

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.1.02

УДК 681.5, 669.295

Ю.П. Кирин, Н.В. Бильфельд, В.А. ТихоновБерезниковский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Березники, Россия**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНА МАГНИЕМ**

Развитие промышленной магниетермической технологии производства губчатого титана сдерживается из-за сложности технологии процесса восстановления тетрахлорида титана магнием и недостаточной производительности аппаратов восстановления. В приведенной работе рассматривается решение данной проблемы путем совершенствования управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления. **Цель:** синтез робастной системы управления с типовым линейным регулятором, обеспечивающей повышение качества управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов и улучшение за счет этого технологических показателей процесса восстановления. **Методы:** зоны экзотермической реакции рассматриваются как объекты управления с интервальной параметрической неопределенностью. Синтез робастного управления заключается в нахождении такого заданного значения температуры типового регулятора, которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры объектов управления при любых изменениях их динамических параметров из известного диапазона. При этом найденное гарантирующее заданное значение температуры типового регулятора должно обеспечивать интенсификацию процесса восстановления, а также разделение в ходе технологического процесса восстановителя (магния) и побочного продукта реакции (хлорида магния). Для этого предложено использовать типовые ПИ-регуляторы с робастными настройками, рассчитанными для наихудшего режима функционирования объектов управления, при котором в системе управления имеет место наибольшая ошибка регулирования температуры. Модификацией известных инженерных методов расчета автоматических регуляторов получены простые аналитические соотношения, связывающие робастные настройки ПИ-регулятора температуры и динамические параметры объектов в наихудшем режиме функционирования. Исследованы режимы работы системы управления при воздействиях на объект по каналу регулирования «мощность воздушного охлаждения – температура зоны экзотермической реакции» и каналу внешнего возмущения «скорость подачи тетрахлорида титана – температура зоны экзотермической реакции». **Результаты:** выполненное в пакете MatLab имитационное моделирование режимов работы разработанной системы управления показало, что предложенная система позволяет повысить качество управления температурой зоны экзотермической реакции: ошибка регулирования снижается с 29 до 9 °С, повышается гарантирующее заданное значение температуры с 871 до 891 °С, обеспечивается режим непрерывного изменения мощности воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции в зависимости от скорости подачи в аппарат тетрахлорида титана. **Практическая значимость:** результаты имитационного моделирования подтверждают возможность применения разработанной системы для совершенствования управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления. Практическая реализация системы управления позволит повысить производительность процесса восстановления тетрахлорида титана магнием и снизить энергозатраты.

Ключевые слова: восстановление тетрахлорида титана магнием, зона экзотермической реакции, типовой регулятор, робастная настройка регулятора, гарантирующее заданное значение температуры.

Yu.P. Kirin, N.V. Bilfeld, V.A. Tikhonov

Bereznikovsky Branch of the Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki, Russian Federation

IMPROVING THE CONTROL OF THE REDUCTION OF TITANIUM TETRACHLORIDE WITH MAGNESIUM

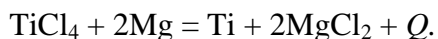
The development of industrial magnesium-thermal technology for the production of spongy titanium is hampered by the complexity of the technology of the process of titanium tetrachloride reduction with magnesium and insufficient productivity of the recovery apparatus. In the given work, a solution to this problem is considered by improving the control of the temperature of the zones of exothermic reaction of industrial recovery apparatus. **Purpose:** the synthesis of a robust control system with a typical linear controller, which provides an increase in the quality of temperature control in the zones of exothermic reaction of industrial devices and, due to this, improvement of the technological parameters of the recovery process. **Methods:** zones of exothermic reaction are considered as control objects with interval parametric uncertainty. The synthesis of robust control consists in finding such a set temperature value for a typical controller, which would guarantee the maintenance of the maximum permissible temperature of control objects for any changes in their dynamic parameters from a known range. In this case, the found guaranteeing the setpoint temperature of a typical regulator should provide an intensification of the reduction process, as well as the separation of the reductant (magnesium) and the by-product of the reaction (magnesium chloride) during the technological process. For this, it is proposed to use typical PI - controllers with robust settings, calculated for the worst mode of operation of control objects, in which the control system has the largest temperature control error. By modifying the well-known engineering methods for calculating automatic controllers, simple analytical relationships are obtained that connect the robust settings of the PI - temperature controller and the dynamic parameters of objects in the worst operating mode. The modes of operation of the control system are investigated when the object is influenced by the control channel "air cooling power - temperature of the exothermic reaction zone" and the external disturbance channel "titanium tetrachloride feed rate - temperature of the exothermic reaction zone". **Results:** the simulation modeling of the operating modes of the developed control system performed in the MatLab package showed that the proposed system improves the quality of temperature control of the exothermic reaction zone: the control error decreases from 29 to 9 ° C, the guaranteed set temperature value increases from 871 to 891 mode of continuous change in the power of air cooling of the exothermic reaction zone depending on the feed rate of titanium tetrachloride into the apparatus. **Practical significance:** the results of simulation confirm the possibility of using the developed system to improve the temperature control of the zones of exothermic reaction of industrial recovery devices. The practical implementation of the control system will increase the productivity of the titanium tetrachloride magnesium reduction process and reduce energy consumption.

Keywords: reduction of titanium tetrachloride with magnesium, zone of exothermic reaction, typical regulator, robust control of the regulator, which guarantees the set temperature value

Введение

Современная магнетермическая технология производства губчатого титана реализована в аппаратах периодического действия и включает два основных передела: восстановление тетрахлорида титана магнием и вакуумную сепарацию полученной после процесса восстановления реакционной массы [1].

