

А. И. Каяшев, Л. Ю. Полякова, Т. В. Сазонова, Е. А. Муравьева

## ЧЕТКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ В АВТОКЛАВЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОСИЛИКАТНЫХ ШЛАКОБЛОКОВ

Предложена система регулирования температуры и давления в технологическом процессе автоклавного твердения газосиликатных шлакоблоков на основе ПИД-регулятора, в котором дискретное изменение коэффициентов передачи пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих производится четким логическим регулятором, обладающим по сравнению с типовыми нечеткими регуляторами большим быстродействием и меньшей погрешностью. Отклонение реальных значений температуры и давления от регламентных в технологических стадиях прогрева, выдержки и охлаждения автоклава составляет не более  $(2 \div 3)\%$ . Нелинейная зависимость температуры от времени на стадии охлаждения представлена кусочно-линейной функцией с десятью интервалами продолжительностью по 12 мин. *Ресурсосбережение; совокупность четких термов; система производственных правил; шлакоблочная смесь; автоклавное твердение; золошлакоотходы; технологический регламент*

Для производства газосиликатных шлакоблоков автоклавного твердения фирма «Спецстройматериалы» г. Кумертау использует четыре компонента: негашеная известь, тонкодисперсный кремнеземистый компонент (золошлакоотходы (ЗШО) Кумертауской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), работающей на бурых углях), газообразователь (алюминиевая пудра в виде суспензии) и вода. При этом состав вяжущих веществ и наполнителей определяет такие качества газосиликатных шлакоблоков, как теплопроводность, удельный вес, устойчивость к воздействию влаги и атмосферных явлений. Основные характеристики, которыми газосиликатные блоки отличаются от других стеновых материалов, – это экологичность, безопасность, повышенная прочность и высокие теплоизоляционные характеристики.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Производство шлакоблоков автоклавного твердения достаточно хорошо освещено в литературе [3, 5], однако вопросы управления такими производствами, использующими ЗШО теплоэлектроцентралей, работающих на бурых углях, до сих пор не нашли должного отражения в печати. Вызвано это тем, что золы содержат большое количество недожога, который необходимо отсеять. Крупные частицы недожженного бурого угля используются при топке в котельной, а просеянные ЗШО вместе с известью измельчаются в планетарных мельницах, в которых одновременно происходит высушивание за счет оставшихся частиц недожога. В свою очередь, степень измельчения, т. е. тонина по-

мола, влияет на качество газозолосиликатного шлакоблока, а содержание оксида железа в золах не позволяет традиционным методом изготавливать шлакоблоки, так как при достижении определенной температуры оксиды железа преждевременно кристаллизуются, что сильно ухудшает качество готовой продукции. Из-за сложности алгоритма управления производством шлакоблоков автоклавного твердения к настоящему времени его удалось реализовать только в полуавтоматическом режиме с использованием типовых нечетких регуляторов (ТНР), а информация об этих алгоритмах существует только в виде устных знаний небольшой группы экспертов фирмы «Спецстройматериалы». Кроме того, ТНР не позволяют обеспечить (главным образом из-за процедуры дефазификации [1, 2, 4]) необходимую точность поддержания температуры и давления в стадиях функционирования автоклава. Все это говорит о целесообразности автоматизации упомянутого технологического процесса на основе четкого логического регулятора, который по сравнению с ТНР обладает меньшей погрешностью регулирования [6].

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Технологический регламент производства газосиликатных шлакоблоков автоклавного твердения состоит из пяти стадий: загрузка автоклава, прогрев, выдержка, охлаждение и выгрузка готового продукта. Для получения качественных шлакоблоков температура и давление в автоклаве на стадиях прогрева, выдержки и охлаждения должны изменяться по графикам, изображенным на рис. 1, с допустимым отклонением  $\pm 5\%$ . Причем изменение температуры

в стадии охлаждения состоит из 10 временных интервалов продолжительностью 12 мин. со «своими» законами изменения температуры, в то время как давление в этой стадии уменьшается по линейному закону. Задача управления усложняется еще и тем, что длительность стадий 2÷4 и законы изменения температуры и давления в автоклаве меняются в зависимости от количества вводимой добавки в шлакоблочную смесь для нейтрализации оксида железа, содержание которого в составе ЗШО Кумертауской ТЭЦ меняется в широких пределах.

