

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КОКСОВАНИЯ

**Чистякова Т.Б., д-р техн. наук,
Бойкова О.Г., канд. техн. наук,
Бабина Е.В., Нестеров Д.М.**

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)*

Для потенциально-опасного производства, к классу которых относятся коксовая батарея, крайне важно своевременно отреагировать на каждое изменение состояния объекта, которое приводит к выходу параметра за пороговое ограничение. Это требует высокой квалификации работающего персонала, что вызывает необходимость создания тренажерно-обучающих комплексов. Имитационные модели как часть такого комплекса крайне важны при разработке алгоритмов обучения, т.к. многие задачи обучения сводятся к исследованию поведения объекта обучения во времени и выборе своевременных управлений для компенсации возмущений по переводу объекта в "безопасные" пороговые ограничения параметров [1].

Имитационная модель температурного режима коксования позволяет вырабатывать навыки управления объектом в различных режимах функционирования (оптимальном, эксплуатационном, аварийном) и исследовать протекание процесса как в режиме соответствующем регламентным ограничениям, так и при возникновении неполадок и нестандартных ситуаций без эксперимента на сложном дорогостоящем оборудовании, обеспечивает как составная часть тренажера реализацию различных стратегий обучения (оптимальное управление, устранение нестандартных ситуаций (НС), изучение причинно-следственных связей).

Имитационная модель позволяет описывать состояние объекта во всех режимах его функционирования; изменения состава сырья, производительности, параметров модели, качества продукции; осуществлять варьирование всех входных параметров объекта управления, а также коэффициентов модели для изменения установок тренажера; управление воздействием для ликвидации нестандартной ситуации.

Математическая модель (ММ), позволяющая исследовать температурный режим коксования с точки зрения равномерности прогрева загрузки коксующейся шихты и прогнозирования тепловых свойств кокса, описывается системой уравнений [2]:

$$\frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\tau = 0; x = 0: T_{\text{ш}}^{\text{он}} = T_{\text{ш}}^{\text{н}} \quad (2)$$

$$\tau = 0; x = L/2: T_{\text{ш}}^{\text{сг}} = T_{\text{ог}}^{\text{к}} - \frac{1}{e^{\text{AKF}_{\text{сг}}}} (T_{\text{ог}}^{\text{н}} + T_{\text{ш}}^{\text{н}}) \quad (3)$$

$$K = \frac{\alpha_{\text{ш}}^{\text{сг}} \cdot \alpha_{\text{ог}} \cdot \lambda_{\text{сг}}}{\alpha_{\text{ш}}^{\text{сг}} \cdot \lambda_{\text{сг}}} + \alpha_{\text{ог}} \cdot \lambda_{\text{сг}} + \delta_{\text{сг}} \cdot \alpha_{\text{ш}} \cdot \alpha_{\text{ог}} \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{G_{\text{ог}} \cdot C_{\text{ог}}} + \frac{1}{G_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}}^{\text{сг}}} \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{ш}}^{\text{сг}} = \text{const}; C_{\text{ш}}^{\text{сг}} = \text{const} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_{\text{п}} \cdot \gamma_{\text{к}}} \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{ш}} \approx \frac{1}{a_0^1 + a_1^1 \cdot (T_{\text{ш}}^{\text{он}})^{a_2^1}} \quad (8)$$

$$C_{\text{пш}} = a_0^2 + a_1^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}} + a_2^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}^2} + a_3^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}^3} \quad (9)$$

$$\alpha_{\text{ш}} = \frac{1}{a_0^1 + a_1^1 \cdot (T_{\text{ш}}^{\text{он}})^{a_2^1}} \cdot \frac{1}{a_0^2 + a_1^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}} + a_2^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}^2} + a_3^2 \cdot T_{\text{ш}}^{\text{он}^3}} \cdot \frac{1}{\gamma_{\text{кш}}} \quad (10)$$

где α - коэффициент температуропроводности; λ - теплопроводность; K - коэффициент теплопередачи греющей стенки; τ - время коксования; x - расстояние точки от оси камеры; L - ширина камеры; $C_{\text{п}}$ - удельная теплоемкость при постоянном давлении; $\gamma_{\text{к}}$ - кажущийся удельный вес тела; $\gamma_{\text{кш}}$ - кажущийся удельный вес шихты; $T_{\text{ш}}$ - температура в любой точке коксуемой шихты; $F_{\text{сг}}$ - площадь греющей стенки; $\alpha_{\text{ог}}$ - коэффициент температуропроводности отопительного газа; $\lambda_{\text{сг}}$ - теплопроводность стенки; $\delta_{\text{сг}}$ - толщина стенки; $\alpha_{\text{ш}}$ - коэффициент температуропроводности шихты; $G_{\text{ог}}$ - расход отопительного газа; $C_{\text{ог}}$ - теплоемкость отопительного газа; $G_{\text{ш}}$ - расход шихты; $T_{\text{ш}}^{\text{сг}}$ - температура шихты у стенки; $T_{\text{ш}}^{\text{он}}$ - температура шихты в осевой плоскости; $T_{\text{ш}}^{\text{н}}$ - начальная температура шихты; $T_{\text{ог}}^{\text{н}}$ - начальная температура отопительного газа; $T_{\text{ог}}^{\text{к}}$ - конечная температура отопительного газа; $\alpha_{\text{ш}}^{\text{сг}}$ - коэффициент температуропроводности шихты у стенки; $C_{\text{ш}}^{\text{сг}}$ - теплоемкость шихты у стенки.

