

УДК 666.942.2

## МЕТОДЫ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБЖИГОМ КЛИНКЕРА

**Беседин П.В., Новиченко А.В., Андрущак С.В.**

*ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
Белгород, e-mail: sg-bel@mail.ru*

В статье описана методология применения нечеткой логики и теории нечеткого управления для решения задачи управления процессом обжига клинкера. Данная в работе методика исследования состоит в представлении знаний с человеческой точки зрения в виде продукционных правил и обработке этих знаний с помощью методов теории нечетких множеств. На основе экспертных данных о технологических параметрах состояния печи были собраны нечеткие множества, для представления которых в аналитическом виде были построены функции принадлежности нечетких множеств. Используя полученные функции принадлежности, можно синтезировать систему нечеткого вывода для регулятора расхода топлива в цементную печь. Построенные функции принадлежности представляют собой нечеткую базу знаний, хранящую информацию о правилах управления процессом обжига клинкера. Полученные результаты исследований позволяют оценить основное преимущество нечеткого подхода – возможность формирования числа правил управления в зависимости от сочетания количества и значений входных переменных регулятора.

**Ключевые слова:** управление обжигом клинкера, методы нечеткой логики, нечеткие множества, функции принадлежности

## LINGUISTIC APPROXIMATION METHODS IN PROBLEMS OF CLINKER BURNING

**Besedin P.V., Novichenko A.V., Andruschak S.V.**

*Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: sg-bel@mail.ru*

The paper describes the methodology of application of fuzzy logic and fuzzy control theory to solve the problem management process clinker burning. The method presented in this paper describes the knowledge from the human point of view, in the form of production rules, and demonstrates their processing methods of the theory of fuzzy sets. Based on the expertise of the technological parameters of furnace were collected fuzzy sets, which are to be submitted in the form of analytical functions were constructed of fuzzy sets. Using these membership functions can be synthesized fuzzy inference system to control fuel flow to the cement kiln. Constructed membership function of fuzzy knowledge base contains information on how to regulate the process of clinker burning. The obtained results allow to assess the main advantage of fuzzy approach – the ability to control the formation of rules control depending on the combination of the input variables the regulator.

**Keywords:** control of the clinker burning, methods of fuzzy logic, fuzzy sets, membership functions

Многочисленные попытки автоматизировать управление цементной печью с использованием методов классической теории управления оказываются неэффективными из-за большой нелинейности задачи, а также трудностей учета различных возмущений, с одной стороны. С другой стороны, с этой непростой задачей справляется опытный машинист-оператор. Наблюдая за деятельностью оператора, можно заметить, что он управляет печью на основе некоторых рассуждений. Задача управления процессом обжига клинкера может быть рассмотрена как задача принятия решений с использованием нечеткой базы знаний.

Различные по физическому смыслу задачи принятия решений, возникающие в управлении [1, 3, 6], сводятся к идентификации нелинейных объектов с одним выходом и многими входами, которые можно рассмотреть на основе языка продукционных правил, методов нечеткой логики и теории нечеткого управления.

Продукционные правила характеризуют взаимосвязь переменных «вход-выход» в виде экспертных высказываний: ЕСЛИ <входы> ,

ТО <выход> , представляющих собой нечеткие базы знаний [5]. Экспертные высказывания целесообразно свести к форме нечетких множеств, что позволит разработать систему нечеткого вывода, являющуюся генератором нечетких заключений об управляющем воздействии на объект.

**Цель исследования** – построить функции принадлежности нечетких множеств входных переменных, характеризующих состояние цементной печи и представляющих собой нечеткую базу знаний. На основе полученных функций принадлежности в дальнейшем можно синтезировать систему нечеткого вывода для регулятора расхода газа в системе управления обжигом цементного клинкера.

### Материалы и методы исследования

Методика исследования состоит в представлении знаний при помощи языка продукционных правил и обработке их с помощью методов теории нечетких множеств.

Идея, лежащая в основе формализации причинно-следственных связей между переменными <входы-выход>, состоит в описании этих связей на

естественном языке с применением теории лингвистических переменных [4, 5].

Нами рассматривается объект с одним выходом и входами вида:

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $y$  – выходная переменная;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные переменные.

