

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЙ

Бессараб В.И., Червинский В.В., Попов В.А.

Донецкий национальный технический университет,
кафедра автоматизации и телекоммуникаций

E-mail: bvi@fcita.dn.ua

Abstract

Bessarab V.I., Tschervinsky V.V., Popov V.A. The model of a coal gasification process in a state space parameters. In the given article the expediency of constructing of the linear pattern of a manufacturing process of a coal gasification on installation with circulating fluid layer is substantiated. The grounding of a linearization of a non-linear mathematical model of installation and simplification, gated in is reduced at a linearization. The skeleton diagrams of separate plants of control are designed. The mathematical models of plants of control in a state space are designed.

Построение САУ технологического процесса газификации бурого угля полукоксованием на установках с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) предполагает наличие математической модели такой установки. В качестве объекта моделирования принята типовая схема установки, приведенная в [1]. Подобные установки исследуются в Научно-техническом центре угольных энерготехнологий НАН Украины и Минэнерго Украины и в Донецком национальном техническом университете. Для разрабатываемой системы управления математическая модель установки может быть представлена либо в пространстве состояний, либо как отношения вход/выход.

Рассмотренная в [2] математическая модель технологического процесса как непрерывной динамической системы, основанная на линейных и нелинейных дифференциальных уравнениях, является сложной, нелинейной, рассматривающей влияние многих параметров, которые при построении САУ могут рассматриваться как возмущающие. Данные положения не позволяют использовать имеющуюся математическую модель для построения САУ и поэтому предлагается построить упрощенную линейную математическую модель процесса, введя следующие предположения и упрощения:

1) Предполагается, что основной режим работы установки – равновесный стационарный и задача синтезируемой САУ – поддержание этого режима при воздействии возмущающих воздействий;

2) В состав угля и рецикла, поступающих в топку, входят только углерод и зола;

3) Процесс сжигания топлива не зависит от кратности рециркуляции топлива;

4) Для рассматриваемой рабочей зоны принимаем постоянными следующие параметры: плотность и порозность кипящего слоя, скорость горения топлива.

5) Подача первичного и вторичного воздуха осуществляется с постоянным соотношением и при построении математической модели объекта управления 1 – Топки учитывается подача суммарного воздуха;

6) Энтальпии веществ, участвующих в балансе, для всего рабочего диапазона температур топки являются постоянными величинами.

Поскольку поддержка стационарного режима работы установки предполагает малые отклонения параметров от их стационарных значений, имеет смысл применить линейную аппроксимацию для линеаризации нелинейных элементов, входящих в состав установки. Рас-

смотрим некоторый элемент, характеризующийся реакцией $y(t)$ на входное воздействие $x(t)$. Связь между переменными определяется уравнением [3]:

$$y(t) = g[x(t)] \quad (1)$$

где $g[x(t)]$ показывает, что $y(t)$ является функцией $x(t)$. Обозначим координату рабочей точки через x_0 . Непрерывную функцию в окрестности рабочей точки можно разложить в ряд Тейлора:

$$y = g(x) = g(x_0) + \left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)}{1!} + \left. \frac{d^2g}{dx^2} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots \quad (2)$$

Значение производной $\left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0}$ характеризует наклон касательной к кривой функции

$y=g(x)$ в рабочей точке x_0 . Эта касательная служит аппроксимацией исходной кривой в случае малых значений $(x - x_0)$, т.е. отклонения от рабочей точки. В таком предположении можно записать:

$$y = g(x) = g(x_0) + \left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_0} (x - x_0) = y_0 + m(x - x_0), \quad (3)$$

где m - тангенс угла наклона касательной к кривой в рабочей точке. Окончательно уравнение (3) можно записать в виде

$$(y - y_0) = m(x - x_0),$$

или

$$\Delta y = m \Delta x. \quad (4)$$

Применим рассмотренный метод линеаризации для установки по газификации угля с ЦКС. В качестве объектов рассмотрим следующие технологические модули:

ТМ1 (кипящий слой) и ТМ2 (пневмотранспорт) будем рассматривать как один объект управления 1 (ОУ 1) – Топка, выделив при этом следующие параметры:

Управляющие независимые входы:

$G_{КПВ}$ – подача рециркулирующего КЗО в смеси с полукоксом, кг/с; G_B – суммарная подача первичного и вторичного воздуха, кг/с; $G_{У2}$ – подача угля в кипящий слой, кг/с.

