УДК 517.977:669
DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.374-382

ОПТИМАЛЬНОЕ СТОХАСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАГНИЙТЕРМИЧЕСКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ТИТАНА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ТЕПЛОСЪЕМОМ

В. Ф. Беккер

Кафедра «Автоматизация технологических процессов», Березниковский филиал ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Березники, Россия; atp@bf.pstu.ru

Ключевые слова: моделирование; производство; титан; управление.

Аннотация: Описан процесс восстановления губчатого титана и условия управления им. Исходя из уравнения теплового баланса, поставлена задача моделирования. При составлении модели приняты во внимание стохастические процессы, порожденные побочными химическими реакциями, погрешностями наблюдений и т.д. Поставлена задача синтеза оптимального управления для стохастической системы реактора. Решение получено в виде функции Риккати. Последняя приведена к рекуррентному алгоритму, реализованному на практике. После применения данного метода к процессам кинетики и теплосъема при восстановлении губчатого титана найдены параметры оптимального управления процессом. Это позволяет для любой начальной температуры при неполном составе наблюдений за температурой реакции выбирать управление процессом восстановления титана, поддерживающее эффективную температуру в реакторе.

В настоящее время отсутствует единый, общепринятый взгляд на процесс восстановления и механизм формирования титановой губки в промышленных реакторах. Многие явления не всегда находят достаточно обоснованное и однозначное объяснение. Высказанные предположения относительно механизма магнийтермического восстановления тетрахлорида титана не могут объяснить все многообразие физико-химических процессов, происходящих в реальном реакторе, представляющем собой сложную гетерогенную систему, находящуюся к тому же в равновесных условиях. Преимущественное протекание тех или иных реакций и механизмов формирования губки зависят от температуры, давления парогазовой смеси, расхода тетрахлорида титана, использования магния, условий отвода тепла, обстановки взаимодействия реагентов и продуктов реакций и многих других факторов, которые трудно поддаются учету. В реакторе могут протекать одновременно до восьми-девяти химических реакций. При этом как роль, так и место их протекания изменяются во времени и под влиянием внешних условий [1, 2].

Магний загружают в реактор перед началом процесса одной порцией, тетрахлорид титана подают непрерывно в течение всего процесса. Для улучшения использования объема реактора образующийся в результате восстановления хлорид магния периодически сливают из реактора.

Расход тетрахлорида титана и характер изменения его в ходе процесса оказывают основное влияние на развитие процесса, структуру и формирование блока реакционной массы и во многом определяют технико-экономические показатели процесса восстановления [3].

В результате экзотермического взаимодействия реагентов процесс магнийтермического восстановления титана сопровождается значительным выделением тепла, которое влияет на механизм протекания этого процесса. При этом если скорость тепловыделения превышает скорость теплоотвода, то необходимо организовать подачу тетрахлорида титана. Для увеличения скорости подачи в реактор тетрахлорида титана наружная стенка реактора охлаждается направленным потоком воздуха, создаваемым вентилятором. Температура стенки реактора при этом должна поддерживаться в пределах 850…900 °С. При более низких температурах снижается скорость реакции. При более высоких – появляется опасность загрязнения титана железом и далее проплавления стенок реактора [3, 4].

Для определения оптимального управления процессом восстановления рассмотрим случай регулирования расхода тетрахлорида титана в зависимости от температуры наружной стенки реактора при естественном воздушном охлаждении стенки реактора. При этом скорость реакции восстановления будет лимитироваться теплоотводом [4].

Для данного процесса уравнение теплового баланса в общем виде запишем следующим образом:

$$\frac{dT_t}{dt} = c(t)\,u_t + a(t)T_t, \tag{1}$$

где T_t – температура реакции, К (u_t, T_t – параметры, один из которых, или оба поддаются управлению (изменению) в ходе процесса); t – время, с, $t \in [0, t_k]$; t_k – момент окончания процесса; $c(t)$, $a(t)$ – детерминированные функции времени.

Если $T_э$ – эффективная температура реакции, то естественно изменением u_t или T_t стремятся поддержать температуру, близкую к $T_э$ в ходе процесса. В этом и состоит принцип оптимальности управления процессом. Причем управляемый параметр в момент t выбирают в зависимости от наблюдаемой до момента t температуры T_t.