Процесс восстановления тетрахлорида титана магнием основан на экзотермической реакции химического превращения:



В промышленных аппаратах процесс восстановления проводят в атмосфере инертного газа–аргона при температуре 800–900 °С. Перед началом процесса в аппарат загружают расплавленный магний, затем на поверхность магния осуществляют непрерывную подачу тетрахлорида титана. Конструкцией аппарата восстановления предусмотрено воздушное охлаждение зоны экзотермической реакции вентилятором, а также подогрев верхней и нижней частей аппарата электрическими нагревателями для расплавления магния и его хлорида. Заданная температура в указанных зонах аппарата поддерживается двухпозиционными регуляторами изменением мощности воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции и мощности нагревателей зон подогрева. Особенность процесса состоит в том, что плотность продукта реакции восстановления (хлорида магния) больше плотности восстановителя (магния). При таких условиях хлорид магния опускается на дно аппарата, а более легкий расплав магния перемещается вверх в зону экзотермической реакции, где на поверхности расплава происходит взаимодействие реагентов. Через сливное отверстие, расположенное в нижней части аппарата восстановления, хлорид магния периодически выводится из аппарата.

Реакционная масса, полученная после процесса восстановления, представляет собой блок титановой губки, поры которой заполнены магнием и хлоридом магния. Ее направляют на дальнейшую переработку в отделение вакуумной сепарации, где в аппаратах вакуумной сепарации осуществляют отделение титановой губки от магния и его хлорида.

Развитие промышленной магниетермической технологии получения губчатого титана сдерживается из-за достаточно сложной технологии процесса восстановления тетрахлорида титана магнием и низкой производительности аппаратов восстановления [2, 3].

Для решения этой проблемы используются различные методы совершенствования магниетермического производства губчатого титана [4].

В статье рассматриваются вопросы совершенствования управления температурным режимом процесса восстановления тетрахлорида титана магнием.

1. Основные направления интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса восстановления тетрахлорида титана

Один из реализованных на практике способов интенсификации процесса восстановления состоит в повышении скорости тетрахлорида титана, подаваемого в аппараты восстановления [5].

В настоящее время активно развивается способ интенсификации процесса путем совершенствования управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления.

Известно, что с повышением температуры скорость реакции восстановления возрастает. Так, например, повышение температуры процесса восстановления с 750 до 850 °С при концентрации тетрахлорида титана $0,85 \cdot 10^{-2}$ моль/л позволяет повысить значения константы скорости реакции от 0,75 до 2,24 л/(моль·с). Следовательно, интенсификация процесса восстановления возможна при условии, если двухпозиционные регуляторы поддерживают температуру зон экзотермической реакции на максимально возможных уровнях. При этом, конечно, эта температура не должна превышать максимально допустимого значения 900 °С для материала из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, из которого выполнены реакторы восстановления [6].

В промышленной практике часто возникают технологические ситуации, когда в ходе процесса восстановления затруднены условия разделения магния и его хлорида [7, 8].

Одним из характерных признаков возникновения такой ситуации является появление расплава магния в струе хлорида магния, сливаемого из аппарата восстановления. Исследователи связывают наиболее вероятную причину неразделения этих веществ с возникновением в ходе процесса значительных градиентов температур по радиусу и высоте аппарата, обусловленных протеканием экзотермической реакции, одновременным охлаждением зоны экзотермической реакции и подогревом нижней и верхней частей аппарата [9–12]. При таком температурном режиме затруднено разделение магния и хлорида магния, так как их плотности оказываются достаточно близкими. Технологи называют данную ситуацию «неделением» магния и его хлорида. Процесс восстановления при «неделении» прекращают на неопределённое время и корректируют его до тех пор, пока не произойдёт разделение этих веществ.

Существующие методы измерения уровня расплава магния в промышленных аппаратах [13, 14] не позволяют контролировать режим «неделения», вследствие чего до 5 % производственных циклов восстановления выбраковываются из-за нештатных ситуаций нарушения разделения магния и его хлорида.

Таким образом, существует проблема организации оптимального температурного режима процесса восстановления, при котором обеспечивается разделение магния и его хлорида в промышленных аппаратах.

В работах [9, 15] исследованы некоторые закономерности протекания процесса восстановления, влияющие на разделение магния и его хлорида. Установлено, что при существующей двухпозиционной системе управления работой вентилятора (в режиме включен–выключен) не обеспечивается необходимая точность поддержания температуры зоны экзотермической реакции и наблюдаются циклы захлаживания, либо перегрева зоны. При таком температурном режиме затруднено перемещение из пористого блока титановой губки хлорида магния в нижнюю часть аппарата, что является причиной «неделения».

В работе установлено [9], что для устранения «неделения» необходимо поддерживать равенство тепловых потоков от взаимодействия тетрахлорида титана с магнием и отвода тепла охлаждающим зону экзотермической реакции воздухом путем перевода вентилятора в непрерывный режим работы, при котором предусматривается регулирование его производительности в зависимости от скорости подачи в аппарат тетрахлорида титана. В работе [12] получены оптимальные значения скоростей воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции, при которых не происходит перегрева или чрезмерного охлаждения зоны.

2. Робастный подход к управлению процессом восстановления тетрахлорида титана

В настоящее время используется робастный подход к управлению температурой зон экзотермической реакции аппаратов восстановления, который заключается в следующем [16].