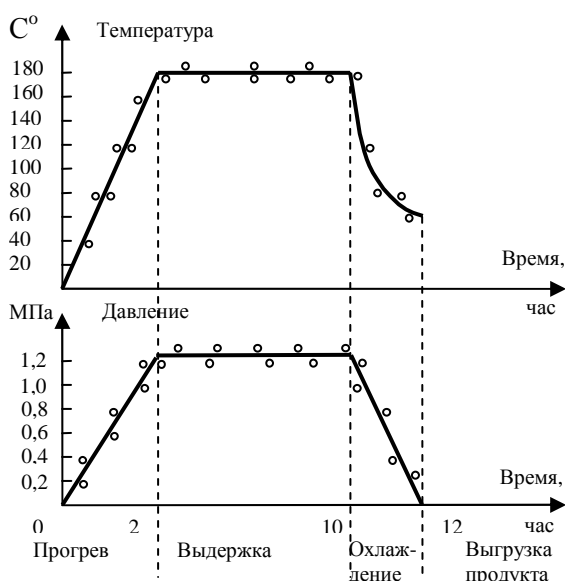


Рис. 1. Один из шести режимов работы автоклава: ° – эксперимент; — – технологический регламент

В ходе технологических экспериментов выявлено шесть оптимальных значений нейтрализующих добавок с разной продолжительностью временных интервалов и со своими графиками изменения температуры и давления, а значит, и с различными режимами работы автоклава, при которых обеспечивается наилучшее качество шлакоблоков и минимум энергозатрат. Совершенно очевидно, что для управления упомянутыми режимами требуются отдельные регуляторы со своими коэффициентами передачи.

### 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОКЛАВА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОСИЛИКАТНЫХ ШЛАКОБЛОКОВ

Поскольку внутри каждой технологической стадии температура и давление во времени во

всех технологических стадиях изменяются по линейному закону (кроме изменения температуры в зоне охлаждения), то управление процессом автоклавного твердения шлакоблоков целесообразно возложить на программно-реализованный ПИД-регулятор [7], коэффициенты передачи которого автоматически устанавливаются четким логическим регулятором в соответствии с графиками, изображенными на рис. 1, для одной из шести нейтрализующих добавок в шлакоблочную смесь. Из рис. 1 следует, что по стадиям в автоклаве необходимо реализовать следующие законы изменения температуры  $T(t)$  и давления  $P(t)$  во времени  $t$ :

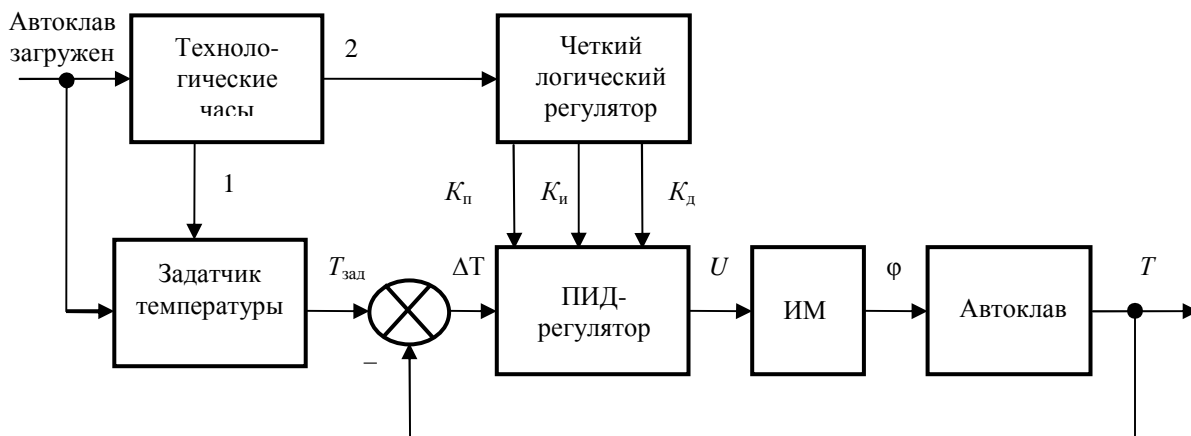
$$T(t) = \begin{cases} 90t & (\text{Стадия 1}); \\ 180t & (\text{Стадия 2}); \\ 180 - 100 \cdot (t - 10) & (\text{Стадия 3}); \\ 160 - 100 \cdot (t - 10,2) & (\text{Стадия 4}); \\ \dots & \\ \dots & \\ 60 - 50 \cdot (t - 11,8) & (\text{Стадия 12}). \end{cases} \quad (1)$$