При выборе математической модели, содержащей уравнение теплового баланса, будем придерживаться принципов, принятых в теории вероятностей. В связи с этим можно сказать, что уравнение (1) носит детерминированный характер, в нем не учтены многочисленные случайные факторы, влияющие на ход синтеза (например, побочные химические реакции, зависимость температуры от концентрации реагентов, случайные флуктуации температуры окружающей среды и т.д.). Поэтому для более адекватного моделирования процесса изменения температуры включим в правую часть уравнения (1) слагаемое, «отвечающее» за случайность. Тогда уравнение (1) примет вид

$$dT_t = \left[c(t)u_t + a(t)T_t\right]dt + b(t)dW_1(t), \tag{2}$$

где $b(t)$ – детерминированная функция времени; $W_1(t)$ – стандартный винеровский процесс [5], который имеет нормальное распределение вероятностей, нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию.

Уравнение (2) эквивалентно интегральному уравнению

$$T_t = T_0 + \int_0^{t_k} \left[c(t)u_t + a(t)T_t\right]dt + \int_0^{t_k} b(t)dW_1(t), \tag{3}$$

где T_0 – начальная температура в зоне реакции при t = 0.

Заметим, что $\int_0^{t_k} b(t)dW_1(t)$ является интегралом по случайному процессу. Существует несколько способов задания таких стохастических интегралов. Будем придерживаться конструкции, предложенной Ито [6]. Тогда случайный процесс изменения температуры описывается стохастическим дифференциальным уравнением диффузионного типа (2).

Еще одним источником неполноты информации является помеха в канале наблюдения за температурой реакции. Так же как и в случае описания процесса изменения температуры, будем интерпретировать неполноту информации как действие на систему случайных возмущений со статическими характеристиками, определяемыми из опыта. Предположим, что процесс наблюдения за температурой реакции описывается стохастическим дифференциальным уравнением

$$dx_t = A(t)T_t dt + B(t)dW_2(t), \tag{5}$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – известные детерминированные функции; $W_2(t)$ – независимый от $W_1(t)$ стандартный винеровский процесс.

Сформулируем математическую постановку задачи синтеза оптимального управления для системы стохастических дифференциальных уравнений (2) и (5) [6]. Пусть на вероятностном пространстве (Ω, F, P) задан частично наблюдаемый управляемый процесс (T_t, ξ_t), $t \in [0, t_k]$, задаваемый стохастическими уравнениями:

$$\begin{aligned} dT_t &= \left[c(t)\,u_t + a(t)T_t\right]dt + b(t)\,dW_1(t); \\ dx_t &= A(t)T_t dt + B(t)\,dW_2(t). \end{aligned} \tag{6}$$

Обозначим через $MT_0 = m_0$, $DT_0 = \sigma^2$ соответственно математическое ожидание и дисперсию случайной гауссовской величины T_0, независимой от $W_1(t)$ и $W_2(t)$; F_t^ξ – σ-подалгебру F, порожденную случайным процессом ξ_t $t \in [0, t_k]$. Пусть u_t – управляемый параметр. Тогда для каждого управления u_t, $t \in [0, t_k]$ рассмотрим функционал потерь

$$V(u_t, t_k) = M\int_0^{t_k} \left[T_t^2 + \varepsilon(t)u_t^2\right]dt, \tag{7}$$

где функция $\varepsilon(t)$ предполагается F_t^ξ-измеримой.

Будем искать управление u^*, удовлетворяющее равенству

$$V\left(u_t^*, t_k\right) = \inf V(u_t, t_k), \tag{8}$$

где нижняя грань берется по классу всех управлений, отвечающих условию

$$M\int_0^{t_k} u^4(t, \varepsilon)\,dt < \infty. \tag{9}$$

Управления, удовлетворяющие выражению (9), называют допустимыми. Рассматривая допустимые управления, положим

$$m_t^u = M\left(T_t / F_t^\xi\right), \quad \gamma_t^u = M\left(T_t - m_t^u\right), \tag{10}$$

где m_t^u и γ_t^u – соответственно условные математические ожидания и дисперсия T относительно F_t^ξ.