Зоны экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления рассматривают как объекты управления с интервальной параметрической неопределенностью, а систему двухпозиционного регулирования температуры таких объектов – как интервальную систему автоматического регулирования. Математическая модель

динамики интервальных объектов управления представлена дифференциальным уравнением первого порядка, описывающим наилучшие режимы функционирования объектов, при которых в двухпозиционной системе имеет место максимальная ошибка регулирования:

$$T_{0p}^{\min} \cdot \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}^{\max} \cdot [x_p(t - \tau_p^{\max}) - z_p(t)], \quad (1)$$

где $y_p(t)$ – выходная величина (температура); $x_p(t)$ – входная величина (мощность воздушного охлаждения) зоны экзотермической реакции; T_{0p}^{\min} , K_{0p}^{\max} , τ_p^{\max} – постоянная времени, коэффициент усиления, время запаздывания зоны соответственно; $z_p(t)$ – переменное возмущение, характеризующее изменение тепла экзотермической реакции.

Известен диапазон изменения интервальных параметров объекта управления:

$$T_{0p}^{\min} \leq T_{0p}(t) \leq T_{0p}^{\max}, \quad (2)$$

$$K_{0p}^{\min} \leq K_{0p}(t) \leq K_{0p}^{\max}, \quad (3)$$

$$\tau_p^{\min} \leq \tau_p(t) \leq \tau_p^{\max}. \quad (4)$$

Синтез робастного управления состоит в определении заданного значения двухпозиционного регулятора $u_{зр}$, которое гарантирует поддержание максимально допустимой температуры зоны экзотермической реакции при изменении в уравнении (1) интервальных параметров в диапазоне (2)–(4).

Условие поддержания максимально допустимой температуры u_d объекта управления (1) определено из следующего соотношения:

$$u_{зр} = u_d - \Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p^{\max}), \quad (5)$$

где $\Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p) = (z_p^{\max}) = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ – максимально возможная ошибка в наилучшем режиме функционирования объекта (1), которая характеризует величину превышения регулируемой температурой заданного значения в двухпозиционной системе.

Регулируемая температура, рассчитанная по соотношению (5), не превысит в двухпозиционной системе установленного технологического ограничения. Следовательно, значение $u_{зр}$ является гарантирующим управлением температурой зоны экзотермической реакции. Гаранти-

рующее заданное значение двухпозиционного регулятора составляет 871 °С при существующем технологическом ограничении $y_d = 900^\circ\text{C}$. Из-за значительной ошибки регулирования гарантирующее заданное значение двухпозиционного регулятора объекта управления назначают значительно ниже допустимой температуры.

3. Постановка задачи совершенствования управления процессом восстановления тетрахлорида титана

Анализ современного состояния технологии процесса восстановления тетрахлорида титана и действующей двухпозиционной системы регулирования температуры зон экзотермической реакции показал, что имеются значительные резервы для совершенствования управления процессом. Для этого требуется разработка новой эффективной системы управления процессом восстановления, обеспечивающей, с одной стороны, снижение ошибки регулирования и повышение за счет этого гарантирующего заданного значения температуры зоны экзотермической реакции для интенсификации процесса. С другой стороны, разрабатываемая система управления должна при этом поддерживать в ходе процесса восстановления равенство тепловых потоков от взаимодействия тетрахлорида титана с магнием и отвода тепла охлаждающим зону экзотермической реакции воздухом для разделения магния и его хлорида. Иными словами, общая задача, решаемая системой управления, состоит в повышении качества управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления.

4. Синтез робастной системы управления процессом восстановления с типовыми линейными регуляторами

Для решения поставленной задачи в статье рассматриваются принципы построения робастной системы управления температурой зон экзотермической реакции промышленных аппаратов восстановления, в которой вместо двухпозиционных регуляторов используются типовые ПИ или ПИД-регуляторы.

Синтез типовых регуляторов состоит в нахождении параметров настройки регуляторов, которые обеспечивают минимизацию ошибки регулирования $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{mx}}$ (z_p) и повышение за счет z_p^{max} этого гарантирующего заданного значения температуры объекта управления (1).

В практике автоматизации технологических процессов существует потребность применять для параметрического синтеза типовых регуляторов в робастных системах управления простые аналитические или графические зависимости, связывающие искомые параметры настройки регуляторов и заданные показатели качества интервальной системы [17, 18]. В нашем случае показателями работы интервальной системы являются динамические параметры T_{0p}^{\min} , K_{0p}^{\max} , τ_p^{\max} объекта управления (1), характеризующие максимальную ошибку регулирования температуры, которые целесообразно использовать для расчета параметров настройки регуляторов. Таким образом, требуется определить настройки регуляторов, соответствующие наиболее неблагоприятному режиму функционирования объекта управления (робастные настройки типовых регуляторов).

4.1. Расчет робастной настройки ПИ-регулятора температуры зоны экзотермической реакции

Перспективным направлением разработки робастных систем управления является использование традиционных методов синтеза обычных систем управления для их применения в системах с интервальной параметрической неопределенностью. Такой подход позволяет применить достаточно простую и хорошо изученную процедуру синтеза обычных систем управления для синтеза интервальных систем [19, 20].

В статье предлагается для расчета робастных настроек типовых регуляторов использовать разработанные в рамках теории линейных систем инженерные методы расчета автоматических регуляторов, позволяющие с помощью простых и удобных для инженерной практики формул определять настройки типовых регуляторов по известным динамическим параметрам промышленных объектов управления [21, 22].

В промышленной практике установлено [23, 24], что для повышения эффективности функционирования систем управления технологическими объектами необходимо, чтобы протекающие в них переходные процессы были апериодическими. Для этих целей используют типовые ПИ или ПИД-регуляторы с настройками, рассчитанными по формулам, рекомендованным в работах [21, 22] для апериодических переходных процессов в системах управления.