Эти рассуждения можно преобразовать в систему продукционных правил ЕСЛИ <входы>, ТО <выход>, в которых входные и выходные переменные оцениваются словесными (нечеткими) терминами.

Входные переменные:

- **Влажность сырья** (очень низкая, низкая, нормальная, высокая, очень высокая),
- **Температура в пыльной камере** (низкая, нормальная, высокая),
- **Температура в зоне цепей** (низкая, нормальная, высокая),
- **Температура в зоне теплообменника** (низкая, нормальная, высокая),
- **Разрежение в пыльной камере** (пониженное, нормальное, повышенное),
- **Разрежение в головке печи** (пониженное, нормальное, повышенное).

Выходная переменная:

- **Расход газа** (низкий, средний, высокий).

С использованием этих переменных и их лингвистических оценок можно записать набор правил, которые выражают алгоритм деятельности опытного машиниста-оператора.

Нечеткая база знаний представляет собой совокупность правил ЕСЛИ <входы>, ТО <выход>, которые отражают опыт эксперта и его понимание причинно-следственных связей в рассматриваемой задаче принятия решения. Примером экспертного правила из нечеткой базы знаний в задаче управления печью служит следующее высказывание:

**ЕСЛИ Влажность сырья нормальная И Температура в пыльной камере нормальная,**

**И Разрежение в пыльной камере нормальное, ТО Расход газа средний.**

Особенность подобных высказываний состоит в том, что их адекватность не изменяется при незначительных колебаниях условий эксперимента. Поэтому формирование нечеткой базы знаний можно трактовать как аналог этапа структурной идентификации [5], на котором строится грубая модель объекта с параметрами, подлежащими настройке. В данном случае настройке подлежат функции принадлежности, с помощью которых оцениваются входы и выходы объекта.

Итак, определим входные и выходные переменные нашей системы:

- $X_1$  <Влажность сырья>,
- $X_2$  <Температура в пыльной камере>,
- $X_3$  <Температура в зоне цепей>,
- $X_4$  <Температура в зоне теплообменника>,
- $X_5$  <Разрежение в пыльной камере>,
- $X_6$  <Разрежение в головке печи>.

Выходная переменная:

- $Y$  <Расход газа>.

Все переменные системы имеют количественное измерение. Для них предполагаются известными области изменения:

$$U_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i], \quad i = \overline{1, n}; \quad \tilde{Y} = [\underline{y}, \bar{y}], \quad (2)$$

где  $\underline{x}_i, \bar{x}_i$  – нижнее и верхнее значения входной переменной  $x_i$ , а  $\underline{y}, \bar{y}$  – нижнее и верхнее значения выходной переменной  $Y$ .

Пусть  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  – вектор фиксированных значений входных переменных рассматриваемого объекта, где  $X_i^* \in U_i, i = \overline{1, n}$ . Задача принятия решения состоит в том, чтобы на основе информации о векторе входов  $X^*$  определить выход  $y^* \in Y$ . Необходимым условием формального решения такой задачи является наличие зависимости (1). Для установления этой зависимости будем рассматривать входные переменные  $x_i, i = \overline{1, n}$  и выходную переменную  $y$  как лингвистические переменные [3], заданные на универсальных множествах (2).

Для оценки лингвистических переменных  $X_i$  и  $Y$  будем использовать качественные термины из следующих терм-множеств:

$$\begin{aligned} A_1 &= \{<очень низкая>, <низкая>, \\ <нормальная>, <высокая>, <очень высокая>\} \\ A_2 &= \{<низкая>, <нормальная>, <высокая>\} \\ A_3 &= \{<низкая>, <нормальная>, <высокая>\} \\ A_4 &= \{<низкая>, <нормальная>, <высокая>\} \\ A_5 &= \{<пониженное>, <нормальное>, <повышенное>\} \\ A_6 &= \{<пониженное>, <нормальное>, <повышенное>\} \\ D &= \{<низкий>, <средний>, <высокий>\}, \end{aligned}$$

где  $A_i$  – терм-множество переменной  $X_i$ ,  $D$  – терм-множество переменной  $Y$ .

Пусть  $a_i^p$  –  $p$ -й лингвистический терм переменной  $X_i$ ,  $d_j$  –  $j$ -й лингвистический терм переменной  $Y$ .