Контролируемые выходы:

$T_{СЛ}$ – температура кипящего слоя, °С; $G_{КЗП2}$ – выход КЗО, продуктов сгорания, угля и золы на выходе зоны пневмотранспорта, кг/с; $T_{КЗП2}$ – температура КЗО, продуктов сгорания, угля и золы на выходе зоны пневмотранспорта, °С;

$H_{СЛ}$ – высота плотной фазы кипящего слоя.

Будем считать, что в топку поступает A кг/с углерода; расход золы в топку составляет B кг/с; расход известняка в топку равен C кг/с; унос углерода в потоке твердых частиц на выходе топки составляет D кг/с.

На основе материального баланса твердых частиц, переносимых по зонам объекта 1, выделяем следующие уравнения перемещения материальных потоков твердых веществ в объекте в статическом режиме [4].

$$M_{СЛ} = \int_0^t (G_{КПВ} + G_V - G_{ДЗ} - G_{ВН}^{ТБ}) dt \quad (5)$$

$$\Delta P = k_{PB} G_B + k_{PM} M_{СЛ} \quad (6)$$

$$H_{сл} = \frac{M_{сл}}{\rho_{сл} \cdot S_{сл}} \tag{7}$$

$$A = (1 - A_y^p)G_y + (1 - A_{кпв}^p)G_{кпв} \tag{8}$$

$$P_{сл} = \frac{g \cdot M_{сл}}{S_{сл}} \tag{9}$$

$$G_{ун}^{ТВ} = k_{ун} \cdot \Delta P \tag{10}$$

$$G_B = G_{B1} + G_{B2} \tag{11}$$

На основе теплового баланса топки выделим уравнения зависимости температуры слоя и температуры на выходе топки.

$$T_{сл} = \int_0^t \left(\frac{Q_c}{c_c} (A - D) - \frac{I_{ун}}{c_{ун}} G_{кзп2} - \frac{I_{дз}}{c_{дз}} G_{дз} + \frac{I_y}{c_y} G_y + \frac{I_{кпв}}{c_{кп}} G_{кпв} + \frac{I_B}{c_B} G_B - T_{сл} \right) dt \tag{12}$$

Для топок с ЦКС характерно движение газа в режиме, близком к идеальному вытеснению, а твердых частиц – к полному смешению [2]. Поэтому динамическая модель ОУ1 строится на базе приведенных выше статических уравнений и обобщенных передаточных функций для аппаратов идеального вытеснения [5]:

$$W(p) = e^{-p\bar{t}} \tag{13}$$

и для аппаратов идеального смешения:

$$W(p) = \frac{1}{1 + \bar{t}p} \tag{14}$$

где \bar{t} - время, равное среднему времени пребывания частиц в аппарате.

ОУ1 характеризуется следующими постоянными времени: T_{11} – постоянная времени, характеризующая продолжительность пребывания частиц угля и полукокса в кипящем слое, с; T_{12} – постоянная времени, характеризующая запаздывание прохождения газообразных продуктов через кипящий слой, с; $T_{13} = T_{11} + T_{21}$; T_{21} - постоянная времени, характеризующая продолжительность пребывания частиц угля и полукокса в участке пневмотранспорта, с; T_{22} - постоянная времени, характеризующая запаздывание прохождения газообразных продуктов через участок пневмотранспорта, с; $T_{14} = T_{12} + T_{22}$;

Структурная схема ОУ1 – топки как многосвязного объекта приведена на рис. 1.

Полученную передаточную функцию ОУ1 представим в пространстве состояний. Тогда объект управления описывается дифференциальным уравнением состояния [3]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{15}$$

и уравнением выхода:

$$y = Cx + Du \tag{16}$$

где x – вектор состояния,

y – совокупность выходных сигналов,

u – совокупность входных сигналов,

Описание ОУ1 в пространстве состояний следующее:

$$x = \begin{bmatrix} M_{сл} \\ T_{сл} \\ G_{ун}^T \\ G_{ун}^r \\ T_{кзп2} \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} G_y \\ G_{кпв} \\ G_B \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} G_{кзп2} \\ T_{кзп2} \\ H_{сл} \end{bmatrix};$$

$M_{сл}$ – масса кипящего слоя;