В системах управления, содержащих статические объекты первого порядка, параметры настройки ПИ-регуляторов для апериодических переходных процессов определяют по известным формулам [21, 22]:

$$K_p = 0,6 / (K_0 \cdot \theta), \quad (6)$$

$$T_i = 0,6 \cdot T_0, \quad (7)$$

где $\theta = \tau / T_0$; T_0 , K_0 , τ – соответственно коэффициент усиления, постоянная времени, запаздывание объекта; K_p , T_i – коэффициент передачи, время издрорма регулятора.

Рассчитаем робастные настройки ПИ-регулятора $K_p^{\text{роб}}$ и $T_i^{\text{роб}}$, заменив в формулах (6), (7) значения T_0 , K_0 , τ на соответствующие значения T_{0p}^{min} , τ_p^{max} , K_{0p}^{max} дифференциального уравнения объекта управления:

$$K_{0p}^{\text{max}} = 0,6 / (K_0^{\text{max}} \cdot \theta^{\text{max}}), \quad (8)$$

$$T_{0p}^{\text{min}} = 0,6 \cdot T_0^{\text{min}}, \quad (9)$$

где $\theta^{\text{max}} = \tau_p^{\text{max}} / T_0^{\text{min}}$.

Таким образом, в результате модификации формул (6), (7) получены простые соотношения (8), (9) для расчета робастных настроек ПИ-регулятора в наихудшем режиме функционирования объекта. Аналогичную методику можно использовать для расчета робастных настроек ПИД-регулятора.

4.2. Структурная схема системы управления температурой зоны экзотермической реакции

Процесс восстановления тетрахлорида титана магнием разделяют на две стадии [1]:

– стадия разогрева – период процесса, при котором отсутствуют подача тетрахлорида титана в аппарат восстановления и охлаждение зоны экзотермической реакции воздухом, осуществляется только нагрев магния в аппарате;

– основная стадия процесса – непрерывная подача тетрахлорида титана в аппарат, восстановление тетрахлорида титана магнием, удаление из аппарата образующегося хлорида магния, охлаждение зоны

экзотермической реакции воздухом с поддержанием ее температуры на заданном уровне.

В статье рассматриваются принципы построения системы управления температурой зоны экзотермической реакции на основной стадии процесса (рис. 1).

В системе предусмотрены воздействия на объект управления как по каналу регулирования «мощность воздушного охлаждения – температура зоны экзотермической реакции», так и по каналу внешнего возмущения «скорость подачи тетрахлорида титана – температура зоны экзотермической реакции».

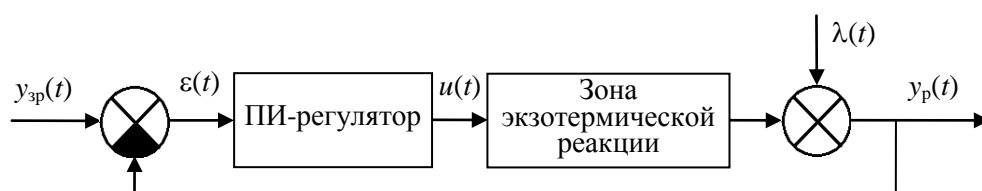


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной системы регулирования

На выходе объекта управления действует внешнее возмущение $\lambda(t)$ – изменение скорости подачи в аппарат тетрахлорида титана. Выходная величина $y_p(t)$ (температура) поддерживается на заданном уровне y_{zp} ПИ-регулятором с робастными настройками (8) и (9), преобразующим рассогласование $\epsilon(t) = y_z - y(t)$ в регулирующее воздействие $u(t)$ – изменение мощности создаваемого вентилятором воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции в зависимости от скорости подачи в аппарат тетрахлорида титана.

В отличие от действующей системы двухпозиционного регулирования [16] в предложенной системе управления для поддержания заданного значения температуры зоны экзотермической реакции используется ПИ-регулятор с робастными настройками, и, кроме того, введено дополнительное воздействие по внешнему возмущению, учитывающее влияние на регулируемую температуру изменение скорости подачи тетрахлорида титана.

Предполагается, что такая структура системы управления позволит повысить качество управления температурой зон экзотермических реакций промышленных аппаратов восстановления.

4.3. Имитационное моделирование системы управления температурой зоны экзотермической реакции

Исследуем методом имитационного моделирования режимы работы предложенной системы управления для оценки качества ее работы при разных скоростях подачи в аппарат тетрахлорида титана. Задача состоит в определении максимальной ошибки регулирования системы в наихудшем режиме функционирования объекта управления для расчета гарантирующего заданного значения температуры зоны экзотермической реакции. Для этого необходимо располагать передаточными функциями регулятора, объекта управления по каналам регулирования и возмущения, а также графиком изменения скоростей подачи тетрахлорида титана в промышленные аппараты восстановления.

Для промышленных аппаратов восстановления получены следующие динамические параметры в наихудшем режиме функционирования объекта управления (1): $T_{op}^{\min} = 710$ с, $K_{op}^{\max} = 2,8^{\circ}\text{C/кВт}$, $\tau^{\max} = 30$ с [16].

