



СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ

Ю.В. Шариков, Ф.Ю. Шариков

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: yvshar@mail.ru

***Аннотация.** В статье рассматриваются проблемы управления технологическими объектами с распределенными параметрами и большим временем запаздывания. Рассмотрены особенности построения систем управления с использованием модели объекта в контуре управления. Показано, что для построения моделей химико-технологических объектов наиболее эффективным подходом является метод калориметрии теплового потока, используемый для построения кинетических моделей процессов в многофазных системах, а также применение упрощенных гидродинамических моделей для описания процессов переноса в движущихся потоках. Показано успешное применение рассмотренного подхода для создания математических моделей, и использования их в системах управления для двух важных промышленных процессов: процесса обжига шихты при получении цементного клинкера в трубчатых вращающихся печах и процесса модификации эпоксидных смол бутандиолом для получения эпоксидных полимеров с улучшенными физико-механическими характеристиками. Полученные математические модели позволили определить оптимальные режимы рассматриваемых процессов и улучшить критерий качества их функционирования.*

***Ключевые слова:** объекты с запаздыванием, модели для управления, кинетика, калориметрия, цементный клинкер, эпоксидные смолы.*

Введение

Замкнутые системы управления по отклонению, работающие с использованием обратной связи, получили наибольшее распространение во всех отраслях промышленности [1-5]. Однако они не могут успешно использоваться для управления объектами с распределенными параметрами, которые характеризуются большим временем запаздывания. [6-8]. Такие объекты, как трубчатые и колонные реакторы, кожухотрубчатые теплообменники, колонны разделения, в которых управляемой величиной является состав выходной смеси, относятся к объектам с распределенными параметрами. Они имеют большое время запаздывания практически по всем каналам управления. Кроме того, управление по отклонению не всегда может быть использовано при управлении потенциально-опасными объектами, для которых отклонения от заданных регламентных норм недопустимо из соображений безопасности [8, 9].

Управление с использованием математической модели

Для управления такого типа объектами с распределенными параметрами необходимо использовать

предикативные системы управления, которые вырабатывают управляющие воздействия, обеспечивающие компенсацию поступающих возмущений в процессе их прохождения по регулирующему каналу. Выработка такого управляющего сигнала основана на анализе входных переменных объекта и точного знания порядка преобразования входных переменных в выходные. При наличии этой информации можно использовать методы расчета управляющих воздействий, учитывающие передаточные функции прохождения возмущения по объекту и по каналу регулирования. [5-7]. В этом случае система регулирования может вырабатывать управляющее воздействие, обеспечивающее поддержание управляемой величины (критерия эффективности) системы на заданном уровне. При наличии вычислительной техники в контуре управления можно использовать математическую модель, прогнозирующую поведение объекта под действием поступающих возмущений. В этом случае такая система управления называется системой управления с «быстрой» моделью в контуре управления. Решение уравнений модели позволяет гораздо быстрее получить предполагаемый отклик объекта, проанализировать его и выработать управляющее воздействие, поз-

воляющее компенсировать возможное отклонение регулируемых величин от заданного уровня.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема системы управления, с «быстрой» моделью в контуре управления, обеспечивающая выработку оптимальных управляющих воздействий при поступлении различных возмущений на вход объекта.

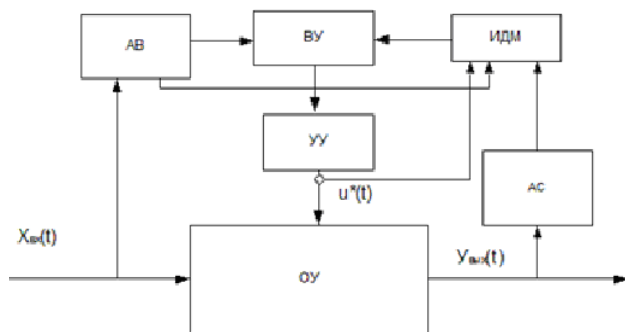


Рис. 1. Структурная схема управления по возмущению с использованием «быстрой» модели объекта в контуре управления: ОУ – объект управления; УУ - устройство управления; АВ – анализатор входа; АС – анализатор выходных переменных объекта управления; ИДМ – устройство идентификации модели; ВУ – вычислительное устройство для вычисления оптимального управления объектом.

