падение этих кривых после за-

грузки, а (8) – их возврат к исходным значениям.

При определении вкладов тепловых потоков от греющей стенки, свода и пода камеры в начальную температуру в любой точке загрузки приняли, что они пропорциональны температурам, которые могли бы быть достигнуты в выбранной точке за счет каждого потока отдельно.

IV. Теплофизические свойства загрузки

При определении теплофизических свойств загрузки полагаем, что вначале процесса она состоит из воды и сухой шихты. В связи с этим теплоемкость C_p и теплопроводность λ загрузки, изменяющиеся в ходе процесса, представляли как теплофизические свойства смеси (т.е. средними значениями) воды и сухой шихты изменяющегося состава.

Зависимость содержания воды в шихте от температуры представили выражениями:

$$W^P = \text{const (масс. доли)} \text{ при } t_0 \leq t < t_2 \quad (9),$$

$$W = W^P \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \text{ (масс. доли) при } t_1 \leq t < t_2, \quad (10),$$

где $t = T - 273$, а t_1 и t_2 определяют температурный интервал испарения воды.

Теплоемкость воды в интервале $t_0 \leq t_1 < t_2$ принимаем равной $C_{p,t}^W = 4,186 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

«Теплоемкость» воды в интервале ее испарения считали функцией теплоты парообразования $Q_{п.о.}$ и динамики этого процесса, описанного выражением (10), в результате получили некоторую условную величину*, по физическому смыслу эквивалентную теплоемкости:

* Условность этой величины состоит в том, что мы привязываем теплоту парообразования не к 373 К, а к некоторому интервалу T_1 - T_2 , центром которого является указанная температура. Поэтому при $T_1 = T_2$ уравнение (11) дает неопределенность.

$$C_{p,t}^{исп.} = \frac{Q_{п.о.}}{t_2 - t_1} \cdot W = \frac{Q_{п.о.}}{(t_2 - t_1)^2} \cdot W^P (t_2 - t), \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \quad (11).$$

Здесь $Q_{п.о.} = 4,186 \cdot 538,9$ – скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Состав шихты в процессе коксования изменяется вследствие испарения воды.

Пусть d_j^C – доля j -того угля в сухой шихте, готовой к коксованию ($j = 1, 2, \dots, 6$).

Тогда доля j -того компонента во влажной шихте определяется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } 0 \leq t < t_1 & \quad d_{jt}^C = d_j^C (1 - W^P) \\ \text{при } t_1 \leq t < t_2 & \quad d_{jt}^C = d_j^C (1 - W^P) \\ \text{при } t \geq t_2 & \quad d_{jt}^C = d_j^C \end{aligned} \right\} \quad (12).$$

Теплоемкость основных типов углей как функцию температуры искали по экспериментальным данным, представленным в [6]. При этом изменения значений индекса j соответствуют изменению типа угля в следующем порядке:

j	1	2	3	4	5	6
Марки	Д	Г	Ж	К	ОС	Т

Полученные нами и представленные ниже уравнения сопровождаются значениями оценок их точности – квадрата множественного коэффициента корреляции ρ^2 и остаточ-

ного среднеквадратичного отклонения $S_{ост}$ (здесь $\hat{t} = 0,001 \cdot t$):

$$C_{p,t}^1 = 4,19(0,27923 + 0,24853\hat{t} + 6,0234\hat{t}^2 - 9,3875\hat{t}^3 + 12,096\hat{t}^{10,8} - 9,0943\hat{t}^{12,3})$$

$$\rho^2 = 0,978361; S_{ост} = 0,030; \quad (13)$$

$$C_{p,t}^2 = 4,19(0,30806 - 0,42414\hat{t} + 3,6280\hat{t}^2 - 6,1048\hat{t}^3 + 8,5377\hat{t}^{11} - 5,6920\hat{t}^{13,8})$$

$$\rho^2 = 0,944110; S_{ост} = 0,4408; \quad (14)$$

$$C_{p,t}^3 = 4,19(0,26908 + 0,18137\hat{t} + 4,3228\hat{t}^2 - 19,303\hat{t}^4 + 9,0392\hat{t}^5 + 7,6457\hat{t}^7 - 1,98\hat{t}^{11,3})$$