Запишем математическую модель объекта управления (1) по каналу регулирования «мощность воздушного охлаждения – температура зоны экзотермической реакции» в виде передаточной функции:

$$W_o(s) = \frac{2,8}{710s + 1} e^{-30s}. \quad (10)$$

По формулам (8), (9) рассчитаны робастные настройки ПИ-регулятора температуры зоны экзотермической реакции, которые являются коэффициентами его передаточной функции:

$$W_p(s) = \frac{5 + 2130s}{426s}. \quad (11)$$

Получена передаточная функция объекта управления по каналу возмущения «скорость подачи тетрахлорида титана – температура зоны экзотермической реакции»:

$$W_o(s) = \frac{0,11}{760s + 1} e^{-30s}. \quad (12)$$

Следует заметить, что использование для каналов возмущений систем управления математических моделей в виде передаточных функций инерционных звеньев первого порядка с запаздыванием (12) считается приемлемым для практических применений [25].

В промышленной практике магнетермического восстановления процесс проводят при разных скоростях подачи в аппараты тетрахлорида титана, которые подбирают экспериментально в зависимости от количества израсходованного восстановителя (коэффициента использования магния). Предложено несколько режимов подачи тетрахлорида титана, общим для которых является наличие трех участков скоростей подачи тетрахлорида в аппараты восстановления [1].

Один из таких режимов представлен на рис. 2 [26]. Как видно из рисунка, на первом и третьем участках, соответствующих начальной и заключительной стадиям процесса восстановления, процесс проводят с пониженной скоростью подачи тетрахлорида титана 220 кг/ч. На основной стадии процесса (второй участок) скорость подачи тетрахлорида титана повышают до 320 кг/ч.

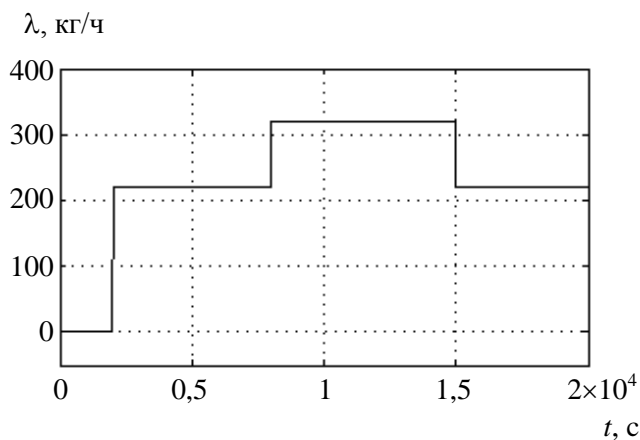


Рис. 2. График изменения скорости подачи тетрахлорида титана в промышленный аппарат восстановления

На рис. 3 приведена структурная схема для имитационного исследования режимов работы системы управления температурой зоны экзотермической реакции, составленная с учетом передаточных функций (10), (11), (12) и графика (см. рис. 2). Исследования выполнены в пакете MatLab.

Возмущения по изменению скорости подачи тетрахлорида титана, представленные на рис. 2, реализованы в системе управления с помощью блока Stair Generator, который позволяет в указанные моменты времени наносить необходимые возмущающие воздействия.

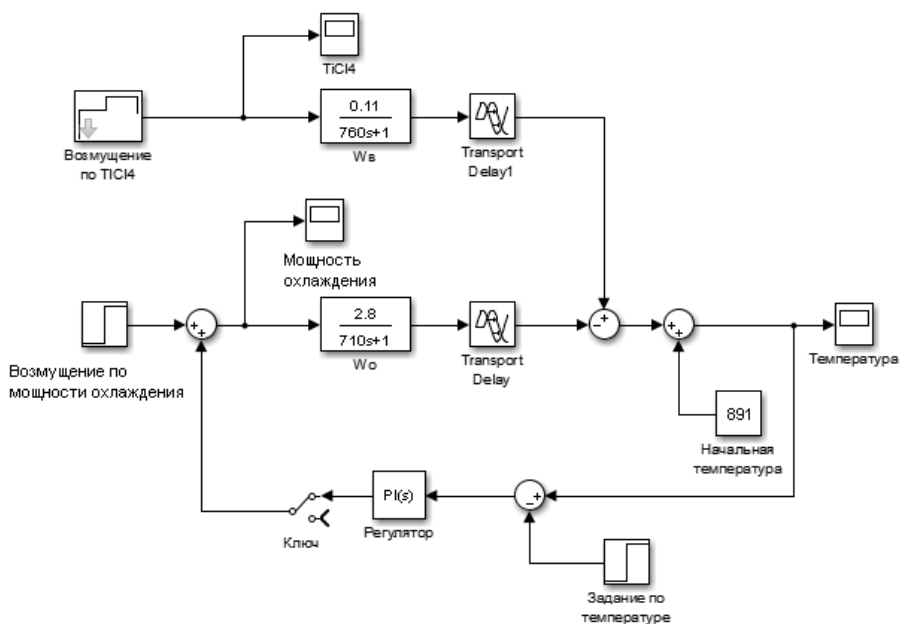


Рис. 3. Simulink-модель управления температурой зоны экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления

При разомкнутом в Simulink-модели ключе график изменения температуры зоны экзотермической реакции показан на рис. 4.

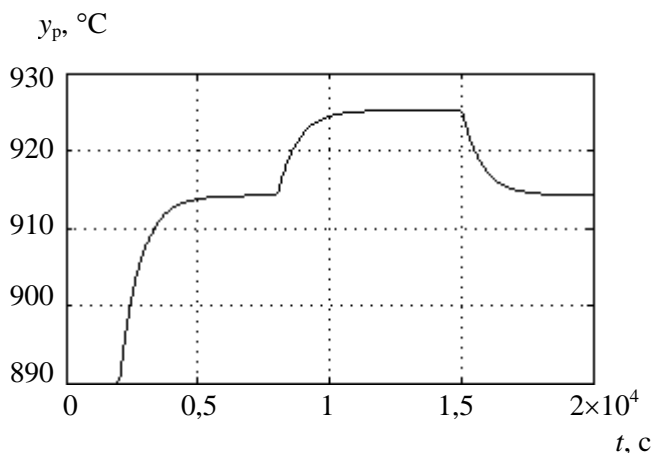


Рис. 4. График изменения температуры в разомкнутой системе управления зоной экзотермической реакции аппарата восстановления

Как видно из рисунка, при отключенном регуляторе температура зоны экзотермической превышает установленное технологическое ограничение 900 °С.