$$P(t) = \begin{cases} 0,6 \cdot t & (\text{Стадия 1}); \\ 1,2 & (\text{Стадия 2}); \\ 10 - 5 \cdot (t - 10) & (\text{Стадия 3}). \end{cases} \quad (2)$$

В выражении (1) нелинейная зависимость температуры от времени на стадии охлаждения подвергнута кусочно-линейной аппроксимации, в результате чего внутри каждого из десяти интервалов времени, длительностью 12 мин., покрывающих эту стадию, функция  $T(t)$  заменена соответствующим линейным отрезком. Линейность функции  $P(t)$  внутри всех стадий работы автоклава позволяет представить ее тремя функциями (2).

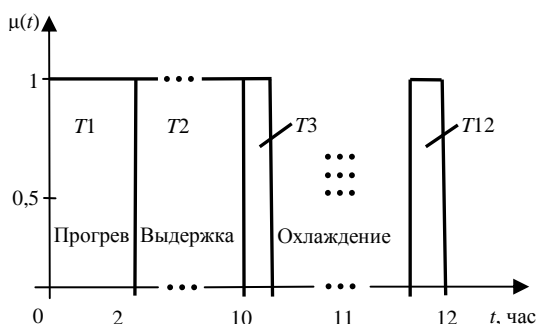
Структурная схема, реализующая предлагаемую концепцию регулирования температуры в автоклаве, представлена на рис. 2. Регулятор давления имеет аналогичную структуру.

Совокупность четких термов  $T_1 \div T_{12}$ , интерпретирующих продолжительность стадий работы автоклава, изображена на рис. 3, из которого следует, что ширина терма  $T_1$  составляет 2 часа, терма  $T_2$  – десять часов, а четкие термы  $T_3 - T_{12}$  имеют одинаковую ширину, равную 12 мин. В свою очередь, линейность функции  $P(t)$  на стадии охлаждения позволяет адекватно интерпретировать ее совокупностью трех четких термов, из которых термы  $P_1$  и  $P_2$  имеют такую же ширину, что и термы  $T_1$  и  $T_2$ , а для представления стадии охлаждения по давлению достаточно одного терма  $P_3$  с шириной 2 часа.



**Рис. 2.** Система регулирования температуры в автоклаве с четким логическим регулятором: ИМ – исполнительный механизм;  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты передачи соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора;  $T, T_{зад}$  – фактическая и заданная температура в автоклаве, °С;  $\Delta T = T - T_{зад}$

Принципиальная особенность четких термов по сравнению с нечеткими состоит в их логической природе – они являются аргументами двузначной логики.



**Рис. 3.** Четкие термы логической переменной  $T$  (температура в автоклаве)

Отсюда следует, что у логической переменной  $T$  (температура в автоклаве) на рис. 3, представленной совокупностью четких термов  $T_1 \div T_{12}$ , в любой момент времени имеется только один терм, значение которого равно логической единице. Аналитически это можно представить следующим выражением:

$$\mu_{T_i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{i-1} \leq t \leq t_i, \text{ то есть } t \in T_i; \\ 0, & \text{если } t_{i-1} > t > t_i, \text{ то есть } t \notin T_i, \end{cases} \quad (3)$$

где  $i = (1 \div 12)$  – номер терма логической переменной  $T$  (температура в автоклаве). Например, для терма  $T_i$   $i = 1, \mu_{T_1}(t) = 1$  при  $0 \leq t < 2$ . Во всех остальных случаях  $\mu_{T_i}(t) = 0$ .