Входные переменные объекта проходят через устройство АВ – анализатор возмущений, с которого характеристики вектора входных переменных и характеристики возмущений поступают в вычислительное устройство ВУ и в устройство идентификации модели ИД. Выходные переменные объекта поступают в анализатор выходных переменных состояния АС, результаты анализа поступают в устройство идентификации модели ИД. В это же устройство поступает информация о текущем значении вектора управляющих воздействий. В устройстве идентификации модели ИД производится решение «обратной задачи» и уточняются коэффициенты модели. При этом обязательно учитывается время запаздывания объекта, с тем, чтобы каждому выходному состоянию объекта поставить в соответствие именно то значение вектора входных переменных и вектора управления, которое соответствует данному значению выходных переменных с учетом времени запаздывания объекта. Это очень важная особенность процесса идентификации. Фактическое время запаздывания определяется, либо с использованием результатов пассивного эксперимента, по данным корреляционного анализа получаемых характеристик выходных и входных переменных, либо с применением метода активного эксперимента. В этом случае на вход объекта наносятся специальным образом спланированные возмущения, затем можно проследить за их проявлением в характеристиках выходных переменных и определить точное значение времени запаздывания по различным каналам. После идентификации модель передается в вычислительное устройство, в котором определяются оптимальные значения управляющих воздействий, соответствующих данному, текущему значению входных переменных. Такая схема управления в настоящее время ши-

роко применяется для управления сложными и ответственными объектами, характеризующимися разнообразным характером возмущения входных переменных. На основании опыта функционирования такой системы, устанавливаются те отклонения от результатов предсказания модели, после которых необходимо делать процедуру идентификации. Это позволяет проводить процедуру идентификации модели не так часто и за счет этого повысить быстродействие системы управления.

Создание моделей для управления

При создании таких систем управления для проектируемых производств очень важно использовать детальную модель объекта, обладающую свойством прогнозируемости в широком диапазоне изменения переменных. Для этого весьма перспективным методом является создание детерминированных моделей объекта с использованием гидроародинамики и кинетики химических реакций. В качестве гидродинамических моделей используют типовые гидродинамические модели, а при невозможности описания структуры потоков в аппаратах с помощью простых моделей, применяют комбинированные модели. Для создания кинетической части модели объекта перспективным является использование методов калориметрии теплового потока.

Использование калориметрии для исследования кинетики химических реакций основано на том, что скорость тепловыделения связана со скоростями химических реакций следующим образом:

$$\frac{dQ_{gen}}{dt} = \sum w_{ij} H_j; \quad (1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \sum_{j=1}^R \sum_{i=1}^N w_{ij}; \quad (2)$$

$$w_{ij} = -k_j \cdot \prod_{i=1}^{N_r} c_i^{n_i} + k_{-j} \cdot \prod_{i=N_r+1}^{N_p} c_i^{n_i}, \quad (3)$$

где Q_{gen} – общее количество поглощенного (или выделенного) тепла в химическом процессе, кДж; w_{ij} – скорость реакции превращения i -го компонента реакционной смеси в j -ой химической реакции, кмоль/м³·мин; $k_j = \exp[\ln(k_{0,j}) - (E_j/R/T)]$ – константа скорости прямой реакции; $k_{-j} = \exp[\ln(k_{0,-j}) - (E_{-j}/R/T)]$ – константа скорости обратной реакции; H_j – тепловой эффект j -й химической реакции, кДж/кмоль; t – текущее время процесса, мин.