В замкнутой системе управления регулятор поддерживает заданную температуру зоны экзотермической реакции (рис. 5) изменением мощности воздушного охлаждения зоны (рис. 6) в зависимости от скорости подачи в аппарат восстановления тетрахлорида титана (см. рис. 2).

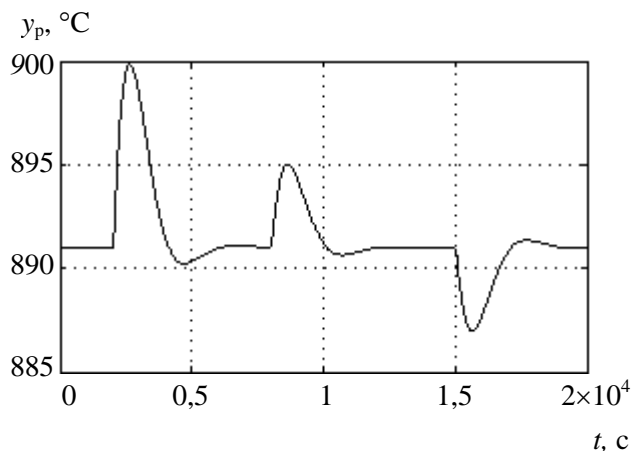


Рис. 5. Переходные процессы в системе управления температурой зоны экзотермической реакции аппарата восстановления $y_p(t), ^\circ\text{C}$

Как видно из рис. 5, максимальная ошибка регулирования температуры (9°C) наблюдается в начальной стадии процесса восстановления. Рассчитанное по соотношению (5) гарантирующее заданное значение температуры зоны экзотермической реакции составляет 891°C .

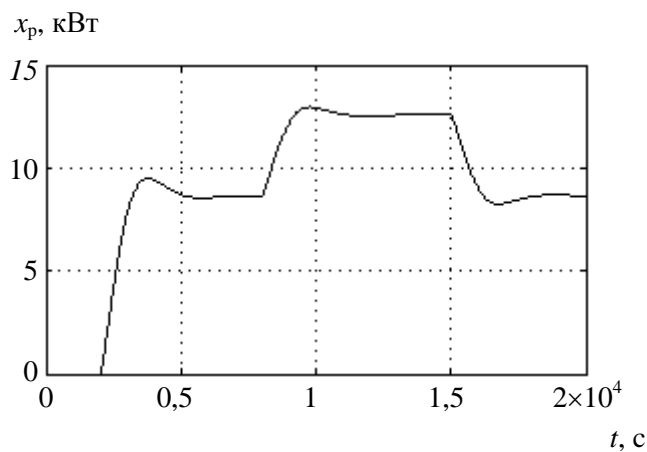


Рис. 6. График изменения мощности воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции аппарата восстановления

Таким образом, предложенная система управления позволяет повысить качество управления температурой зоны экзотермической реакции по сравнению с действующей системой двухпозиционного регулирования [16]: ошибка регулирования снижается с 29 до 9°C, повышается гарантирующее заданное значение температуры с 871 до 891°C, обеспечивается режим непрерывного изменения мощности воздушного охлаждения зоны экзотермической реакции в зависимости от скорости подачи в аппарат тетрахлорида титана.

Заключение

Синтезирована робастная система управления процессом восстановления тетрахлорида титана магнием с типовым линейным регулятором, обеспечивающая повышение качества управления температурой зоны экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления. Практическая реализация системы управления позволит повысить производительность процесса восстановления тетрахлорида титана магнием и снизить энергозатраты.

Библиографический список

1. Родякин В.В., Гегер В.Э., Скрыпнюк В.М. Магниетермическое производство губчатого титана. – М.: Металлургия, 1971. – 216 с.
2. Листопад Д.А. Усовершенствование магниетермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – № 3/1(5). – С. 13–14.
3. Нечаев В.Н., Цаплин А.И. Обзор способов получения губчатого титана // Титан. – 2015. – №3 (49). – С. 4–13.
4. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд // Титан. – 2003. – № 2 (13). – С. 11–16.
5. Интенсификация технологического режима процесса восстановления в аппарате производительностью 4,5–5 т губчатого титана за цикл / А.Б. Танкеев, Д.А. Рымкевич, О.А. Путина [и др.] // Титан. – 2007. – № 1. – С. 3–8.
6. Тарасов А.В. Металлургия титана. – М.: Академкнига, 2003. – 328 с.
7. Путин А.А., Путина О.А. О нерасслоении магния и хлорида магния в аппаратах для получения титана // Титан. – 1993. – № 3. – С. 5–7.

8. Тихонов В.А., Лебедев А.А., Кирин Ю.П. Эвристические методы совершенствования процесса восстановления титана // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 236–242.

9. Нечаев В.Н. Тепломассоперенос в реакторе получения пористого титана магниетермическим методом: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2014. – 109 с.

10. Теймуразов А.С., Фрик П.Г. Численное исследование конвекции расплавленного магния в аппарате восстановления титана // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 433–444.

11. Карасев Т.О., Теймуразов А.С. Моделирование турбулентной конвекции жидкого магния в аппарате восстановления титана в рамках подходов RANS И LES // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 353–365.