$$\rho^2 = 0,979105; S_{ост} = 0,03148; \quad (15)$$

$$C_{p,t}^4 = 4,19(0,26068 + 0,14892\hat{t} + 4,1562\hat{t}^2 - 9,9482\hat{t}^4 + 8,3669\hat{t}^9 - 2,8052\hat{t}^{14,1})$$

$$\rho^2 = 0,965247; S_{ост} = 0,03821; \quad (16)$$

$$C_{p,t}^5 = 4,19(0,28822 - 0,038513\hat{t} + 4,3975\hat{t}^2 - 10,583\hat{t}^5 + 11,001\hat{t}^{10,4} - 4,8781\hat{t}^{14,2})$$

$$\rho^2 = 0,968905; S_{ост} = 0,03957; \quad (17)$$

$$C_{p,t}^6 = 4,19(0,26745 + 0,02657\hat{t} + 4,3554\hat{t}^3 - 21,601\hat{t}^5 + 15,425\hat{t}^6 + 3,6470\hat{t}^9 - 1,9354\hat{t}^{11,3})$$

$$\rho^2 = 0,983396; S_{ост} = 0,0287. \quad (18)$$

Эффективную теплоемкость шихты, как функцию температуры, получаем из уравнения:

$$C_{p,t} = C_{p,t}^W \cdot W^P + C_{p,t}^{исп.} + (1 - W^P) \sum_{j=1}^6 C_{p,t}^j \cdot d_j^C, \quad (19)$$

используя при этом (11) – (18).

Теплопроводность сухой загрузки описывали как функцию температуры по данным [7].

При этом исходили из гипотезы о том, что основным фактором, нарушающим сплошность теплопроводящего материала в пластическом и послепластическом состоянии, являются ПТП пиролиза газовых углей.

Для учета этого фактора введено соотношение $\frac{V^{(2)} \cdot d_2^C}{V^{III}}$, в котором:



$V^{(2)}$ – выход летучих из сухого угля марки Г, %;
 d_2^C – доля угля марки Г в сухой шихте;

V^{III} – выход летучих из сухой шихты, %.
 Полученная модель имеет вид:

$$\lambda_t^C = 4,19 \left[\left(0,320163 - 0,342195 \frac{V^{(2)} \cdot d_2^C}{V^{III}} \right) + \left(0,005897 - 0,002681 \frac{V^{(2)} \cdot d_2^C}{V^{III}} \right) \left(\frac{t-350}{100} \right)^4 \right], \frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}} \quad (20).$$

Теплопроводность влажной загрузки определяем с учетом данных [7] и используя выражения:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_t^C (1 + \delta^m \cdot W^P) \text{ в интервале } t_0 \leq t < t_1; \\ \lambda_t &= \lambda_t^C (1 + \delta^m \cdot W) \text{ в интервале } t_1 \leq t < t_2; \\ \lambda_t &= \lambda_t^C \text{ при } t \geq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (21).$$

Коэффициент δ^m рассматривали как функцию от насыпной плотности шихты и содержания в ней классов крупности 0-3 мм ($i = 1$), 3-6 мм ($i = 2$) и 6-10 мм ($i = 3$), имея ввиду, что $\delta^m = \sum_{i=1}^3 \delta^{(i)} \cdot d_i$, где d_i – доля i -того класса в ших-

те. Для описания $\delta^{(i)}$, как функции плотности шихты, получены зависимости и их математико-статистические оценки.

V. Плотность загрузки

Плотность загрузки ρ_t в процессе коксования изменяется пропорционально изменению ее массы и обратно пропорционально объему.

Для вычисления вертикальной (Δy_t) и поперечной (Δb_t) усадки получили выражение [3]

$$f(\tau_1) = Y \cdot \alpha_V \cdot \alpha_{П.С.} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{[b_1 + b_2 \cdot (\tau - \Delta) + b_3 \cdot (\tau - \Delta)^2] \cdot e^{-\left[b_1 \cdot (\tau - \Delta) + \frac{b_2 \cdot (\tau - \Delta)^2}{2} + \frac{b_3 \cdot (\tau - \Delta)^3}{3} \right]}}{\left[1 - \alpha_V \cdot \alpha_{П.С.} \cdot \left[1 - e^{-\left[b_1 \cdot (\tau - \Delta) + \frac{b_2 \cdot (\tau - \Delta)^2}{2} + \frac{b_3 \cdot (\tau - \Delta)^3}{3} \right]} \right] \right]} \cdot d\tau, \quad (22),$$