Лингвистические термины  $a_i^p \in A_i$  и  $d_j \in D$  будем рассматривать как нечеткие множества, заданные на универсальных множествах  $U_i$  и  $\tilde{Y}$ , определенных соотношением (2).

Нечеткие множества  $a_i^p$  и  $d_j$  определим соотношениями:

$$\mu^{a_i^p} = \int_{\underline{x}_i}^{\bar{x}_i} \mu^{a_i^p}(x_i) / x_i; \quad d_j = \int_{\underline{d}}^{\bar{d}} \mu^{d_j}(d) / d, \quad (3)$$

где  $\mu^{a_i^p}(x_i)$  – функция принадлежности значения входной переменной  $x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  терму  $a_i^p \in A_i, p = \overline{1, l_i}, i = \overline{1, n}; \mu^{d_j}(d)$  – функция принадлежности значения выходной переменной  $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$  терму решению  $d_j \in D, j = \overline{1, m}$ .

По определению [2], функция принадлежности (ФП)  $\mu^T(x)$  характеризует субъективную меру (в диапазоне [0, 1]) уверенности эксперта в том, что четкое значение  $x$  соответствует нечеткому терму  $T$ . Функции принадлежности удобно задавать в параметрической форме [7]. В этом случае задача построения функции принадлежности сводится к определению ее параметров. Наибольшее распространение в практических приложениях получили треугольные, трапециевидные и колоколообразные (гауссовы) функции принадлежности (табл. 1).

Таблица 1

Наиболее распространенные функции принадлежности

Наименование функции	Аналитическое выражение	Интерпретация параметров
Треугольная	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \leq a \text{ или } x \geq c \end{cases}$	(a, c) – носитель нечеткого множества – пессимистическая оценка нечеткого числа; b – координата максимума – оптимистическая оценка нечеткого числа
Трапецевидная	$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \leq a \text{ или } x \geq d \end{cases}$	(a, d) – носитель нечеткого множества – пессимистическая оценка нечеткого числа; [b, c] – ядро нечеткого множества – оптимистическая оценка нечеткого числа
Гауссова	$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$	b – координата максимума; c – коэффициент концентрации
Z-образная	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$	a – координата максимума; b – координата минимума
S-образная	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	a – координата минимума; b – координата максимума

**Результаты исследования и их обсуждение**

Результатами исследований являются теоретические функции принадлежности, заданные в параметрической и графической формах, расчеты для получения которых будут описаны далее.

Определим функции принадлежности для термов  $a_i^p$  и  $d_i$  лингвистических переменных  $A_i$  и  $D$ . Рассмотрим лингвистическую переменную  $A_2$ , определяющую значения входной переменной  $X_2$  <Температура в пыльной камере>. Термножество лингвистической переменной  $A_2$  выглядит следующим образом:

$$a_2^1 = \langle \text{низкая} \rangle; \quad a_2^2 = \langle \text{нормальная} \rangle; \\ a_2^3 = \langle \text{высокая} \rangle.$$

В качестве универсального множества  $U_2$  выберем диапазон разумно возможных значений переменной  $X_2$   $U_2 = [200; 300]$ . Для обеспечения компактного хранения нечетких множеств и удобства вычисления результатов арифметических операций над ними будем использовать кусочно-линейные функции принадлежности.

Итак, определим функцию принадлежности значений переменной  $X_2$  нечеткому множеству  $a_2^2 = \langle \text{нормальная} \rangle$ . Воспользуемся трапецевидной формой функции принадлежности (см. табл. 1). Значения параметров  $a, b, c, d$  определяются экспертами. В данном случае:  $a = 230, b = 238, c = 242, d = 250$ .

Получим следующее выражение:

$$\forall x \in U_2 : \mu^{a_2^2}(x) = \begin{cases} \frac{x-230}{8}, & 230 < x < 238 \\ 1, & 238 \leq x \leq 242 \\ \frac{250-x}{8}, & 242 < x < 250 \\ 0, & x \leq 230 \text{ или } x \geq 250 \end{cases} \quad (4)$$

Теперь рассмотрим нечеткое множество  $a_2^1 = \langle \text{низкая} \rangle$ . Наибольшей принадлежностью данному нечеткому множеству обладают «крайние» левые элементы универсального множества  $U_2$ . Для их представления удобно использовать кусочно-линейную Z-образную функцию принадлежности.