12. Карасев Т.О., Теймуразов А.С., Перминов А.В. Численное исследование теплоотдачи стенки титанового реактора при воздушном охлаждении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 424–436.

13. Электромагнитные измерения уровня жидкого металла в замкнутых объемах / Р.И. Халилов, С.Ю. Хрипченко, П.Г. Фрик [и др.] // Измерительная техника. – 2007. – № 8. – С. 41–44.

14. Inductive system for reliable magnesium level detection in a titanium reduction reactor / N. Krauter, S. Eckert, T. Gundrum, F. Stefani, T. Wondrak, P. Frick, R. Khalilov, A. Teimurazov // Metall. Mater. Trans. B. – 2018. – Vol. 49. – P. 2089–2096.

15. 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.

16. Кирин Ю.П., Тихонов В.А. Робастное управление процессом восстановления тетрахлорида титана магнием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 118–135.

17. Пушкарев М.И., Гайворонский С.А. Параметрический синтез ПИ-регулятора линейной САУ на основе коэффициентных оценок степени устойчивости и заданной добротности // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 320, № 5. – С. 85–89.

18. Ezangina T.A., Gayvoronskiy S.A. Robust control of complex dynamic units with interval parameters // IEEE Proceedings of 2nd International Conference on Systems and Computer Science (ICSCS 2013). – France, 26–27 August 2013. – P. 201–204.

19. Лютов А.Г. Оптимизация систем управления сложными мехатронными объектами в условиях структурно-параметрической неопределенности // Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – № 2. – С. 15–25.

20. Кабальнов Ю.С., Лютов А.Г., Насибуллин Ф.Г. Синтез систем управления в условиях интервальной параметрической неопределенности // Известия вузов. Авиационная техника. – 2000. – № 1. – С. 7–10.

21. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. – М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.

22. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии: справочник / сост. М.Д. Климовицкий, А.П. Копелович. – М.: Металлургия, 1967. – 467 с.

23. Туринский З.М. Регулятор температуры прокатки материала во вращающейся печи барабанного типа // Цветные металлы. – 2000. – № 11–12. – С. 111–115.

24. Туринский З.М. Управление металлургическими объектами с высокопараметрической динамикой // Цветные металлы. – 2001. – № 9–10. – С. 102–108.

25. Голинко И.М., Кулаков Г.Т., Ковриго Ю.М. Методы расчета оптимальных настроек систем управления по каналу возмущения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 5. – С. 61–72.

26. Кирин Ю.П. Изучение реакции восстановления четыреххлористого титана магнием в промышленных аппаратах // Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона: сб. науч. тр. – Березники: Изд-во БФ ПГТУ, 1998. – Вып. 1. – С. 35–40.

References

1. Rodiakin V.V., Geger V.E., Skrypniuk V.M. Magnietermicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana [Magnesium thermal production of titanium sponge]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 216 p.

2. Listopad D.A. Usovershenstvovanie magnietermicheskogo protsessa polucheniia titana gubchatogo s tsel'iu snizheniia postupleniia

primesei [Improvement of the magnesium-thermal process of obtaining titanium sponge in order to reduce the intake of impurities]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2012, no. 3/1(5), pp. 13-14.

3. Nechaev V.N., Tsaplin A.I. Obzor sposobov polucheniia gubchatogo titana [Review of methods for producing spongy titanium]. *Titan*, 2015, no. 3 (49), pp. 4-13.

4. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Sovremennye napravleniia sovershenstvovaniia i razvitiia proizvodstva gubchatogo titana [Modern directions of improvement and development of titanium sponge production]. *Titan*, 2003, no. 2 (13), pp. 11-16.

5. Tankeev A.B., Rymkevich D.A., Putina O.A. et al. Intensifikatsiia tekhnologicheskogo rezhima protsessa vosstanovleniia v apparate proizvoditel'nost'iu 4,5-5 t gubchatogo titana za tsikl [Intensification of the technological regime of the reduction process in an apparatus with a capacity of 4.5–5 tons of spongy titanium per cycle]. *Titan*, 2007, no. 1, pp. 3-8.

6. Tarasov A.V. Metallurgiiia titana [Titanium metallurgy]. Moscow: Akademkniga, 2003, 328 p.

7. Putin A.A., Putina O.A. O nerassloenii magniia i khlorida magniia v apparatakh dlia polucheniia titana [On non-segregation of magnesium and magnesium chloride in devices for obtaining titanium]. *Titan*, 1993, no. 3, pp. 5-7.

8. Tikhonov V.A., Lebedev A.A., Kirin Iu.P. Evristicheskie metody sovershenstvovaniia protsessa vosstanovleniia titana [Heuristic methods of improving the process of titanium recovery]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2014, no. 3, pp. 236-242.

9. Nechaev V.N. Teplomassoperenos v reaktore polucheniia poristogo titana magnietermicheskim metodom [Heat and mass transfer in the reactor for the production of porous titanium by the magnesium thermal method]. Ph. D. thesis. Perm', 2014, 109 p.

10. Teimurazov A.S., Frik P.G. Chislennoe issledovanie konveksii rasplavlennogo magniia v apparate vosstanovleniia titana [Numerical study of convection of molten magnesium in a titanium reduction apparatus]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 433-444.

11. Karasev T.O., Teimurazov A.S. Modelirovanie turbulentnoi konveksii zhidkogo magniia v apparate vosstanovleniia titana v ramkakh podkhodov RANS I LES [Simulation of turbulent convection of liquid magnesium in a titanium reduction apparatus within the RANS and LES approaches]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 353-365.

