

Подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья в воздухонагревателе доменной печи на основе нечёткой базы знаний

На основании анализа экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования охлаждения насадки доменного воздухонагревателя сформирована нечёткая база знаний о процессе нагрева дутья в воздухонагревателе доменной печи. На основе нечёткой модели типа Мамдани разработана подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья как часть системы управления работой группы доменных воздухонагревателей. Произведены настройка и тестирование нечёткой модели при различных значениях заданной температуры доменного дутья для разных форм функций принадлежности входных и выходных параметров.

Ключевые слова: доменный воздухонагреватель, дутьё, прогнозирование, нечёткая база знаний, функция принадлежности, весовой коэффициент

Нагрев доменного дутья осуществляется на блоке воздухонагревателей доменной печи, включающий обычно от 3 до 5 аппаратов. Каждый из воздухонагревателей блока работает в циклически повторяющихся режимах нагрева насадки и нагрева дутья. Температура дутья, поступающего в доменную печь, должна быть постоянной. Для поддержания заданного значения температуры дутья к горячему дутью подмешивается необходимая часть холодного воздуха. По мере остывания насадки температура горячего дутья на выходе из воздухонагревателя понижается, а следовательно, расход подмешиваемого холодного воздуха также понижается. Окончанием периода нагрева дутья считается момент полного закрытия смесительного клапана. После этого происходит переключение воздухонагревателя в режим нагрева насадки. В режим нагрева дутья переводится следующий воздухонагреватель, температура низа насадки которого должна составлять 400 °С.

Качественное управление работой группы доменных воздухонагревателей невозможно без прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья. Это позволит управлять нагревом насадки остальных воздухонагревателей группы таким образом, чтобы избежать недогрев насадки при переключении воздухонагревателя в режим нагрева дутья. При прогнозировании продолжительности периода нагрева дутья в воздухонагревателе доменной печи целесообразно рассмотреть этот процесс нагрева с применением элементов теории нечётких множеств, что позволит выявить структуру базы знаний о данном технологическом процессе и осуществить прогнозирование на основе систематизированной базы логических правил.

Цель статьи заключается в разработке подсистемы прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья в доменном воздухонагревателе с использованием алгоритма нечёткого логического вывода Мамдани с последующей настройкой и тестированием нечёткой модели при различных значениях заданной температуры доменного дутья.

Задача прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья наиболее актуальна в условиях повышенной температуры дутья, что обусловлено уменьшением доступного времени нагрева насадки и, следовательно, увеличением вероятности аккумуляции насадкой недостаточного количества тепла при переключении воздухонагревателя в режим нагрева дутья. В работе [1] с целью повышения температуры дутья рассматривается зависимость температуры горячего воздуха на выходе из воздухонагревателя от длительности дутьевого периода. Появляется возможность использования данной зависимости при оперативном определении предполагаемого времени дутья с учётом текущего расхода холодного воздуха на смешение. Алгоритм оптимизации режимов работы группы доменных воздухонагревателей предложен в работе [2]. При реализации данного алгоритма определяется длительность цикла работы каждого из воздухонагревателей группы на основе зависимости между длительностями периодов нагрева насадки и нагрева дутья. Достоверная информация о предполагаемой длительности дутьевого периода может быть использована при управлении режимами работы группы доменных воздухонагревателей.

Алгоритм управления нагревом насадки, предложенный в работе [3], основан на нечёткой модели, которая учитывает информацию о текущем температурном состоянии насадки, но не учитывает информацию о доступном времени нагрева насадки.

Одним из вариантов повышения эффективности управления группой доменных воздухонагревателей является предложенная в работе [4] система автоматического регулирования температуры горячего дутья. Данная работа содержит технические предложения по совершенствованию системы автоматического регулирования температуры горячего дутья с использованием дополнительных датчиков контроля температуры холодного дутья, расхода воздуха из смесительного воздухопровода, температуры горячего ду-

тя на выходе каждого воздухонагревателя группы. При таком подходе появляется возможность формирования нечёткой базы знаний, предназначенной для работы модели прогнозирования продолжительности дутьевого периода, основанной на зависимости от текущей температуры горячего дутья на выходе из насадки и текущего расхода холодного воздуха на смешение.