Тогда оптимальное управление существует и определяется формулами [8]:

$$u_t^* = -\varepsilon^{-1}(t)c(t)P(t)\tilde{m}_t, \quad t \in [0, t_k], \tag{11}$$

где $P(t)$ – решение уравнения Риккати

$$-\frac{dP(t)}{dt} = 2a(t)P(t) - \varepsilon^{-1}(t)c^2(t)P^2(t), \;\; P(t_k) = 0, \tag{12}$$

а $\tilde{m}_t$ определяется из системы уравнений:

$$d\tilde{m}_t = \left[c(t)u_t^* + a(t)\tilde{m}_t\right]dt + \gamma_t A(t)B^{-2}(t)\left[d\xi_t - A(t)m_t dt\right]; \tag{13}$$

$$\tilde{m}_0 = m_0 = MT;$$

$$\gamma_t = 2a(t)\gamma_t + b^2(t) - \gamma_t A^2(t)B^{-2}(t)\gamma_t, \quad \gamma_0 = DT_0, \tag{14}$$

причем

$$V(u_t^*, t_k) = P(0) + m_0^2 P(0) + \int_0^{t_k} \gamma_t dt, \quad \gamma_0 = DT_0, \tag{15}$$

где

$$P(t) = \int_0^T D(s)P(s)ds, \quad D(t) = \gamma_t^2 A(t)^2 B(t)^{-2}.$$

В случае обработки данных, получаемых с микропроцессорного контроллера с помощью аналого-цифрового преобразователя, наблюдения проводят в дискретные моменты времени. В связи с этим используем формулы (11) – (15) для решения задачи оптимального управления системой (6), когда $t \in \{0, \Delta, 2\Delta, ..., N\Delta\}$, где Δ – период дискретизации – промежуток времени между соседними наблюдениями за системой (6), рассчитываемый по формуле

$$\Delta = t_k / N. \tag{16}$$

Пусть $z = t/\Delta$, тогда для дискретного времени задача оптимального стохастического управления процессом (θ_z, x_z), $z = 0, ..., N$ имеет вид:

$$\theta_{z+1} = u_z c(z) + a(z)\theta_z + b(z)\varepsilon_1(z+1); \tag{17}$$

$$\xi_{z+1} = \theta_z A(z) + B(z)\varepsilon_2(z+1),$$

где $\varepsilon_1(z)$, $\varepsilon_2(z)$, $z = 0, ..., N$ – независимые в совокупности случайные величины, являющиеся гауссовскими с нулевыми, средними и единичными дисперсиями.

Система (17) решается при начальном условии θ_0, где θ_0 – гауссовская случайная величина, характеризуемая математическим ожиданием $M\theta_0 = m_0$, $M\left(\theta_0 - m_0\right)^2 = \gamma$, не зависящая от последовательностей $\varepsilon_1(z)$, $\varepsilon_2(z)$, $z = 0, ..., N$.

Для системы (17) оптимальное управление $u_z^*(z)$, $z = 0, ..., N$, удовлетворяющее условию

$$V\left(u_z^*\right) = \inf V\left(u_z\right) \quad \text{для} \quad V\left(u_z\right) = \left\{\left[\sum_{i=0}^{N-1} \theta_t^2 + \sigma(t)u_t^2\right] + \theta_N^2\right\}$$

подчинено следующему рекуррентному уравнению

$$u^*(t,\xi) = \left[\sigma(t) + c^2(t)P(t+1)\right]^+ c(t)P(t+1)a(t)\overline{m}_t, \tag{18}$$

где

$$P(t) = 1 + a^2(t)P(t+1) - a(t)P(t+1)c(t)\left[\sigma(t) + c^2(t)P(t+1)\right] + c(t)P(t+1)a(t); \tag{19}$$

при $P(N) = 1$

$$\overline{m}_{t+1} = c(t)u_t^* + a(t)\overline{m}_t + a(t)\gamma_t A(t)\left[B^2(t) + A^2(t)\gamma_t\right]^+ \left[\xi_{t+1} - A(t)m_t^*\right]; \tag{20}$$

при $\overline{m}_0 = m_0$ и γ_t, величина которого определена из рекуррентных уравнений:

$$\gamma_{t+1} = a^2(t)\gamma_t + b^2(t) - a(t)\gamma_t A(t)\left[B^2(t) + A^2(t)\gamma_t\right]^+ c(t)P(t+1); \tag{21}$$

при $\gamma_0 = \gamma$

$$V(u^*) = P(0) + m^2 P(0) + \sum_{t=0}^{N} H(t)\gamma_t; \tag{22}$$

$$P(t) = P(t) + P(t+1)D^2(t), P(N) = 0; \tag{23}$$

$$D(t) = a(t)\gamma_t A(t)\left\{\left[B^2(t) + A^2(t)\gamma_t\right]^{0,5}\right\}^+, \tag{24}$$

где $f^+(x)$ при $x \in X$ находится как $\max\{0, f(x)\}$ для $x \in X$; дискретного времени $t = 0, 1, ..., N$.