Процедура, обычно используемая для определения кинетических параметров (предэкспоненциальных множителей, энергий активации), заключается в подборе кинетических параметров из условия минимального рассогласования между экспериментальными данными и результатами математического моделирования процесса. В качестве меры такого рассогласования применяют обычно сумму квадратов отклонений между экспериментальными и расчетными данными. При этом величина этого рассогласования зависит от кинетических параметров. Тогда задача поиска кинетических параметров сводится к задаче минимизации суммы квадратов отклонений R как функции кинетических параметров u_p .

$$R = \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \left(X_{k,s}^{(расч)} - X_{k,s}^{(эксп)} \right)^2 = R(u_p), \quad (4)$$

где k – индекс положения экспериментальной точки на временной кривой; s – индекс замеряемой переменной состояния в кинетической модели; K – число экспериментальных точек на временной кривой; S – число замеряемых переменных состояния математической модели; u_p – искомые кинетические параметры – предэкспоненты, энергии активации и порядки реакций по компонентам.

В качестве метода поиска экстремума функции рассогласования используют обычно различные варианты метода нелинейного программирования. Значения расчетных значений переменных состояния обычно получают путем численного решения уравнений кинетической модели при некотором значении кинетических параметров. В качестве метода численного решения уравнений кинетической модели применяют либо различные модификации метода Рунге-Кутты, либо методы численного интегрирования жестки систем дифференциальных уравнений типа метода LSODA.

Если полученная таким образом модель является слишком сложной для реализации, и поиск оптимальных условий с использованием такой модели требует больших затрат машинного времени, можно преобразовать такую модель к форме линейного уравнения с применением метода планирования эксперимента. Полученная таким образом модель требует гораздо меньше времени для решения и имеет несравненные преимущества перед моделью, полученной методом пассивного эксперимента – в такой модели коэффициенты линейного уравнения регрессии не содержат смешанных эффектов, каждый коэффициент уравнения отражает действие соответствующей переменной. Кроме того, поскольку такая модель получена из детерминированной модели, она обладает хорошей прогнозирующей способностью даже за пределами области линеаризации.

С использованием изложенного подхода была разработана математическая модель процессов обжига шихты во вращающихся трубчатых печах [10, 11]. Модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентраций компонентов шихты и температур газовой и твердой фаз по длине трубчатой печи.

$$\begin{aligned} \frac{dc_i}{dl} &= \frac{1}{u_s} \sum_{j=1}^M w_{ij}; \\ \frac{dT_s}{dl} &= \frac{1}{u_s} \sum_{j=1}^M w_{i,j} \cdot Q_j - B_x(T_s - T_0) - \\ &- K_v \cdot F_v \left(\frac{T_s^3}{100} - \frac{T_g^3}{100} \right) \pm K_{con}(T_s - T_g) \pm K_{cep}(T_s - T_g); \\ \frac{dT_g}{dl} &= \frac{1}{u_g} K_{iF}(T_s - T_g) \pm K_{cep}(T_s - T_g) + \\ &+ K_{iF} \left(\frac{T_s^3}{100} - \frac{T_g^3}{100} \right); \\ \frac{dc_{gaspili}}{dl} &= G_s \frac{z + z'}{100}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_{con} &= K_{cep}, \text{ если } l \leq l_{cep}; \\ K_{con} &= K_{iF}, \text{ если } l \geq l_{cep}, \end{aligned}$$