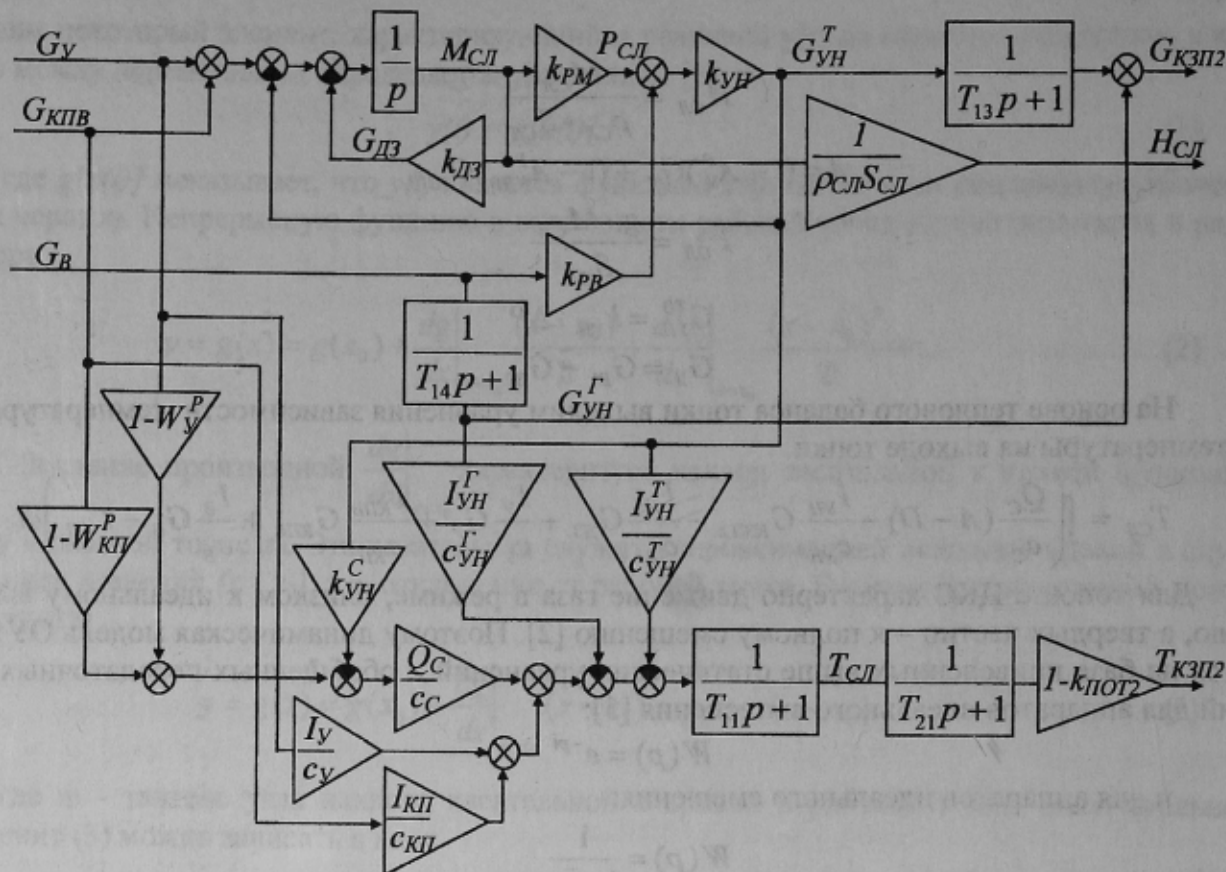


Рисунок 1 – Структурная схема ОУ 1 - топки

$T_{СЛ}$ – температура кипящего слоя;

$G_{УН}^T$ – расход потока твердых частиц на выходе зоны пневмотранспорта, кг/с;