Применим вышеописанный метод для оптимального управления процессом восстановления титана, получаемого взаимодействием магния с тетрахлоридом титана. Кинетика процесса лимитируется скоростью подачи тетрахлорида титана. Отсюда кинетическое уравнение имеет вид

$$\frac{d\tilde{x}_t}{dt} = K_0 \tilde{u}_t, \tag{25}$$

где $\tilde{x}_t$ – количество получаемого титана, кг; t – время, с; K_0 – коэффициент пропорциональности, доли ед.; $\tilde{u}_t$ – расход тетрахлорида титана, кг/с.

Стохастическое дифференциальное уравнение теплового баланса для промышленного получения титана имеет вид

$$\frac{d\tilde{x}_t}{dt} = \frac{1}{Mc}\left[\Delta QV \frac{d\overline{x}_t}{dt} + KF(T_x - T)\right] + \tilde{b}(t)dW_2(t); \quad t \in [0, t_k], \tag{26}$$

где M – масса, кг; c – теплоемкость реакционной массы, Дж/кг; ΔQ – тепловой эффект реакции, Дж/моль; T и T_x – температуры соответственно реакционной массы и окружающей среды, К; V – полезный объем реактора, м^3; K – коэффициент теплопередачи, Вт/м^2.

Процесс наблюдения описывается стохастическим уравнением

$$dT_t = \tilde{A}T_t dt + \tilde{B}(t)dW_2(t), \tag{27}$$

где $\tilde{A}$ – линейный коэффициент передачи; $\tilde{B}(t)$ – точность измерений; T_t – наблюдаемая величина.

Путем замены переменных перейдем от уравнений (26) и (27) к безразмерным нормированным уравнениям.

Введем следующие обозначения:

$$\tilde{\theta} = \alpha t, \quad \hat{u} = \pi \tilde{u}, \quad \tau = \zeta t, \quad b = \gamma \tilde{b}, \tag{28}$$

где $\alpha, \pi, \zeta, \gamma$ удовлетворяют требованиям безразмерности $\tilde{\theta}$, $\hat{u}$, τ, $\tilde{b}$ и являются решениями следующей системы уравнений

$$\Delta Q V K_0 \alpha / (M c \pi \xi) = 1, \qquad KF/(Mc\xi) = 1. \tag{29}$$

Обозначим безразмерную температуру окружающей среды $\tilde{\theta}_x$, и $\theta = \tilde{\theta}_э - \tilde{\theta}$, $u = \hat{u} + \tilde{\theta}_x - \tilde{\theta}_э$, где $\tilde{\theta} = \alpha T_э$. В этих обозначениях уравнение (26) примет вид

$$d\theta = (u + \theta) d\tau + b dW_1. \tag{30}$$

Аналогично выражениям (28) и (29) обозначим:

$$\xi = \beta Y, \quad B = \gamma_1 \tilde{B}. \tag{31}$$

При этом β является решением уравнения

$$A\beta/(\xi\alpha) = 1. \tag{32}$$

Тогда зависимость (27) преобразуется к виду

$$d\xi = \theta d\tau + B dW_2. \tag{33}$$

В предположении, что микропроцессорная обработка данных проводится в реальном времени, введем функционал потерь

$$V(u) = M\left[\sum_{t=0}^{N-1}\left(\tilde{\theta}_t^2 + \delta_t \bar{u}_t^2\right) + \theta_N^2\right], \tag{34}$$

где параметр $\delta_t \equiv \delta$ выберем из условия

$$\inf_{\tilde{\theta}_t} M \sum_{t=0}^{N-1} \bar{\theta}_t^2 = 10^{-2} \sup_{\tilde{u}_t} M \sum_{t=0}^{N-1} \bar{u}_t^2. \tag{35}$$