где l – текущая длина печи, м; c_i – концентрация i -го компонента, кмоль/м³; u_s – скорость материала м/с; w_{ij} – скорость изменения концентрации i -го компонента в j -ой реакции кмоль/м³·с; T_g и T_s – температуры газовой и твердой фазы соответственно, К; z' – количество пыли, циркулирующее в печи, %; z – количество пыли уносимой из печи, %; T_0 – температура в печи, К; B_x – параметр теплообмена, м⁻¹; K_{cep} – коэффициент теплопереноса в зоне, где расположены цепи, Вт/(м²·К); l_{cep} – длина зоны печи, где расположены цепи, м; M – количество реакций, ед.; Q_j – тепловой эффект j -ой реакции кДж/кмоль; K_{iF} – коэффициент теплопереноса в зоне, свободной от цепей, Вт/(м²·К); $c_{gaspili}$ – концентрация пыли в газе, кмоль/м³; G_s – расход твердого материала в слое, кг/кг; K_{con} – параметр конвективного теплообмена; F_v – удельная поверхность излучения, м²/м³; K_v – объемный коэффициент излучения, l – длина печи, м.

В виду противотока фаз данная система дифференциальных уравнений представляет собой краевую задачу, с граничными условиями, заданными на разных концах интервала интегрирования. Полученная математическая модель использовалась для расчета оптимального температурного профиля твердой и жидкой фазы для текущих состояний входных и управляющих переменных. Для определения оптимального управления использовался метод кусочно-линейной аппроксимации оптимальных управляющих функций с последующим определением оптимальных управлений методом нелинейного программирования:

$$\begin{aligned} C_{цел.комн}(l) = F(T_1, \dots, T_N, l_1, \dots, l_N) \Rightarrow \max, \\ T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax} \end{aligned} \quad (6)$$

где $C_{цел.комн}(l)$ – концентрация целевого компонента по длине печи как функция температуры T_i в различных точках (l_1, \dots, l_N) из заданной области управления – $T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax}$.

На рис. 2 показан оптимальный профиль температуры, определенный для печи обжига цементной шихты, который используется в качестве задания для системы автоматического регулирования при использовании потока газа и потока воздуха в качестве управляющих воздействий [10, 11].

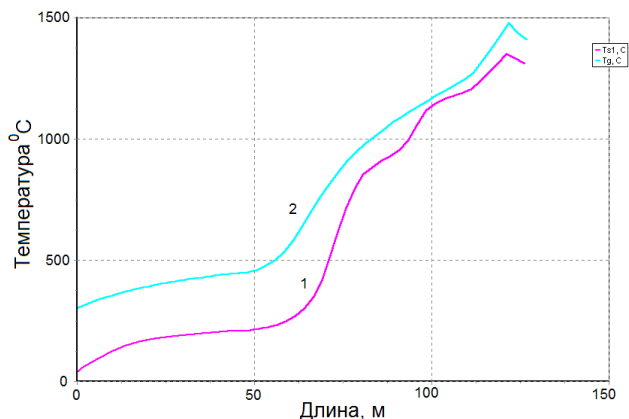


Рис. 2. Температурные профили газовой (2) и твердой (1) фазы при обжиге сырьевой смеси при получении цементного клинкера.

Значение критерия оптимизации при оптимальной температурном профиле на 15 % превышало значение критерия в исходной точке, что подтверждает эффективность использования предложенного метода оптимального управления процессом.

Для расширения функциональности и улучшения физико-механических характеристик эпоксидных полимеров используют модификацию эпоксидных смол бутандиолом. Исследования кинетики процессов модификации с использованием калориметрии теплового потока позволили получить математическую модель процесса в виде следующей системы дифференциальных уравнений [12]:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \frac{dC_j}{dt} = -C_j(w/V_r) + r_j; \\
 2) \quad & \frac{dC_{EPO}}{dt} = -C_{EPO}(w/V_r) + J_m/w + r_{EPO}; \\
 3) \quad & \frac{dV_r}{dt} = w; \\
 4) \quad & \frac{dV_{EPO}}{dt} = -w; \\
 5) \quad & \frac{dH}{dt} = H_{EPO} \frac{dV_{EPO}}{dt}; \\
 6) \quad & J_m = k_m \cdot 6 \cdot V_{0,EPO}^{1/3} V_{t,EPO}^{2/3} (C_s - C_{EPO}) / d_{k0}; \\
 7) \quad & w = J_m,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где, C_j – концентрации всех компонентов реакционной зоны, за исключением концентрации эпоксидных групп, кмоль/м³; C_{EPO} – концентрация эпоксидных групп в реакционной зоне, кмоль/м³; V_r – объем реакционной зоны, м³; V_{EPO} – объем эпоксидной смолы в реакторе, м³; J_m – мольный поток эпоксидных групп в реакционную зону, кмоль/м³; V – объемный поток в реакционную зону, м³/с; $d_{dr,0}$ – объем капель растворяющейся фазы в начальный момент времени, м; d_{EPO} – мольная плотность эпоксидных групп, кмоль/м³.