Входными параметрами вышеуказанной модели приняты: температура горячего дутья на выходе из насадки и расход холодного воздуха на смешение, выходной параметр представлен прогнозируемым временем, в течение которого воздухонагреватель будет находиться в режиме нагрева дутья. Для входных и выходных параметров сформированы нечёткие множества.

Предлагаемая нечёткая база знаний основана на оценке зависимости продолжительности периода нагрева дутья от двух параметров: текущей температуры горячего воздуха на выходе из насадки и расхода холодного воздуха на смешение.

В результате анализа экспериментальных данных, полученных при работе блока воздухонагревателей ДП № 2 ММК им. Ильича, а также результатов работы компьютерной модели работы доменного воздухонагревателя [5], была сформирована нечёткая база знаний на основе правил вида «если-то», в соответствии с которы-

ми формируется логическое решение. Каждому правилу соответствует весовой коэффициент, значение которого находится в диапазоне [0; 1] и характеризует степень достоверности данного правила. При разработке нечёткой модели выбран тип логического вывода Мамдани [3].

При разработке нечёткой модели были исследованы два варианта задания функций принадлежности входных и выходных параметров [3]. Гауссова функция принадлежности и колоколообразная определяются соответственно по уравнениям:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (1)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2} \quad (2)$$

где b – координата максимума функции принадлежности, c – коэффициент концентрации функции принадлежности.

Графики функций принадлежности (1) и (2) для нечётких множеств входных и выходных параметров представлены на рис. 1, 2.