Таблица 1

**Исходные данные для синтеза четкого логического регулятора температуры**

Если $0 \leq t < 2$ ( $T = T_1$ ),	ТО	$K_p = 1,1$ $K_i = 3,4$ $K_d = 15$
Если $2 \leq t < 10$ ( $T = T_2$ ),	ТО	$K_p = 1$ $K_i = 2,9$ $K_d = 9$
Если $10 \leq t < 10,2$ ( $T = T_3$ ),	ТО	$K_p = 0,39$ $K_i = 5,5$ $K_d = 0,1$
Если $10,2 \leq t < 10,4$ ( $T = T_4$ ),	ТО	$K_p = 0,37$ $K_i = 5,3$ $K_d = 8$
Если $10,4 \leq t < 10,6$ ( $T = T_5$ ),	ТО	$K_p = 0,35$ $K_i = 5,1$ $K_d = 7$
Если $10,6 \leq t < 10,8$ ( $T = T_6$ ),	ТО	$K_p = 0,33$ $K_i = 0,49$ $K_d = 0,1$
Если $10,8 \leq t < 11$ ( $T = T_7$ ),	ТО	$K_p = 0,31$ $K_i = 0,47$ $K_d = 5$
Если $11 \leq t < 11,2$ ( $T = T_8$ ),	ТО	$K_p = 0,29$ $K_i = 0,45$ $K_d = 4,5$
Если $11,2 \leq t < 11,4$ ( $T = T_9$ ),	ТО	$K_p = 0,27$ $K_i = 0,43$ $K_d = 4$
Если $11,4 \leq t < 11,6$ ( $T = T_{10}$ ),	ТО	$K_p = 0,25$ $K_i = 0,41$ $K_d = 3,5$
Если $11,6 \leq t < 11,8$ ( $T = T_{11}$ ),	ТО	$K_p = 0,26$ $K_i = 0,42$ $K_d = 3,25$
Если $11,8 \leq t \leq 12$ ( $T = T_{12}$ ),	ТО	$K_p = 0,25$ $K_i = 0,41$ $K_d = 3$

Таблица 2

## Исходные данные для синтеза четкого логического регулятора давления

Если $0 \leq t < 2$ ( $P = P_1$ ),	ТО	$K_n = 2,1$
		$K_i = 4,4$
		$K_d = 13,5$
Если $2 \leq t < 10$ ( $P = P_2$ ),	ТО	$K_n = 2,1$
		$K_i = 3,9$
		$K_d = 8,28$
Если $10 \leq t \leq 12$ ( $P = P_3$ ),	ТО	$K_n = 0,49$
		$K_i = 3,5$
		$K_d = 0,31$

Исходные данные для построения системы производственных правил четкого логического регулятора температуры и давления представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Числовые значения коэффициентов  $K_n$ ,  $K_i$  и  $K_d$  в табл. 1 и 2 взяты из результатов настройки ПИД-регулятора при работе с реальным объектом (автоклавом) в каждой технологической зоне. По табл. 1 и 2 построены системы производственных правил с четкими темами, реализующие логические регуляторы температуры и давления, состоящие из 12 и 3 продукций соответственно. Например, первое производственное правило регулятора температуры имеет вид:

Если  $T = T_1 \ \& \ P = P_1 \ \& \ K_1$ ,

ТО  $K_n = 1,1 \ \& \ K_i = 3,4 \ \& \ K_d = 15$ ,

где  $K_1$  – дискретный сигнал от путевого датчика «Контроль закрытия двери автоклава».

То же самое для регулятора давления:

Если  $P = P_1 \ \& \ T = T_1 \ \& \ K_1$ ,

ТО  $K_n = 2,1 \ \& \ K_i = 4,4 \ \& \ K_d = 13,5$ .