Все выделяющееся в ходе реакции тепло равномерно распределяется между обоими фазами, а теплообмен между фазами не учитывается.

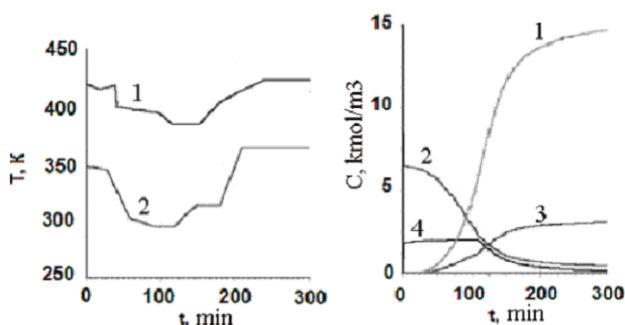


Рис. 3: а - Оптимальное управление процессом модификации эпоксидных смол во времени: 1 – температура паровой рубашки, 2 - температура охлаждающей воды в змеевике; б - изменение переменных состояния во времени при оптимальном управлении: 1 - Q суммарное тепловыделение, кДж/г, пропорциональное концентрации целевого компонента; 2 - HO-R-OH-Бутан диол, кмоль/м³; 3 - Na⁺ - натрий-ион, кмоль/м³; 4 - EPO – эпоксидная смола, кмоль/м³.

Таким образом, предложенная кинетическая модель процесса включает пять химических и одну массообменную стадию. На основании полученной модели была поставлена и решена задача определения температурного профиля, обеспечивающего оптимальную концентрацию целевого продукта (модифицированных эпоксигрупп) в конце процесса. В качестве управляющих воздействий выбраны температуры охлаждающей воды и греющего пара в реакторе, обеспечивающих реализацию оптимального температурного профиля, соответствующего текущим значениям входных переменных и возмущений. На рис. 3 приведено значение оптимальных управляющих воздействий, рассчитываемых в блоке BV (рис. 1), которые передаются в качестве задания в контроллер. Эта схема приведена на рис. 4.

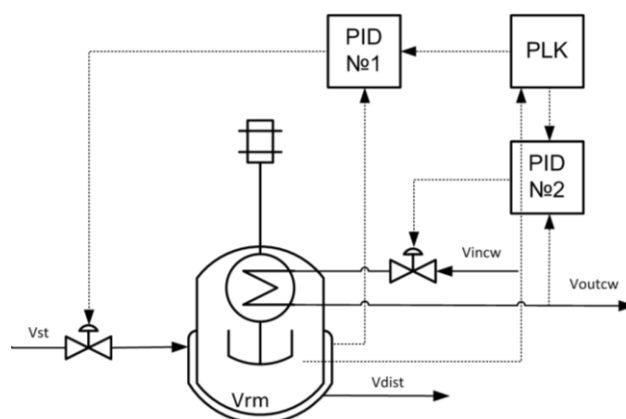


Рис. 4. Схема оптимального управления процессом модификации эпоксидных смол 1,4 – бутандиолом: V_{rm} – реактор модификации, V_{st} – вход греющего пара в рубашку, V_{dist} – выход дистиллята из рубашки, V_{incw} – вход охлаждающей воды в змеевик, V_{outcw} – выход охлаждающей воды из змеевика, $PID\ №1$ – регулятор температуры в рубашке, $PID\ №2$ – регулятор температуры в змеевике, PLK – программируемый логический контроллер.