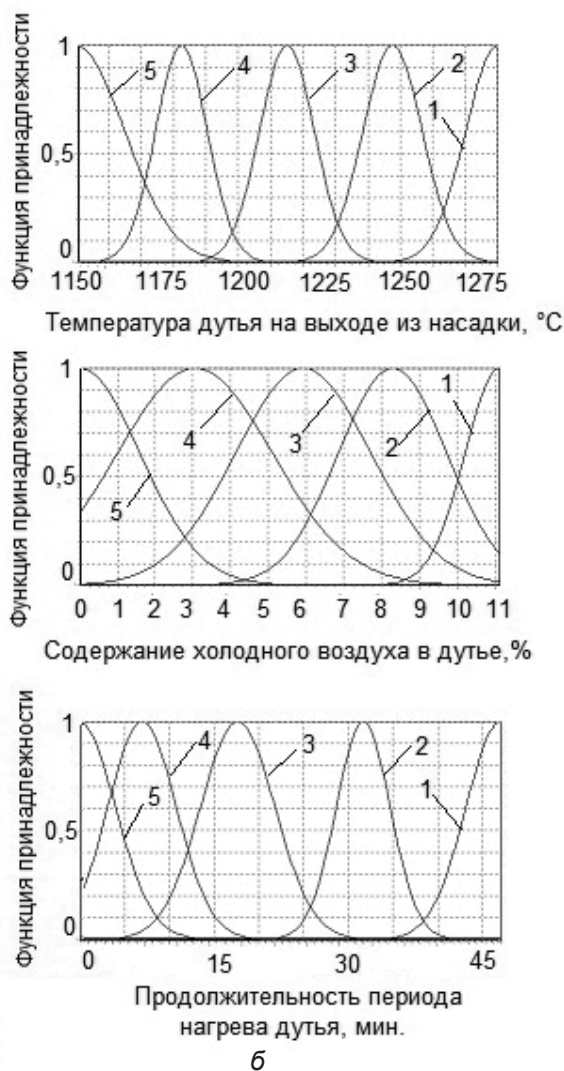
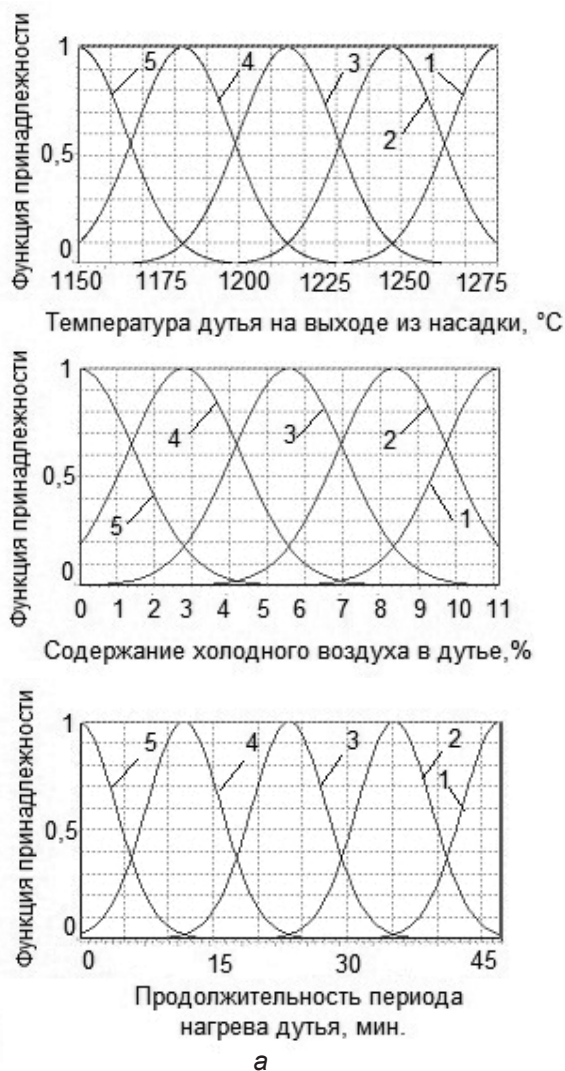
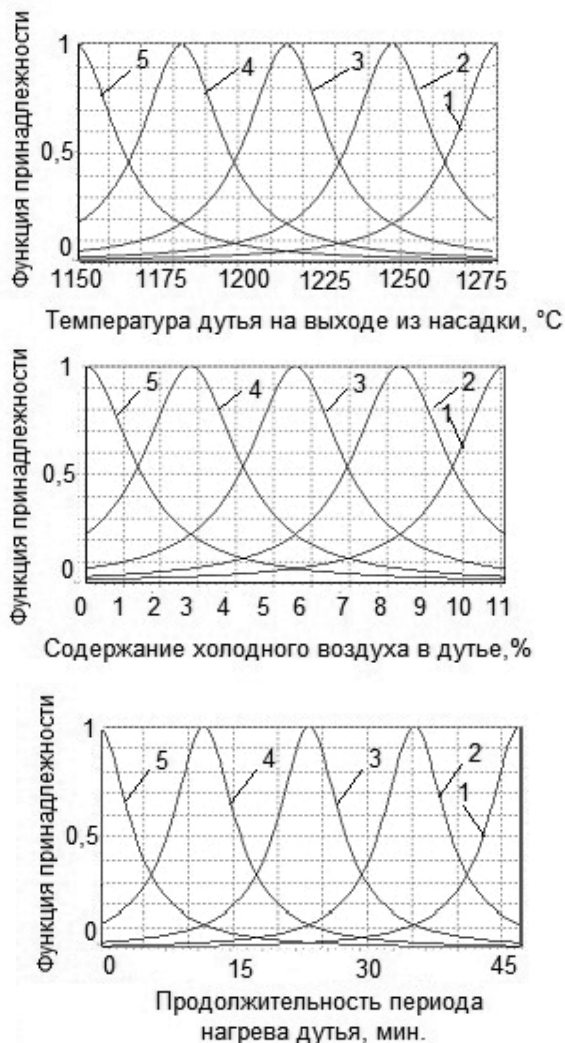


Рис. 1. Графики гауссовой функции принадлежности: 1 – для множеств T_1, F_1, τ_1 ; 2 – для множеств T_2, F_2, τ_2 ; 3 – для множеств T_3, F_3, τ_3 ; 4 – для множеств T_4, F_4, τ_4 ; 5 – для множеств T_5, F_5, τ_5 ; а – до настройки нечёткой модели, б – после настройки нечёткой модели