$G_{УН}^Г$ – расход потока газообразных продуктов сгорания на выходе зоны пневмотранспорта, кг/с;

$$A = \begin{bmatrix} -k_{ДЗ} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{11}} & -\frac{1}{T_{11}} \left(\frac{k_{УН}^T \cdot Q_C}{c_C} - \frac{I_{УН}^T}{c_{УН}^T} \right) & -\frac{I_{УН}^Г}{T_{11} \cdot c_{УН}^Г} & \frac{1 - k_{ПОТ12}}{T_{13}} \\ \frac{k_{УН} \cdot k_{PM}}{T_{13}} & 0 & -\frac{1}{T_{13}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{14}} & -\frac{1}{T_{13}} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \left(\frac{I_Y}{c_Y \cdot T_{11}} + \frac{Q_C(1 - W_V^P)}{c_C \cdot T_{11}} \right) & \left(\frac{I_{КП}}{c_{КП} \cdot T_{11}} + \frac{Q_C(1 - W_{КП}^P)}{c_C \cdot T_{11}} \right) & \frac{I_B}{c_B \cdot T_{11}} \\ 0 & 0 & \frac{k_{УН} \cdot k_{PM}}{T_{13}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{14}} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\rho_{сл} \cdot S_{сл}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Объект управления 2 (ОУ2) – технологический модуль 3 – зона сепарации. На основе полученной в [1] математической модели ТМ3 строится линейная модель ОУ2 – зоны сепарации.

Управляющие независимые входы:

$G_{УН}^T$ – подача потока твердых частиц из зоны пневмотранспорта, кг/с; $T_{КЗП2}$ – температура потока КЗО, продуктов сгорания и золы на входе участка сепарации, °С.

Контролируемые выходы:

$G_{КЗО}$, $T_{КЗО}$ – расход и температура КЗО в циклоне грубой очистки, кг/с, °С.

ОУ2 характеризуется следующими постоянными времени: T_{31} – постоянная времени, характеризующая продолжительность пребывания частиц КЗО в циклоне грубой очистки, с; T_{35} – постоянная времени, характеризующая запаздывание, вносимое трактом подачи КЗО на выходе зоны сепарации, с.

Структурная схема ОУ2 как многосвязного объекта приведена на рис. 2.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: $k_{пот3}$ – коэффициент тепловых потерь на участке сепарации; $k_{лз}$ – коэффициент выхода летучей золы; $T_3 = T_{31} + T_{35}$.

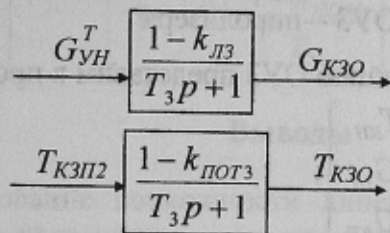


Рисунок 2 – Структурная схема ОУ2 – зоны сепарации

Полученную передаточную функцию ОУ2 представим в пространстве состояний.

$$x = \begin{bmatrix} G_{КЗО} \\ T_{КЗО} \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} G_{УН}^T \\ T_{КЗП2} \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} G_{КЗО} \\ T_{КЗО} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_3} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1 - k_{лз}}{T_3} & 0 \\ 0 & \frac{1 - k_{пот3}}{T_3} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

Объект управления 3 (ОУ3) – технологический модуль 4 – пиролизер. Полученная в [1] математическая модель ТМ4 является нелинейной. Линеаризацию уравнений, описывающих работу пиролизера с точки зрения управления выполнена по следующему принципу: для каждого входного управляющего параметра задавался рабочий диапазон изменения параметра в соответствии с отклонениями, допустимыми в технологическом процессе. Фиксируя по очереди все управляющие параметры, снимались зависимости изменения выходного параметра от одного из входных параметров, на основе которых получены линейные зависимости отклонения выходной величины от отклонения входной. Далее полученные зависимости суммировались по принципу суперпозиций.

Для ОУ3 – пиролизера выделены следующие параметры:

Управляющие независимые входы:

G_{K3O} , T_{K3O} – подача и температура КЗО на входе пиролизера, кг/с, °С; G_{y1} , – подача угля на входе пиролизера, кг/с.

Управляемые выходы:

$G_{KП}$, $T_{KП}$ – расход и температура смеси КЗО и полукокса на выходе пиролизера, кг/с, °С; $G_{ПГ}$ – выход пиролизного газа, кг/с.

T_4 – постоянная времени, характеризующая продолжительность пребывания материальных потоков при прохождении через пиролизер, с.

Структурная схема ОУЗ – пиролизера как многосвязного объекта приведена на рис. 4.