Заключение

1. Проведен анализ управления сложными технологическими объектами с использованием «быстрой» модели процесса в контуре управления.
2. Показано, что использование калориметрии теплового потока позволяет создавать математические модели технологических объектов с высокой прогнозирующей способностью, так как такие модели, в совокупности с гидродинамическими моделями потоков, позволяют учитывать физико-химические и массообменные закономерности процессов и получать оптимальные управляющие воздействия.
3. Предложенный подход иллюстрирован примерами создания и использования детальных моделей сложных технологических объектов, созданных с использованием описанного метода.

Библиографический список

1. Власов, К.П. Теория автоматического управления, учебное пособие / К.П. Власов. – Харьков: Гуманитарный центр, 2006. – 531 с.

2. **Лазарева, Т.Я.** Основы теории автоматического управления, учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 352 с.
3. **Юревич, Е. И.** Теория автоматического управления, учебное пособие / Е.И. Юревич. СПб.: БХВ, 2007. – 326 с.
4. **Пупков, К.А.** Методы классической и современной теории автоматического управления, учебник. Т.4. 2-е изд., перераб. и доп. / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Баркин, Е.М. Воронов. М.: МГТУ, 2004. – 744 с.
5. **Бенькович, Е.С.** Практическое моделирование динамических систем / Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
6. **Мирошник, И.В.** Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы, учебное пособие / И.В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.
7. **Hsu, J.C.** Modern control principles and applications / J.C. Hsu, A.U. Meyer. New-York: McGraw-hill book company, 1972. – 544 с.
8. **Hsu, J.C.** Modern control principles and applications / J.C. Hsu, A.U. Meyer. – New-York: McGraw-hill book company, 1972. – 544 с.
9. **Bemporad, A.** Model predictive control / A. Bemporad, M. Morari, N.L. Ricker, MathWorks, 2010 – 205 с.
10. **Sharikov, Y.** Mathematical modeling of processes in the tubular rotary kiln / Y. Sharikov, F. Sharikov, O. Titov. // LAP, Germany, 2013.
11. **Sharikov, Y.V.** Optimization of process conditions in a tubular rotary kiln with applying TG/DSC technique and mathematical modeling, / Y.V. Sharikov, F.Y. Sharikov, O. V. Titov // Journ. Therm Anal Calorim. 2015. – 122: p. 1029-1040.
12. Sharikov, F.I. Kinetic study of modification of chlorine containing epoxy resin with using heat flux calorimetry / F.I. Sharikov, I.V. Sharikov // Международный научно-исследовательский журнал, 2014. – №5 (24). Ч. 1. – С. 129-132.

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS WITH USE OF MATHEMATICAL MODELS OF TECHNOLOGICAL OBJECTS IN A CONTROL CIRCUIT

Yu.V. Sharikov, F.Yu. Sharikov

The control problems of the technological objects with distributed state variables and with large dead time are discussed in the presented report. The features of building control systems with using the object model in the control loop are considered. It is shown that for the development of models of chemical-processing facilities the most effective approach is a method of heat flow calorimetry for the creation of kinetic models of processes in multiphase systems and the use of simplified simulation models to describe transport processes in a moving stream. Displaying the successful application of this approach to the creation of mathematical models and their use in control systems for the two important industrial processes - sintering process in the preparation of cement clinker in the tubular rotating kilns and for the modification process epoxy resins by butanediol to obtain epoxy polymers with improved physical and mechanical properties. These mathematical models have allowed to determine the optimal modes of the considered processes and to improve the processes of functioning quality criterion.

Keywords: objects with delay, models for control, kinetics, calorimetry, cement clinker, epoxy resins.