

УДК 62-503.57

А.В. Каляшина, А.В. Кочеров

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описан процесс автоматизации экспериментальной установки по производству сульфата алюминия с применением алгоритмов нечеткого регулирования. Составлена математическая модель процесса химической реакции с точки зрения теплового баланса. Синтезирован алгоритм нечеткого регулирования. Разработанный алгоритм позволяет поддерживать температуру экзотермической реакции в реакторе периодического действия. Для настройки регулятора была создана программа моделирования, написанная на языке Mathcad в программе Mathcad. Программа эмитирует реакцию в реакторе при заданных условиях и действии регулятора. В результате моделирования определено, что алгоритм управления на основе нечеткой логики не только позволяет обеспечить заданные параметры технологического процесса, но и сохранить приемлемые параметры точности и быстродействия объекта регулирования. Регулятор показал не плохую устойчивость к изменению параметров объекта управления без переналадки.

Ключевые слова: нечеткая логика, управление процессами в химическом производстве, сульфат алюминия, адаптивное управление.

Во всем мире остро стоит проблема очистки воды. Очистка воды идет в несколько этапов. Одним из этапов очистки является коагулирование. В процессе коагулирования природные воды подвергаются глубокой физико-химической очистке. Принцип коагулирования основан на том, что свежеприготовленные гидроксиды металлов (например  $Al(OH)_3$ ) в виде студенистого осадка образуют коллоидные соединения, которые затем коагулируют (отделяются от жидкой фазы) и уносят с собой в осадок взвешенные в воде частицы и растворенные вещества.

Наиболее перспективным методом повышения рентабельности производства сульфата алюминия является снижение себестоимости за счет замены дорогостоящего гидроксида алюминия на альтернативные дешевые источники сырья.

В качестве альтернативного сырья для производства сульфата алюминия наибольший интерес представляет отход алюминиевой промышленности – алюмосодержащий кек. Кек образуется на предприятиях по извлечению вторичного алюминия.

С ростом интереса к алюминию как к одному из наиболее ликвидных металлов на мировом рынке развивается направление по извлечению вторичного алюминия. Расширяются полигоны для складирования солевых кеков, затрачиваются денежные средства для обслуживания и содержания.

В России химиком В.Н. Захаревским разработана технология получения сульфата алюминия из солевых кеков. Технология получения сульфата алюминия из алюмосодержащих кеков защищена патентом Российской Федерации №2315715.

Для отладки технологии переработки солевых кеков была создана слабо автоматизированная опытно-промышленная установка мощностью 40 т/мес.

Одним из самых важных этапов в производстве сульфата алюминия является варка солевого кека в серной кислоте.

Стабилизация температуры в реакторе является важным условием технологического процесса. Эмпирическое правило Вант-Гоффа гласит: при изменении температуры реакции на 10 К скорость реакции возрастает в 2-4 раза. Из этого следует, что при небольших изменениях температуры время реакции может значительно меняться[1-4].

Энергетический баланс в реакторе описывается уравнением

$$V \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = -V \cdot \Delta H \cdot \frac{k}{3} C_{H_2SO_4} \cdot e^{-k \cdot t} - \frac{T - T_0}{R_t} + P(t),$$

где  $P(t)$  - тепловой поток нагревателя  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right]$ ;

$V$  - объем системы  $[\text{м}^3]$ ;

$C_p$  - теплоемкость единицы объема при постоянном давлении  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{м}^3} \right]$ ;

$T$  - температура  $[\text{К}]$ ;

$\Delta H$  - приращение энтальпии в результате реакции  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \right]$ ;

$C_{H_2SO_4}$  - мгновенная концентрация серной кислоты  $\left[ \frac{\text{моль}}{\text{м}^3} \right]$ ;

$k$  - константа скорости реакции  $\left[ \frac{1}{\text{с}} \right]$ ;

$R(t)$  - скорость реакции  $\left[ \frac{\text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \right]$ ;

$Q(t)$  - тепловые потери  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right]$ .

Уравнение теплового баланса относительно  $T$  является трансцендентным дифференциальным уравнением. Решить это уравнение возможно только численно.

Регулируя мощность  $P(t)$ , выделяемую нагревателем, можно влиять на скорость реакции и температуру в реакторе. Вычисление функции управления методами классической теории управления не представляется возможным из-за сложности выражения энергетического баланса.

Для вычисления функции управления  $P(t)$  были использованы методы нечеткой логики. Математический аппарат нечеткой логики позволяет строить логико-лингвистические модели, отражающие общую смысловую постановку задачи, используя качественные представления, соответствующие "человеческим" способам рассуждений и принятия решений [5].

