УДК 681.5.037.4

К.М. БОТВИНЬЕВ
Норильский индустриальный институт

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СЕРЫ ИЗ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ АВТОГЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

При производстве цветных металлов из сульфидных руд широко используется плавка в печах Ванюкова. При этом происходит выделение газов с высокой концентрацией диоксида серы. С целью уменьшения выбросов диоксида серы в атмосферу используются различные методы утилизации серы, из которых наиболее эффективным является Клаус-процесс. Суть процесса заключается в очистке газа от серы. При оптимальном управлении процессом степень извлечения серы достигает 80 %. Однако существующая система управления позволяет извлечь не более 70 % серы, так как отсутствует адекватная модель процесса.

В статье разрабатывается система автоматического управления, в которой используется нечеткая модель процесса восстановления диоксида серы.

Vanyukov's process of extraction is an autogenous method for sulfide concentrates of nonferrous metals. Melting is accomplished in a specially designed furnace and is accompanied by generating sulfur dioxide bearing off-gases. Different sulfur removal methods are used to reduce sulfur dioxide emissions into the atmosphere, of which the Claus process is the most significant process of gas desulfurizing. The efficiency of a typical Claus process can achieve as much as 80% of sulfur recovery. However, the existing control system enables achievement of not more than 60-70% efficiency due to lack of an adequate process model. The paper presents an automated control system which is based on a fuzzy model of sulfur dioxide recovery.

Технологический цикл очистки диоксида серы может быть подразделен на следующие стадии: восстановление диоксида серы, содержащегося в газе, природным газом в реакторе-генераторе; химические взаимодействия на катализаторе серосодержащих компонентов технологического газа с получением элементарной серы в аппарате Клауса; конденсация серы и высокотемпературный дожиг в печи токсичных составляющих, оставшихся в газовой смеси, с последующим охлаждением газа.

Основным агрегатом, определяющим оптимальное течение реакции Клауса и тем самым увеличивающим степень извлечения серы, является реактор-генератор. В нем происходит основная реакция восстановления серы

$$SO_2+CH_4 \leftrightarrow S;\ H_2S;\ H_2;\ H_2O;\ CO;\ CO_2;\ COS. \quad (1)$$

Между продуктами реакции (1) возможно множество вариантов взаимодействия, вплоть до установления равновесия*:

$$2H_2S + SO_2 \leftrightarrow 3S + 2H_2O; \quad (2)$$

$$COS + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2S. \quad (3)$$

Чем выше температура, тем быстрее достигается равновесие смеси. Чтобы природный газ достаточно прореагировал по реакции (1) за время пребывания в реакторе-генераторе, требуется температура не менее 1200 ºС. Поскольку реакция (1) не дает необходимого количества тепла, перед восстановлением отходящие газы разбавляют воздухом и техническим кислородом. Это обеспечивает требуемую температуру за счет реакции горения метана

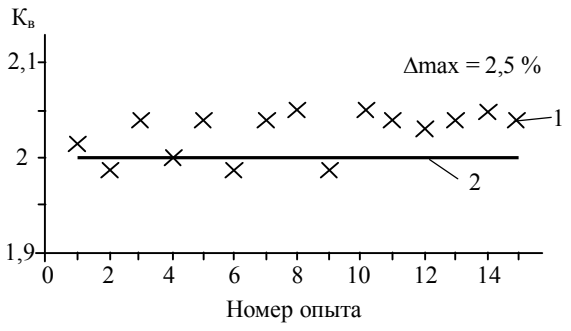


Рис.1. Расчетные (1) и экспериментальные (2) данные $K_в$

* *Черепанов К.А.* Производство металлов за Полярным кругом: Технологическое пособие / К.А.Черепанов, Г.И.Черныш. Норильск: Библиотека «Норильского никеля», 2007. 296 с.

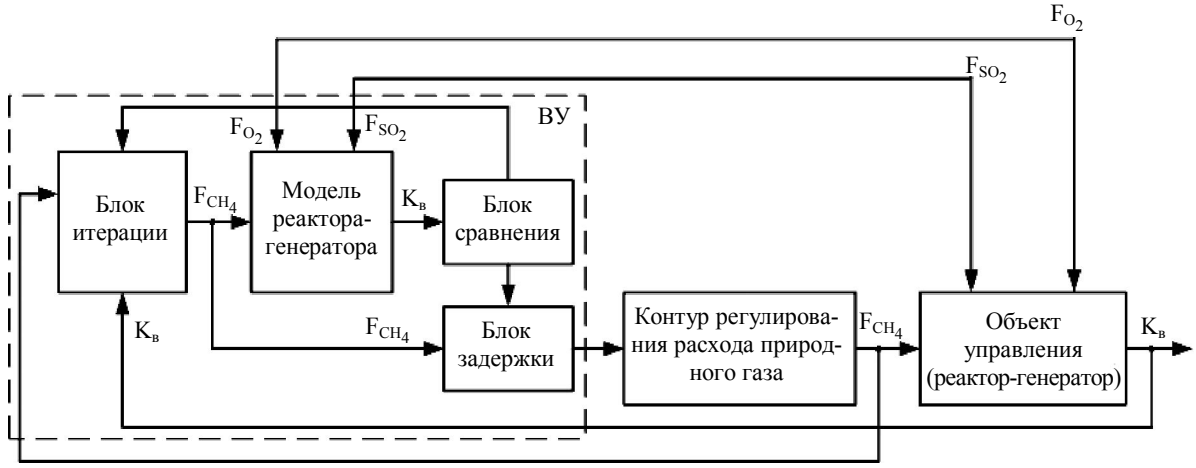


Рис.2. Система регулирования со звеном верхнего уровня (ВУ)