Тогда формулы (18) – (24) принимают соответственно вид:

$$\bar{u}^*\left(z, \bar{\xi}\right) = -\left[\sigma_z + P(z+1)\right]^+ P(z+1) m_z^*; \tag{36}$$

$$P(z) = 1 + P(z+1) - P(z+1)[\sigma_z + P(z+1)]^+ P(z+1); \tag{37}$$

при $P(N) = 1$

$$m_{z+1}^* = \bar{u}_z^* + m_z^* + \gamma_z \left[B^2(z) + \gamma_z\right]^+ \left(\xi_{z+1}^- - m_z^*\right); \tag{38}$$

при $m_0^* = m$

$$\gamma_{z+1} = \gamma_z + b^{-2}(z) - \gamma_z \left[B^2(z) + \gamma_z\right)^+ \gamma_z; \tag{39}$$

при $\gamma_0 = \gamma$

$$V\left(\bar{u}^*\right) = P(0) + m^2 P(0) + \sum_{z=0}^{N} \gamma_z; \tag{40}$$

$$P(z) = P(z+1) + P(z+1) D^2(z), \quad P(N) = 0; \tag{41}$$

$$D(z) = \gamma_z [B^2(z) + \gamma_z]^{0,5}. \tag{42}$$

Подставляя в уравнения (36) – (39), (42) значения из уравнений (29) и (31), находим оптимальное управление промышленным процессом восстановления титана. Таким образом, полученные результаты позволяют для любой начальной температуры T_0 при неполном составе наблюдений за температурой реакции выбирать управление процессом восстановления титана, поддерживающее эффективную температуру.

Список литературы

1. Гармата, В. А. Металлургия титана / В. А. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник. – М. : Металлургия, 1967. – 643 с.
2. Родякин, В. В. Кинетические исследования магниетермического восстановления титана / В. В. Родякин, В. Э. Гегер, В. М. Скрыпнюк // Металлургия и химия титана : науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. и проект. ин-т титана. – М., 1972. – Т. VII-VIII. – С. 83 – 93.
3. Тимченко, Б. С. Экспериментально статистическая оптимизация, контроль и автоматизация металлотермии / Б. С. Тимченко. – М. : Цветметинформация, 1991. – 96 с.
4. Родякин, В. В. Магнийтермическое производство губчатого титана / В. В. Родякин, В. Э. Гегер, В. М. Скрыпнюк. – М. : Металлургия, 1971. – 216 с.
5. Ширяев, А. Н. Вероятность : в 2 кн. / А. Н. Ширяев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МЦНМО, 2004. – 2 кн.
6. Эллиот, Р. Стохастический анализ и его приложения : пер. с англ. / Р. Эллиот. – М. : Мир, 1986. – 351 с.
7. Липцер, Р. Ш. Статистика случайных процессов / Р. Ш. Липцер, А. Н. Ширяев. – М. : Наука, 1974. – 696 с.
8. Кирин, Ю. П. Качественный анализ динамики позиционного регулирования температуры процесса восстановления титана / Ю. П. Кирин, А. В. Затонский, В. Ф. Беккер, Н. В. Бильфельд // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 10. – С. 54 – 56.
9. Ерыпалова, М. Н. Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний / М. Н. Ерыпалова, В. Ф. Беккер, А. В. Затонский, Ю. П. Кирин // Изв. высш. учеб. заведений. Поволж. регион. Техн. науки. – 2008. – № 4. – С. 50 – 57.

Optimal Stochastic Control of Magnesium Reduction of Titanium with Inartificial Heat Removal

V. F. Bekker

Department of Automation of Technological Processes,
Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki, Russia; atp@bf.pstu.ru

Keywords: control; modeling; production; titanium.

Abstract: Processes of titanium sponge reduction by magnesium and conditions of control are described. A modeling task is based on heat transfer balance. Stochastic processes are taken in account in the model. These processes are caused by adverse chemical reactions, errors of measurements etc. The problem of optimal control system synthesis for stochastic reactor is set. The solution in the form of the Riccati equation is obtained. The solution is expressed as a recurrent algorithm that is easy to realize. The method is applied to kinetic chemical processes and heat transfer processes of sponge titanium reduction. As a result, the optimal parameters of control system are found. These results allow selecting optimal control for the process of titanium sponge reduction to provide the efficient reactor temperature with any initial temperature and incomplete set of observations.