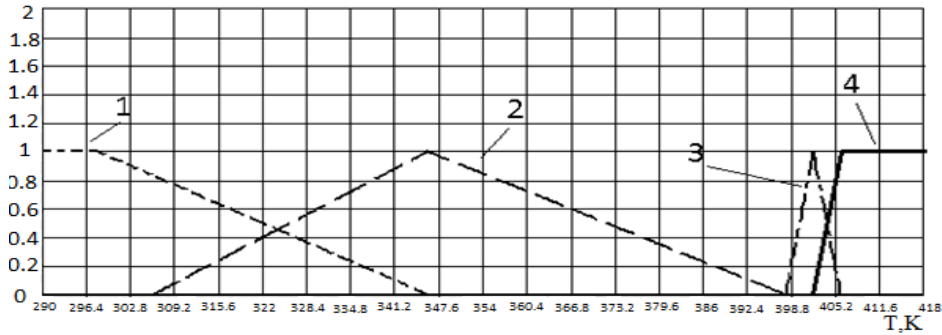
Для решения задачи были определены три нечеткие переменные (табл. 1).

Таблица 1

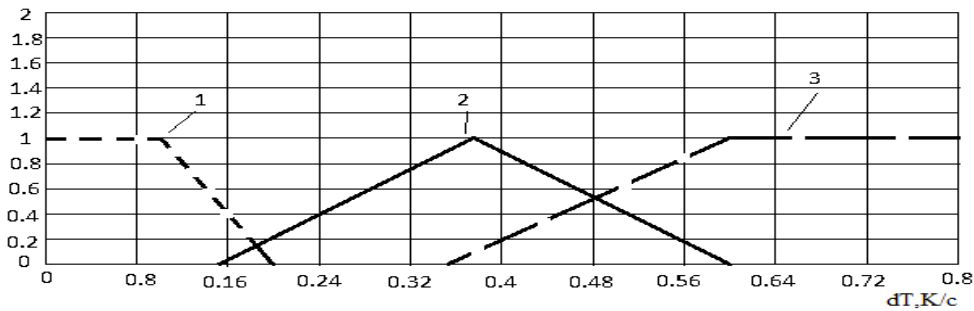
Значения лингвистических переменных

Входные переменные	Температура	Низкая, Средняя, Норма, Высокая
	Производная от температуры	Низкая, Средняя, Высокая
Выходная переменная	Коэффициент заполнения для ШИМ	Низкий, Средний, Высокий

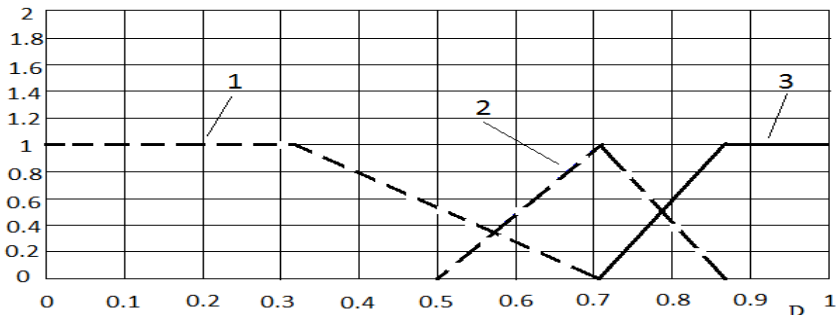
Функции принадлежности переменных представлены на рис. 1–3.



**Рис. 1. Функции принадлежности переменной "температура":**  
 1 - низкая; 2 - средняя; 3 - норма; 4 - высокая



**Рис. 2. Функции принадлежности переменной "производная температуры":**  
 1 - низкая; 2 - средняя; 3 - высокая



**Рис. 3. Функции принадлежности переменной "коэффициент заполнения":**  
 1 - низкий; 2 - средний; 3 - высокий

Перейдем к рассмотрению механизма нечеткого вывода. Механизм нечеткого логического вывода в своей основе имеет базу знаний, формируемую специалистами предметной области в виде совокупности нечетких правил.

База знаний нечеткого регулятора состоит из восьми правил:

1. Если  $T$  есть "Низкая", то  $D$  есть "Высокая".
2. Если  $T$  есть "Средняя" и  $dT$  есть "Низкая", то  $D$  есть "Высокая".
3. Если  $T$  есть "Средняя" и  $dT$  есть "Средняя", то  $D$  есть "Средняя".
4. Если  $T$  есть "Средняя" и  $dT$  есть "Высокая", то  $D$  есть "Средняя".
5. Если  $T$  есть "Высокая", то  $D$  есть "Низкая".
6. Если  $T$  есть "Норма" и  $dT$  есть "Средняя", то  $D$  есть "Низкая".
7. Если  $T$  есть "Норма" и  $dT$  есть "Высокая", то  $D$  есть "Низкая".
8. Если  $T$  есть "Норма" и  $dT$  есть "Низкая", то  $D$  есть "Низкая".

Логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа.

## 1. Введение нечеткости (фаззификация, fuzzification).

Для четко заданных входных значений рассчитываются принадлежности к отдельным термам.

Для рассматриваемого примера определяют численные значения

$$\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_i}(y_0), \quad i = 1, 2, \dots$$

2. Нечеткая импликация. Находят функции принадлежности предпосылок каждого отдельного правила при конкретных входных сигналах  $x_0$  и  $y_0$ .

$$\alpha(i) = \mu_{A_i}(x_0) \cap \mu_{B_i}(y_0) \quad i = 1, 2, \dots$$

Затем находят результирующие функции принадлежности каждого правила

$$\mu_i(z) = \alpha_i \cap \mu_{C_i}(z_0) \quad i = 1, 2, \dots$$

3. Нечеткая композиция. Находится результирующая функция принадлежности всей совокупности правил при входных сигналах  $x_0$  и  $y_0$ .