Решение (1) при условиях (2) - (6), позволяет определить время проведения процесса при заданных расходах шихты и отопительного газа и конструктивных характеристиках печи (ширина камеры, толщина стенки, материал, из которого изготовлена стенка) и температуру кокса при окончании процесса коксования, а также получить оценки тепловых свойств кокса по зависимостям (8)-(10).

Формализованное представление ММ может быть описано следующим набором:

$$Y_M = f(X_M, U_M, A_M).$$

Вектор входных параметров

$$X_M = \{X_1, X_2\},$$

где X_1 и X_2 – характеристики шихты и отопительного газа соответственно.

$$X_1 = \{T_{ш}^H, G_{ш}, C_{ш}^{ct}, \alpha_{ш}^{ct}, \gamma_{кш}\}$$

$$X_2 = \{C_{ог}, \alpha_{ог}, T_{ог}^H, T_{ог}^K\}$$

Вектор параметров и коэффициентов модели,

$$A_M = \{A_1, A_2\},$$

где A_1 и A_2 – характеристики печи и шихты соответственно.

$$A_1 = \{K, F_{ct}, L, \lambda_{ct}, \delta_{ct}\}$$

$$A_2 = \{\alpha_{ш}\}$$

Вектор выходных параметров:

$$Y_M = \{\lambda, C_p, \alpha, \tau\}$$

Вектором управляющего воздействия данной модели U_M является расход отопительного газа $G_{ог}$.

$$U_M = \{G_{ог}\}$$

Структура системы управления температурным режимом коксования с помощью разработанной имитационной модели представлена на рис.1.

Математическая модель (ММ) описывает поведение системы при различных условиях проведения эксперимента.

База данных технологического процесса (БД ТП) – база данных, содержащая характеристики всех переменных, описывающих температурный режим коксования. Ведение этой базы данных позволит упростить ввод характеристик сырья.

База знаний нештатных ситуаций (БЗ НС) содержит описания основных нештатных ситуаций, возможных при управлении объектом и рекомендации по их устранению.

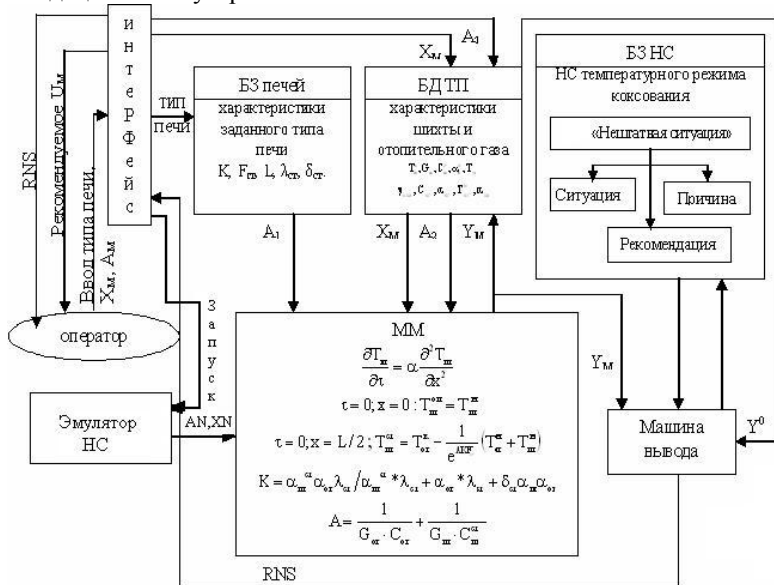


Рис. 1 Структура системы управления, где ММ – математическая модель; БДТП – база данных технологического процесса; БЗ НС – база знаний нештатных ситуаций; БЗ печей – база знаний печей; УСО – устройство связи с объектом; RNS – вектор рекомендаций по управлению в НС; Эмулятор НС – эмулятор нештатных ситуаций.

База знаний печей (БЗ печей) содержит описание конструктивных характеристик коксовых печей. Ведение этой базы данных позволяет упростить ввод характеристик коксовых печей, представляет возможность загрузки информации о настроечных коэффициентах модели (вектор A_1) из таблиц.

Вектор рекомендаций по управлению в нештатных ситуациях (RNS) представляет собой рекомендации оператору коксовой батареи для действий при возникновении нештатных ситуаций.