в котором:

$$\tau_0 = 0;$$

Y – высота угольной загрузки или ширина камеры;

Δ – запаздывание усадочных явлений относительно процесса пиролиза ОМУ и газовой выделення;

$\alpha_{П.С.}$ – критерий качества пластической массы;

$$\alpha_{П.С.} = \frac{\omega_{П.С.} \cdot \nu_{П.С.} \cdot V^{daf} \cdot d_1}{\nu_{П.С.}}; \quad (23),$$

где $\nu_{П.С.}$ – кинематическая вязкость пластического слоя;

$\omega_{П.С.}$ – толщина пластического слоя;

$\omega_{П.С.}$ – скорость продвижения пластического слоя*:

$$\omega_{П.С.} = \frac{b}{2 \cdot \beta \cdot (\tau_{П} - \Delta) \cdot 3600}; \quad (24)$$

α_V – коэффициент свободного объема:

$$\alpha_V = 1 - \frac{\rho_0 \cdot (1 - W^P)}{(1274 + 1426 \cdot A^d)}. \quad (25)$$

Из [8]** для $\Delta y_t = f(\tau_1)$ берем $Y = y$, $b_1 = 3857 \cdot 10^{-6}$, $b_2 = -5712 \cdot 10^{-6}$ и $b_3 = 1394 \cdot 10^{-6}$; для $\Delta b_t = f(\tau_1)$ берем $Y = b$, $b_1 = -3857 \cdot 10^{-6}$, $b_2 = 5712 \cdot 10^{-6}$ и $b_3 = 1394 \cdot 10^{-6}$.

Полученные уравнения использованы для построения имитационно-компьютерной модели расчета температурных полей в загрузке [1].

Существенно, что если в качестве признака перемещения по длине коксовой камеры использовать изменение насыпной плотности шихты [9], то, варьируя этот показатель в соответствии с распределением массы угольной загрузки с помощью полученной модели получаем трехмерное температурное поле.

Библиографический список

1. Власов Г.А. Научные основы и технология получения химических продуктов термодеструкции угля: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.1707. – Львов, 2005. – 440 с.

2. Барский В.Д. Элементы теории процесса слоевого коксования. 1. Физическая модель / Барский В.Д., Рубчевский В.Н. // Кокс и химия. – 1998. – № 2. – С.14-21.

3. Барский В.Д. Об усадочных явлениях в процессе слоевого коксования / Барский В.Д., Власов Г.А., Рудницкий А.Г., Чуищев В.М. // Углехимический журнал. – 2003. – № 5-6. – С.39-46.

4. Бабанин Б.И. К вопросу о разработке двумерной модели теплопереноса в коксовой печи / Бабанин Б.И., Шейн С.Ш., Маликов Ю.К. // Кокс и химия. – 1981. – № 11. – С.21-24.

5. Кирьяков Д.И. Исследование прогрева коксующего материала методом импульсного источника тепла / Кирьяков Д.И. // Кокс и химия. – 1991. – № 6. – С.12-14.

6. Агроскин А.А. Теплофизика твердого топлива / Агроскин А.А., Глейбман В.Б. – М: Недра, 1980. – 290 с.

7. Тайц Е.М. Свойства каменных углей и процесс образования кокса / Тайц Е.М. – М: Металлургиздат, 1961. – 299 с.

8. Барский В.Д. О кинетике образования парогазовых продуктов коксования угольных шихт. 1. Объемная скорость газовой выделенности / Барский В.Д., Власов Г.А., Чуищев В.Н., Рудницкий А.Г. // Углехимический журнал. – 2003. – № 1-2. – С.8-14.

9. Зублев Д.Г. Регулирование режима обогрева с учетом распределения угольной шихты в печных камерах / Зублев Д.Г., Барский В.Д., Власов Г.А. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 3. – С.35-39.

Рукопись поступила в редакцию 08.12.2010

* Приравнивали скорости продвижения фронта усадки $\omega_{ф.у.}$ и пластического слоя.

** Численные значения b_1 , b_2 и b_3 получены по результатам промышленного эксперимента на ОАО «АКХЗ».