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_1 \cup \mu_2 \cup \dots \cup \mu_n.$$

## 4. Приведение к четкости (дефаззификация, denazification).

Имеется большое количество методов дефаззификации, но в данном случае был использован метод первого максимума. Метод заключается в том, что ищется наименьшее значение аргумента функции-решения, при котором она принимает наибольшее значение. Иными словами, ищется такой аргумент, при котором функция принимает наибольшее значение первый раз.

В приведенном алгоритме логические операции пересечение реализуется как  $\min$ , а объединение – как  $\max$ , то данный алгоритм называется алгоритмом Мамдани (в некоторых источниках алгоритмом Мамдани-Заде).

Для настройки регулятора была создана программа моделирования, написанная на языке Mathcad в программе Mathcad. Программа эмитирует реакцию в реакторе при заданных условиях и действии регулятора.

Моделирование производилось для нагревателей мощностью 1 кВт, 1.5 кВт, 2 кВт. Стандартная загрузка составляет 40 моль вещества. Результаты представлены на рис. 6.

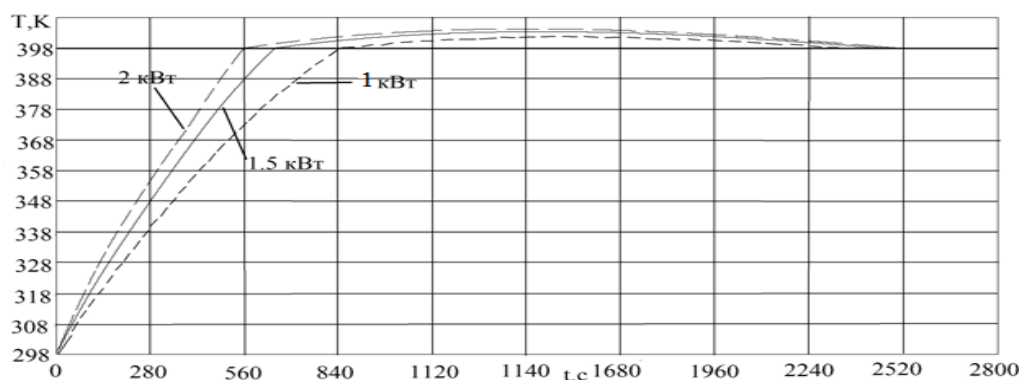


Рис. 4. Переходный процесс при различных мощностях нагревателя (загрузка 70 моль)

При загрузке 10 и 40 моль перерегулирования не наблюдается. При загрузке 70 моль имеет место перерегулирование 5 К.

### Выводы

В результате моделирования определено, что алгоритм управления на основе нечеткой логики не только позволяет обеспечить заданные параметры технологического процесса, но и сохранить приемлемые параметры точности и быстродействия объекта регулирования. Регулятор показал неплохую устойчивость к изменению параметров объекта управ-

ления без переналадки. Во всех исследованных случаях температура не выходила за пределы допуска в 7К.

Данный алгоритм регулирования позволяет управлять процессом с заданной точностью и имеет достаточное быстродействие, а также может быть реализован в виде управляющей программы для ЭВМ без особых сложностей.

#### Библиографический список

1. **Закгейм, А.Ю.** Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю.Закгейм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1982. – 288 с.
2. **Кузьменко Н.Е.** Краткий курс химии: пособие для поступающих в вузы / Н. Е. Кузьменко. – М.: Химия, 1982.
3. **Заде, Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: [пер. с англ.] / Л. Заде; под ред. Н. Н. Моисеева. – М.: Мир, 1976. – 164 с.
4. **Штовба, С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
5. **Борисов, А.Н.** Принятие решений на основе нечетких моделей / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинятие, 1990. – 184 с.
6. **Усков, А.А.** Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики / А.А.Усков, В.В.Круглов. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.

*Дата поступления  
в редакцию 11.12.2014*

**A. V. Kalyashina, A. V. Kocherov**

#### **APPLICATION OF THE FUZZY CONTROL ALGORITHM IN ALUMINUM SULFATE PRODUCTION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

The article describes the process of automation of experimental station for aluminum sulfate production using the fuzzy control algorithms. A mathematical model of the chemical reaction process with relation to thermal balance is set up. The fuzzy regulation algorithm is synthesized. The set up algorithm allows maintaining the temperature of the exothermic interaction in the batch reactor. A modeling programme for the regulator adjustment is written in Mathcad in the Mathcad language. The programme imitates the reaction in the reactor at the set up conditions and operation of the regulator (controller). It is defined as a result of the modeling that the control algorithm based on the fuzzy logics not only allows to ensure the set up parameters of the technological process, but also to maintain the usable parameters of accuracy and operation speed of the controlled object. The controller showed good resistance to changes of the controlled object parameters with no readjustment.

*Key words:* fuzzy logics, chemical industry processes controlling, aluminum sulfate, adaptive control.