References

1. Garmata V.A., Gulyanitskii B.S., Kramnik V.Yu. *Metallurgiya titana* [Titanium metallurgy], Moscow: Metallurgiya, 1967, 643 p. (In Russ.)

2. Rodyakin V.V., Geger V.E., Skrypnyuk V.M. [Kinetic studies of magnesium-thermal reduction of titanium], *Metallurgiya i khimiya titana* [Titanium metallurgy and chemistry], Moscow, 1972, vol. VII-VIII, pp. 83-93. (In Russ.)

3. Timchenko B.S. *Eksperimental'no statisticheskaya optimizatsiya, kontrol' i avtomatizatsiya metallotermii* [Experimental statistical optimization, control and automation of metallothermy], Moscow: Tsvetmetinformatsiya, 1991, 96 p. (In Russ.)

4. Rodyakin V.V., Geger V.E., Skrypnyuk V.M. *Magniitermicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana* [Magnesium-thermal production of spongy titanium], Moscow: Metallurgiya, 1971, 216 p. (In Russ.)

5. Shiryaev A.N. *Veroyatnost'* [Probability], Moscow: Izdatel'stvo MTsNMO, 2004. (In Russ.)

6. Elliott R.J. *Stochastic Calculus and Applications*, New York : Springer-Verlag, 1982.

7. Liptser R.Sh., Shiryaev A.N. *Statistika sluchainykh protsessov* [Statistics of random processes], Moscow, Nauka, 1974. (In Russ.)

8. Kirin Yu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. [Qualitative analysis of temperature dynamics under positioning control for titanium reduction process], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2008. no. 10, pp. 54-56. (In Russ.)

9. Erypalova M.N., Bekker V.F., Zatonskii A.V., Kirin Yu.P. [Influence of the nonstationarity of the control object on the parameters of steady self-oscillations], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences],2008, no. 4, pp. 50-57. (In Russ.)

Optimale stochastische Steuerung von der magnesiumthermischen Reduktion des Titans mit dem natürlichen Wärmeentzug

Zusammenfassung: Es sind der Prozess der Reduktion des Schwammtitans und die Bedingungen seiner Steuerung beschrieben. Ausgehend von der Gleichung des thermischen Gleichgewichts ist die Aufgabe der Modellierung gestellt. Bei der Zusammenstellung des Modells sind die stochastischen Prozesse berücksichtigt, die infolge der nebensächlichen chemischen Reaktionen, der Fehler der Kontrolle entstehen. Es ist die Aufgabe der Synthese der optimalen Steuerung für das stochastische System des Reaktors gestellt. Die Lösung ist in Form der Funktion von Riccati erhalten. Die Funktion ist zum rekurrenten Algorithmus angebracht, der in der

Praxis realisiert ist. Nach der Anwendung der gegebenen Methode zu den Prozessen der Kinetik und des Wärmeentzuges bei der Reduktion des Schwammtitans sind die Kennwerte der optimalen Steuerung von dem Prozess gefunden. Es lässt zu, die die wirksame Temperatur im Reaktor unterstützende Steuerung von dem Prozess der Reduktion des Titans für die beliebige Anfangstemperatur bei unvollständiger Kontrolle der Temperatur der Reaktion zu wählen.

Commande stochastique optimale de la réduction thermique de magnésium du titan avec le débit calorifique naturel

Résumé: Sont décrits le processus de la réduction du titane spongeux et les conditions de sa commande. A partir de l'équation d'équilibre thermique est mise la tâche de la modélisation. Lors de l'élaboration d'un modèle sont pris en compte les processus stochastiques dûs aux réactions chimiques secondaires, des erreurs d'observations, etc. La tâche consiste dans la synthèse de la commande optimale pour le système stochastique du réacteur. La solution est obtenue dans la forme de la fonction de Riccati. Cette dernière est réduite à l'algorithme récurrent réalisé en pratique. Après l'application de cette méthode aux processus de la cinétique et du débit calorifique lors de la réduction du titane spongeux sont trouvés les paramètres de la commande optimale du processus. Cela permet de choisir la commande de la réduction du titane prenant en charge la température efficace dans le réacteur.

Автор: ***Беккер Вячеслав Филиппович*** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов», Березниковский филиал ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Березники, Россия.

Рецензент: ***Затонский Андрей Владимирович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов», Березниковский филиал ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Березники, Россия.