Параметры  $a$  и  $b$  принимают следующие значения:  $a = 230$ ,  $b = 238$ .

Аналитическое выражение функции принадлежности принимает следующий вид:

$$\forall x \in U_2 : \mu^{a_2^1}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 230 \\ \frac{238-x}{8}, & 230 < x < 238 \\ 0, & x \geq 238 \end{cases} \quad (5)$$

Теперь рассмотрим нечеткое множество  $a_2^3 = \langle \text{высокая} \rangle$ . Наибольшей принадлежностью данному нечеткому множеству обладают «крайние» правые элементы универсального множества  $U_2$ . Для их представления удобно использовать кусочно-линейную S-образную функцию принад-

лежности. Параметры  $a$  и  $b$  принимают следующие значения:  $a = 242$ ,  $b = 250$ .

Аналитическое выражение функции принадлежности принимает следующий вид:

$$\forall x \in U_2 : \mu^{a_2^3}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 242 \\ \frac{x-242}{8}, & 242 < x < 250 \\ 1, & x \geq 250 \end{cases} \quad (6)$$

Для удобства описания функций принадлежности всех нечетких термов лингвистической переменной  $A_2$  будем использовать 4 параметра  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $d'$ , определяемых экспертами. При этом для вспомогательных параметров ФП будем использовать следующие значения:

$$a_2^1: a = a'; b = b';$$

$$a_2^2: a = a'; b = b'; c = c'; d = d';$$

$$a_2^3: a = c'; b = d'.$$

Аналогичным образом зададим термы лингвистических переменных  $A_3, A_4, A_5, A_6, D$ . Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры функций принадлежности лингвистических переменных

Лингвистическая переменная	Параметры функций принадлежности			
	$a'$	$b'$	$c'$	$d'$
$A_2$ <Температура в пыльной камере>	230	238	242	250
$A_3$ <Температура в зоне цепей>	440	460	470	490
$A_4$ <Температура в зоне теплообменника>	550	572	588	610
$A_5$ <Разрежение в пыльной камере>	144	154	160	170
$A_6$ <Разрежение в головке печи>	3.6	4.6	5.4	6.4
$D$ <Расход газа>	12 700	12 900	13 100	13 300

Графики ФП термов лингвистических переменных  $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, D$  аналогичны по своей форме. График функции принадлежности  $A_2$  представлен на рис. 1.

Теперь рассмотрим терм-множество переменной  $A_1$ . Влажность сырья оказывает наибольшее влияние в процессе принятия решения относительно управления рас-

ходом топлива. Поэтому лингвистическая переменная  $A_1$  может принимать одно из 5 значений из следующего терм-множества (табл. 3). Универсальное множество  $U_1$  представляет собой диапазон значений входной переменной  $X_1$ .

$$U_1 = [38\%; 48\%].$$

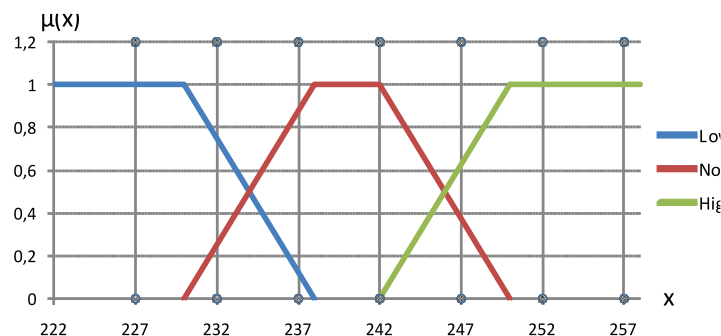


Рис. 1. Функции принадлежности нечетких термов лингвистической переменной  $A_2$

Таблица 3

Функции принадлежности термов лингвистической переменной  $A_1$

Обозначение	Форма ФП	Параметры ФП
$a_1^1 = \langle \text{очень низкая} \rangle$	Z-образная	$a = 41; b = 42$
$a_1^2 = \langle \text{низкая} \rangle$	треугольная	$a = 41; b = 42; c = 43$
$a_1^3 = \langle \text{нормальная} \rangle$	треугольная	$a = 42; b = 43; c = 44$
$a_1^4 = \langle \text{высокая} \rangle$	треугольная	$a = 43; b = 44; c = 45$
$a_1^5 = \langle \text{очень высокая} \rangle$	S-образная	$a = 44; b = 45$

Для задания термов  $a_1^2, a_1^3, a_1^4$  будем использовать треугольные ФП (см. табл. 1). Для лингвистических термов  $a_1^1$  и  $a_1^5$ , описывающих «крайние» значения из интер-

вала  $U_1$ , воспользуемся соответственно Z-образной и S-образной ФП (см. табл. 2). Результаты приведены в табл. 3. Графики функций представлены на рис. 2.