12. Karasev T.O., Teimurazov A.S., Perminov A.V. Chislennoe issledovanie teplootdachi stenki titanovogo reaktora pri vozdushnom okhlazhdenii [Numerical study of heat transfer from the wall of a titanium reactor with air cooling]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 424-436.

13. Khalilov R.I., Khripchenko S.Iu., Frik P.G. et al. Elektromagnitnye izmereniia urovnia zhidkogo metalla v zamknutykh ob"emakh [Electromagnetic measurements of the liquid metal level in closed volumes]. *Izmeritel'naia tekhnika*, 2007, no. 8, pp. 41-44.

14. Krauter N., Eckert S., Gundrum T., Stefani F., Wondrak T., Frick P., Khalilov R., Teimurazov A. Inductive system for reliable magnesium level detection in a titanium reduction reactor. *Metall. Mater. Trans. B*, 2018, vol. 49, pp. 2089-2096.

15. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Kachestvennyi analiz dinamiki pozitsionnogo regulirovaniia temperatury protsessa vosstanovleniia titana [Qualitative analysis of the dynamics of positional temperature control of the titanium reduction process]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2008, no. 10, pp. 54-56.

16. Kirin Iu.P., Tikhonov V.A. Robastnoe upravlenie protsessom vosstanovleniia tetrakhlorida titana магнием [Robust control of the process of reduction of titanium tetrachloride with magnesium]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektro-tekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 29, pp. 118-135.

17. Pushkarev M.I., Gaivoronskii S.A. Parametricheskii sintez PI-regulatora lineinoi SAU na osnove koeffitsientnykh otsenok stepeni ustoichivosti i zadannoi dobrotnosti [Parametric synthesis of a PI-controller of a linear ACS based on coefficient estimates of the degree of stability and a given quality factor]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 320, no. 5, pp. 85-89.

18. Ezangina T.A., Gayvoronskiy S.A. Robust control of complex dynamic units with interval parameters. *IEEE Proceedings of 2nd International Conference on Systems and Computer Science (ICSCS 2013)*. France, 26-27 August 2013, pp. 201-204.

19. Liutov A.G. Optimizatsiia sistem upravleniia slozhnymi mekhatronnymi ob"ektami v usloviiakh strukturno-parametricheskoi neopredelennosti [Optimization of control systems for complex mechatronic

objects in conditions of structural - parametric uncertainty]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2006, no. 2, pp. 15-25.

20. Kabal'nov Iu.S., Liutov A.G., Nasibullin F.G. Sintez sistem upravleniia v usloviakh interval'noi parametriceskoi neopredelennosti [Synthesis of control systems in conditions of interval parametric uncertainty]. *Izvestiia vuzov. Aviatsonnaia tekhnika*, 2000, no. 1, pp. 7-10.

21. Kopelovich A.P. Inzhenernye metody rascheta pri vybore avtomaticheskikh regulatorov [Engineering calculation methods when choosing automatic controllers]. Moscow: Metallurgizdat, 1960, 190 p.

22. Klimovitskii M.D., Kopelovich A.P. Avtomaticheskii kontrol' i regulirovanie v chernoi metallurgii: spravochnik [Automatic control and regulation in ferrous metallurgy: handbook]. Moscow: Metallurgii, 1967, 467 p.

23. Turinskii Z.M. Regulator temperatury prokalki materiala vo vrashchaiushcheisia pechi barabannogo tipa [Regulator of material calcination temperature in a rotary drum-type furnace]. *Tsvetnye metally*, 2000, no. 11-12, pp. 111-115.

24. Turinskii Z.M. Upravlenie metallurgicheskimi ob'ektami s vysokoparametriceskoi dinamikoi [Management of metallurgical objects with high-parameter dynamics]. *Tsvetnye metally*, 2001, no. 9-10, pp. 102-108.

25. Golinko I.M., Kulakov G.T., Kovrigo Iu.M. Metody rascheta optimal'nykh nastroek sistem upravleniia po kanalu vozmushcheniia [Methods for calculating the optimal settings of control systems for the perturbation channel]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2014, no. 5, pp. 61-72.

26. Kirin Iu.P. Izuchenie reaktsii vosstanovleniia chetyrekhkhloristogo titana magniem v promyshlennykh apparatakh [Study of the reaction of reduction of titanium tetrachloride with magnesium in industrial devices]. *Nauka v reshenii problem Verkhnekamskogo promyshlennogo regiona. Sbornik nauchnykh trudov*. Berezniki: Bereznikovskii filial Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1998, iss. 1, pp. 35-40.

Сведения об авторах

Кирин Юрий Петрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, ул. Тельмана, 7, e-mail: u.p.kirin@yandex.ru).

Бильфельд Николай Васильевич (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, ул. Тельмана, 7, e-mail: atp@bf.pstu.ru).

Тихонов Вячеслав Александрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии и экологии Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, ул. Тельмана, 7, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

About the authors

Yuri P. Kirin (Berezniki, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of the Bereznikovsky Branch of the Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telman str., e-mail: u.p.kirin@yandex.ru).

Nikolai V. Bilfeld (Berezniki, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes of the Bereznikovskiy Branch of the Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telman str., e-mail: atp@bf.pstu.ru).

Vyacheslav A. Tikhonov (Berezniki, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of the Bereznikovsky Branch of the Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telman str., e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

Поступила 31.10.2021

Одобрена 25.01.2022

Принята к публикации 20.06.2022

Финансирование. Исследование не имеет спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов при публикации статьи.

Вклад авторов. Все авторы сделали равнозначный вклад в настоящую работу при подготовке публикации.