$$CH_4 + O_2 \leftrightarrow H_2; H_2O; CO; CO_2 + Q.$$

Для характеристики полноты извлечения серы удобно использовать коэффициент восстановления

$$\hat{E}_{â} = \frac{[COS + H_2S]}{SO_2}.$$

При соотношении концентраций $[COS + H_2S]:[SO_2] = 2$ равновесие реакции (2) смещается вправо, что приводит к наибольшему извлечению серы в элементную форму в аппарате Клауса. Так как COS может быть превращен в H_2S по реакции (3), а последний в серу по реакции (2), расход природного газа для восстановления необходимо поддерживать таким образом, чтобы $K_в = 2$.

Таким образом, структурная схема реактора-генератора может быть представлена в следующем виде: управляемая переменная – $K_в$; управляющее воздействие – расход природного газа; возмущающие воздействия – расход диоксида серы и расход кислорода.

Модель объекта представляет собой систему нечеткого вывода типа Сугено нулевого порядка*, в которой каждое из правил имеет постоянный вес, равный единице.

В модели было использовано 64 правила, составленных по следующей форме:

$П_i$: если F_{SO_2} есть A_j и F_{CH_4} есть B_k и F_{O_2} есть Cl, то $K_в = d_i$,

где $i = 1 \div 64$; $j, k, l = 1 \div 4$; A_j, B_k, C_l – термы; d_i – действительные числа.

Рассмотрим пример расчета для входных переменных $F_{SO_2} = 11000$ м^3/ч; $F_{CH_4} = 8950$ м^3/ч; $F_{O_2} = 7460$ м^3/ч. На первом этапе находятся степени истинности для предпосылок каждого правила. На втором этапе находятся активные правила:

$П_{43}$: если F_{SO_2} есть *PM*, и F_{CH_4} есть *PM*, и F_{O_2} есть *PM*, то $K_в = 2{,}3$;

$П_{44}$: если F_{SO_2} есть *PM*, и F_{CH_4} есть *PM*, и F_{O_2} есть *PB*, то $K_в = 3$;

$П_{47}$: если F_{SO_2} есть *PM*, и F_{CH_4} есть *PB*, и F_{O_2} есть *PM*, то $K_в = 2{,}1$;

$П_{48}$: если F_{SO_2} есть *PM*, и F_{CH_4} есть *PB*, и F_{O_2} есть *PB*, то $K_в = 1{,}9$;

$П_{59}$: если F_{SO_2} есть *PB*, и F_{CH_4} есть *PM*, и F_{O_2} есть *PM*, то $K_в = 3$;

$П_{60}$: если F_{SO_2} есть *PB*, и F_{CH_4} есть *PM*, и F_{O_2} есть *PB*, то $K_в = 6{,}9$;

$П_{63}$: если F_{SO_2} есть *PB*, и F_{CH_4} есть *PB*, и F_{O_2} есть *PM*, то $K_в = 1{,}8$;

$П_{64}$: если F_{SO_2} есть *PB*, и F_{CH_4} есть *PB*, и F_{O_2} есть *PB*, то $K_в = 3{,}5$.

На третьем этапе вычисленные значения истинности для предпосылок применяются к заключениям каждого правила: α_{43}=0,19; α_{44} = = 0,19; $\alpha_{47} = 0{,}34$; $\alpha_{48} = 0{,}64$; $\alpha_{59} = 0{,}19$; $\alpha_{60} = 0{,}19$; α_{63} =0,34; α_{64}=0,42, где α_i – степень

* *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH СПб: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.: ил.

истинности предпосылки. На четвертом этапе вычисляется значение выходной переменной по формуле

$$K_{\text{â}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i d_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} = 2 .$$

На рис.1 приведены расчетные и экспериментальные значения $К_в$, полученные при различных исходных данных. Ошибка не превышает 5 %.

Адекватная модель реактора-генератора позволяет создать автоматическую систему управления (рис.2). Управляемой переменной является коэффициент $К_в$, управляющее воздействие – расход природного газа F_{CH_4}.

Принцип работы схемы заключается в следующем. Текущее значение $К_в$ поступает на блок итерации, где сравнивается с заданным значением $К_0$. Если есть отличие, то блок итерации вычисляет задание F_{CH_4} на контур регулирования расхода природного газа. Предварительно задание F_{CH_4} поступает в модель, где вычисляется новое значение $К_в$, затем оно сравнивается с $К_0$ в блоке сравнения. При наличии отклонений цикл расчета продолжается уже при новом значении $F_{CH_4} + \Delta F_{CH_4}$. Расчет заканчивается как только $К_в = К_0$.

Научные руководители: асп. *М.Ю.Дерябин*, доц. *А.И.Писарев*