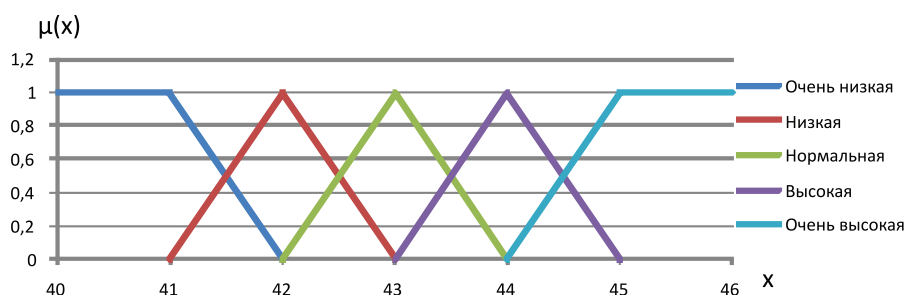


Рис. 2. Функции принадлежности нечетких термов лингвистической переменной  $A_1$

**Вывод**

Подход с позиции нечетких множеств является одним из способов для решения задачи управления сложными технологическими объектами. Применение теории нечеткого управления процессом обжига клинкера в цементной печи позволит моделировать поведение человека – эксперта, управляющего объектом, не знающего его математической модели. Построенные функции принадлежности представляют собой нечеткую базу знаний, хранящую информацию о правилах управления процессом, на основе которой можно синтезировать систему нечеткого вывода для регулятора управления подачей газа в цементную печь. Для построения более точных функций принадлежности можно расширить терм-множества используемых лингвистических переменных либо использовать другие формы функций принадлежности нечетких переменных.

**Список литературы**

- Беседин, П.В. Некоторые направления энергосбережения в технологии цемента / П.В. Беседин, П.А. Трубаев, О.А. Панова, Б.М. Гришко // Цемент и его применение. – 2011. – № 2. – С. 130–134.
- Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
- Классен В. К. Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печи // Цемент и его применение. – 2004. – № 2. – С. 39–42.
- Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и FuzzyTech. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
- Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации. – Винница: Универсум-Винница, 1999. – 320 с.

- Трубаев П.А. Интенсификация процесса обжига цементного клинкера при использовании техногенных материалов / П.А. Трубаев, П.В. Беседин // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2005. – № 10. – С. 60–61.
- Шговба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с., ил.

**References**

- Besedin P.V., Trubayev P.A., Panova O.A., Grishko B.M. Certain trends of energy saving in cement production – Cement and its application, 2011, no. 2, pp. 130–134.
- Zade L.A. Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions], Mir, 1976. 165 p.
- Klassen V.K. Basic principles and methods of control of cement rotary kiln – Cement and its application, 2004, no. 2, pp. 39–42.
- Leonenkov A. Nечetkoje modelirovanie v srede Matlab i FuzzyTech [Fuzzy modeling in Matlab and FuzzyTech], St. Petersburg, BHV-Peterburg. 2005. 736 p.
- Rotshtejn A.P. Intellektual'nye tehnologii identifikacii [Intelligent identification technology], Vinnica, Universum-Vinnica, 1999. 320 p.
- Trubayev P.A., Besedin P.V. Intensification of cement clinker burning process using man-made materials – Building materials, equipment and technologies of the XXI century, 2005, no. 10, pp. 60–61.
- Shtovba S. D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems by means of MATLAB], Gorjachaja linija – Telekom, 2007. 288 p.

**Рецензенты:**

Магергут В.З., д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики, заместитель директора по научной работе, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород;  
 Классен В.К., д.т.н., профессор кафедры технологии цемента и композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 21.01.2013.