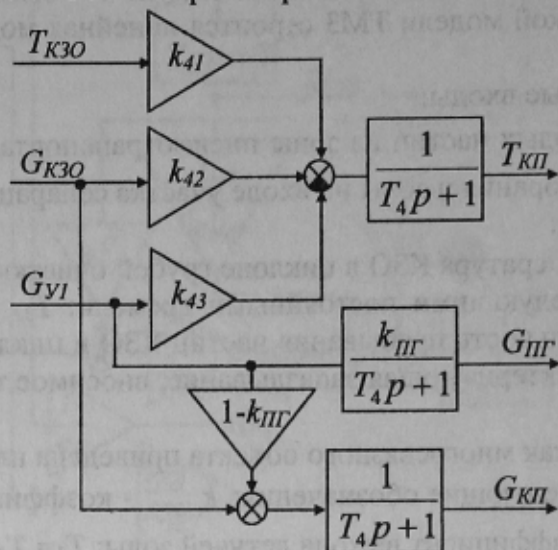


Рисунок 4 - Структурная схема ОУЗ – пиролизера

Полученную передаточную функцию ОУЗ представим в пространстве состояний.

$$x = \begin{bmatrix} T_{KП} \\ G_{ПГ} \\ G_{KП} \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} T_{K3O} \\ G_{K3O} \\ G_{y1} \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} T_{KП} \\ G_{ПГ} \\ G_{KП} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_4} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_4} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{k_{41}}{T_4} & \frac{k_{42}}{T_4} & -\frac{k_{42}}{T_4} \\ 0 & -\frac{1}{T_4} & \frac{k_{ПГ}}{T_4} \\ 0 & 0 & \frac{1-k_{ПГ}}{T_4} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

Объект управления 4 – технологический модуль 5 – тракт возврата КЗО. На основе полученной в [1] математической модели ТМ5 строится линейная модель ОУ4 – тракта возврата КЗО.

Управляющие независимые входы:

$G_{KП}$ – подача смеси КЗО и полукокса, кг/с; $G_{KП1}$ – отвод полукокса на энергетические нужды, кг/с;

Контролируемые выходы:

$G_{KПВ}$ – расход КЗО и полукокса на выходе тракта возврата КЗО, кг/с.

ОУ4 характеризуется следующими постоянными времени: T_{51} - постоянная времени, характеризующая продолжительность прохождения смеси КЗО и полукокса через тракт возврата КЗО, с; T_{52} – постоянная времени, характеризующая изменение выходного потока при изменении расхода отводимого полукокса, с.

Структурная схема ОУ4 как многосвязного объекта приведена на рис. 4.

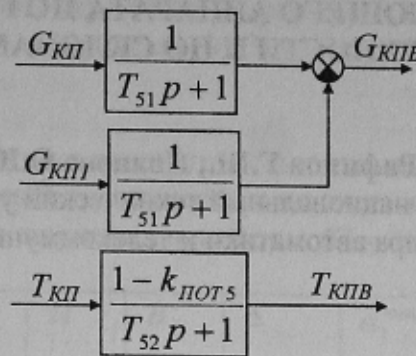


Рисунок 4 – Структурная схема ОУ4 – тракта возврата КЗО

Полученную передаточную функцию ОУ4 представим в пространстве состояний.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ T_{KПВ} \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} G_{KП} \\ G_{KПІ} \\ T_{KП} \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} G_{KПВ} \\ T_{KПВ} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{51}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{52}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{51}} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{51}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{52}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - k_{ПОР}s}{T_{51}} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

Выводы

1. Приведено обоснование возможности линеаризации нелинейной математической модели установки с ЦКС и сформулированы упрощения, введенные при линеаризации;
2. Предложена линейная модель технологического процесса газификации угля полукоксованием на установках с ЦКС;
3. Разработаны структурные схемы моделей отдельных объектов управления;
4. Разработаны математические модели объектов управления в пространстве параметров состояний.

Список литературы

1. Балансовые термодинамические расчеты процессов горения и газификации углей в ЦКС под давлением / Дудник А. Н., Майстренко А. Ю., Онищенко С. В., Топал А. Н. // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1999. - №6. с. 19 – 29.
2. Бессараб В. И., Мокрый Г. В., Червинский В. В. Разработка структуры математической модели процесса газификации угля на установках с циркулирующим кипящим слоем. – Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск : - Донецьк: ДонНТУ, 2003. - №59. с. 16 - 23.
3. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002. – 832 с.
4. Радованович М. Сжигание топлива в псевдоожиженном слое: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с. -
5. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. - 400 с.