Цикл работы автоклава инициируется подачей на блоки «Технологические часы» и «Задатчик температуры» сигнала «Автоклав загружен» (рис. 2). С первого выхода технологических часов подается сигнал на задатчик температуры, на выходе которого вырабатывается функция  $T_{зад} = 90 \cdot t$ , соответствующая стадии прогрева (1). Одновременно с выхода 2 этого же блока подается команда на вход четкого логического регулятора (ЧЛР), в результате чего на его выходе выставляются значения коэффициентов для ПИД-регулятора в соответствии с табл. 1 при  $T = T_1$ , т. е.  $K_n = 1,1$ ,  $K_i = 3,4$ ,  $K_d = 15$ . ПИД-регулятор вырабатывает управляющее воздействие  $U$ , которое исполнительным механизмом ИМ преобразуется в угол поворота  $\phi$  вентиля, регулирующего подачу пара в автоклав.

По истечении двух часов на выходе задатчика температуры и выходах ЧЛР устанавливаются сигналы, соответствующие стадии выдержки (в табл. 1 четкий терм  $T_2$ ), и в автоклаве до 10 часов с момента начала технологического цикла ПИД-регулятором поддерживается температура, равная  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . При равенстве логической единице терма  $T_3$  описанный процесс повторяется со значениями  $T_{зад}$ ,  $K_n$ ,  $K_i$  и  $K_d$ , соответствующими этому терму в выражении (1) и табл. 1. Затем то же самое выполняется для остальных термов  $T_4 \div T_{12}$  вплоть до окончания цикла работы автоклава. Аналогичным образом логический регулятор давления реализует три режима для стадий прогрева, выдержки и охлаждения, которые интерпретируются четкими термами  $P_1 \div P_3$  (табл. 2). Как следует из рис.1, погрешность регулирования во всех технологических стадиях не превышает  $(2 \div 3)\%$ , что приводит к повышению качества шлакоблоков и снижению их себестоимости на  $(20 \div 30)\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По сравнению с нечеткими регуляторами четкие логические регуляторы в сочетании с ПИД-регулятором позволяют более точно и проще реализовать в широком диапазоне изменение температуры и давления во времени по заданной программе, предусмотренной технологическим регламентом процесса автоклавного твердения газосиликатных шлакоблоков. Для ПИД-регуляторов температуры и давления в автоклаве (стадии прогрева, выдержки и охлаждения) экспериментально получены приемлемые с точки зрения устойчивости регулирования и качества газосиликатных шлакоблоков значения коэффициентов передачи для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Круглов В. В., Дли М. И.** Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. М.: Физматлит, 2002.
2. **Леоненков А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH.-СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
3. **Чаус К. В., Чистов Ю. Д., Лабзина Ю. В.** Технология производства строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.
4. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
5. **Боженков П. И.** Технология автоклавных материалов. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд., 1978. 368 с.

6. **Каяшева Г. А., Муравьева Е. А., Байманов И. Ф.** Дискретно-логическая система регулирования величины рН электролита в производстве хлора методом электролиза // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности: Науч.-техн. журнал. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2008. № 1. С. 10–13.

7. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учеб. в 5-ти т.; 2-е изд., перераб. и доп. Т3: синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Каяшев Александр Игнатьевич**, проф., зав. каф. автоматиз. технолог. и инф. систем фил. УГНТУ в г. Стерлитамаке. Д-р техн. наук по автоматиз. и упр. технолог. проц. и произв. Исслед. в обл. интел. упр-я.

**Полякова Лариса Юрьевна**, доц., зав. каф. электроснабжения пром. предприятий фил. Оренбургск. гос. ун-та (ОГУ) в г. Кумертау. Канд. техн. наук по автоматиз. и упр. технолог. проц. и произв. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. интел. упр-я.

**Сазонова Татьяна Васильевна**, ст. преподаватель каф. «Электроснабжение промышленных предприятий» фил. ОГУ в г. Кумертау. Дипл. инженер (УГАТУ, 2005). Исслед. в обл. интеллект. упр-я.

**Муравьева Елена Александровна**, доц. каф. автоматиз. технол. и инф. систем филиала УГНТУ в г. Стерлитамаке. Дипл. инженер (УГНТУ, 1998). Канд. техн. наук по автоматиз. и упр. технол. проц. И произв. (УГАТУ, 2001). Докторант УГАТУ (2010). Иссл. в обл. интел. упр-я.