Формализованное представление нештатных ситуаций может быть представлено в виде вектора:

$$NS = \{Sit, Prich, Sov\},$$

где Sit – описание HC, Prich = $\{A_1, A_2, X_1, X_2\}$ – причина ситуации, которая может быть задана изменением входных и настроечных переменных модели, Sov – совет оператору с рекомендациями о действиях в HC.

При программной реализации для решения математической модели использован метод сеток. При решении задачи этим методом, вводится сетка в области изменения аргументов (t – время процесса, x – расстояние от стенки греющей камеры). Затем вводится нормирующий множитель для перехода к безразмерной температуре:

$$\theta = \frac{(T - T_0)}{(T_{\max} - T_{\min})},$$

где $T_0 = T_{\text{ш}}^{\text{н}}$ – температуре загружаемой шихты;

T_{\max} – температура готового кокса.

$T_{\min} = T_0$.

T_{\max} определяется из формулы:

$$\lambda \approx 1/7.384 - 0.519(T_{\max})^{0.374},$$

где λ - коэффициент теплопроводности готового кокса (того кокса, который необходимо получить).

Далее вводится нормирующий множитель по X: $X1 = X/(L/2)$, где L – ширина камеры печи. На следующем шаге необходимо задать количество узлов сетки. Для этого задается время протекания процесса t в диапазоне от 13 до 27 часов, затем задается шаг по времени – τ и по x – h, что позволяет определить соответственно количество временных слоев – n и слоев шихты – k, для которых будет производиться расчет. После этого формируется система уравнений для n+1 временного слоя:

$$A_k \theta_{k-1}^{n+1} - (1 + A_k + A_{k+1})\theta_k^{n+1} + A_{k+1}\theta_{k+1}^{n+1} = \theta_k^n / \tau$$

$$A_k = \sigma a_k / h^2$$

$$k = 1, 2, \dots, k-1$$

$$\sigma = 0.5$$

$$a_k = 0.5(\alpha_{k-1}^{n+1} + \alpha_k^{n+1})$$

$$\alpha_k^{n+1} = 1 / \left(7.834 - 0.519 \cdot \left(\frac{(T_{\text{ш}}^{\text{он}} - T_0)}{(T_{\max} - T_{\min})} \right)^{0.374} \right) \cdot (0.145 + 0.009 \cdot \left(\frac{(T_{\text{ш}}^{\text{он}} - T_0)}{(T_{\max} - T_{\min})} \right) - 1.362 \cdot e^{-6} \cdot \left(\frac{(T_{\text{ш}}^{\text{он}} - T_0)}{(T_{\max} - T_{\min})} \right)^2 + 8.227 \cdot e^{-10} \cdot \left(\frac{(T_{\text{ш}}^{\text{он}} - T_0)}{(T_{\max} - T_{\min})} \right)^3) \cdot \gamma_{\text{кш}}$$

где $\gamma_{\text{кш}}$ - кажущийся удельный вес тела, кг/м³;

$$T_{ш}^{оп} = \frac{a}{(1 + e^{b-ct(n+1)})^{1/d}}, a = 1077.856, b = 8.797, c = 0.716, d = 2.687.$$

Полученная система алгебраических уравнений решается методом прогонки. На каждом последующем шаге происходит перерасчет коэффициента температуропроводности шихты α .

Для моделирования нештатных ситуаций систематизированы типовые нарушения (ситуации) и причины, их вызывающие. Нештатные ситуации подразделяются по типу нарушаемых пороговых ограничений параметров на: эксплуатационные (нарушения оптимальных, допустимых эксплуатационных норм) и аварийные (нарушения аварийных, предаварийных норм).

Нештатные ситуации, связанные с температурным режимом коксования частично описаны в [3,4]. На расход отопительного газа в процессе коксования накладываются ограничения, связанные с особенностями и сроком эксплуатации теплотехнических агрегатов. Поэтому к разряду нештатных ситуаций в данной модели могут быть отнесены решения, оптимальные с точки зрения свойств кокса, но выходящие за рамки ограничений, накладываемых на $G_{ор}$. Кроме того, к нештатным ситуациям может быть отнесена ситуация, когда при заданных векторах X, A недостижима возможность получения кокса, с заданными тепловыми свойствами Y_0 .

Опираясь на все вышесказанное, можно утверждать, что с помощью разработанной имитационной модели сотрудники предприятия могут оперативно производить анализ данных, смоделировав процесс за считанные минуты, и принимать решения по управлению процессом до его запуска на реальной установке, что приведет к повышению эффективности процесса в целом.

Список литературы

1. Чистякова Т.Б. Интеллектуальные тренажерно-обучающие системы: Дисс. ... док. техн. наук – СПб, 2000.
2. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Бабина Е.В. Моделирование тепловых свойств кокса // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17: Сб. трудов Международ. науч. конф. – Кострома: Изд-во КГУ, 2004. - Т.1.
3. Бойкова О.Г. Гибридная экспертная система для управления процессами коксования: Дисс. ... канд. техн. наук – СПб, 2000.
4. Блохина О.Ф. Оперативное управление коксохимической батареей. Дисс. ... канд. техн. наук – СПб, 2003.