а

б

Рис. 2. Графики колоколообразной функции принадлежности: 1 – для множеств T_1, F_1, τ_1 ; 2 – для множеств T_2, F_2, τ_2 ; 3 – для множеств T_3, F_3, τ_3 ; 4 – для множеств T_4, F_4, τ_4 ; 5 – для множеств T_5, F_5, τ_5 ; а – до настройки нечёткой модели, б – после настройки нечёткой модели

Лингвистические переменные для входных параметров названы следующим образом. Для температуры дутья на выходе из насадки: T_1 – высокая, T_2 – выше среднего, T_3 – средняя, T_4 – ниже среднего, T_5 – низкая. Для расхода холодного воздуха на смешение: F_1 – высокий, F_2 – выше среднего, F_3 – средний, F_4 – ниже среднего, F_5 – низкий. Лингвистические переменные для выходного параметра (прогнозируемой продолжительности периода нагрева дутья) представлены значениями: τ_1 – полный период, τ_2 – больше половины периода, τ_3 – половина периода, τ_4 – меньше половины периода, τ_5 – завершение периода.

Настройка нечёткой модели прогнозирования представляет собой задачу идентификации и осуществляется с целью корректировки поведения модели согласно обучающей выборке, представленной массивом пар экспериментальных данных «входы-выход», полученных при работе компьютерной модели охлаждения насадки доменного воздухонагревателя [5] с шагом по времени, равным 1 с. В процессе настройки происходит поиск параметров, при которых разница между выходом нечёткой модели и данными из обучающей выборки минимальна. Таким образом, настройка нечёткой модели включает-

ся в решении следующей задачи многомерной условной оптимизации [3]:

$$R = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - f(\bar{x}_i, \bar{w}, \bar{c}, \bar{b}))^2} \rightarrow \min \quad (3)$$

где M – количество пар данных (\bar{x}_i, y_i) в обучающей выборке, \bar{w} – вектор весовых коэффициентов, принимающих значения из диапазона [0, 1].

Для решения данной задачи использован метод сопряженных градиентов с формулой Полака-Рибьера. Ограничение на диапазон допустимых значений весовых коэффициентов реализовано методом штрафных функций. Значения весовых коэффициентов логических правил нечёткой базы знаний до настройки и после настройки модели для двух видов функций принадлежности (ф.п.) приведены в табл. 1.

Настройка и тестирование нечёткой модели произведены для периодов нагрева дутья при заданной температуре дутья 1150 °C, 1100 °C, 1050 °C и 1000 °C. Графики зависимости прогнозируемой продолжительности дутьевого периода от одного из входных параметров нечёткой модели –

Нечёткая база знаний

Т	F	τ	Весовой коэффициент до настройки, W	Весовой коэффициент после настройки, W							
				ф.п. (1)	ф.п. (2).	ф.п. (1)	ф.п. (2)	ф.п. (1)	ф.п. (2)	ф.п. (1)	ф.п. (2)
				Т д. = 1150°С		Т д. = 1100°С		Т д. = 1050°С		Т д. = 1000°С	
T ₁	F ₁	τ ₁	1	0,82	1	0,73	0,99	0,81	0,97	0,91	0,92
T ₁	F ₂	τ ₁	1	0,99	0,98	1	0,97	0,99	0,99	0,98	0,99
T ₁	F ₃	τ ₂	1	0,94	0,86	0,95	0,89	0,96	0,89	0,92	0,89
T ₂	F ₁	τ ₁	1	0,94	0,87	0,99	0,92	0,99	0,97	0,99	0,97
T ₂	F ₂	τ ₂	1	0,68	0,53	0,78	0,52	0,71	0,37	0,88	0,49
T ₂	F ₃	τ ₃	1	0,99	0,96	0,99	0,95	0,99	0,96	0,99	0,92
T ₂	F ₄	τ ₃	1	1	1	1	1	1	1	0,99	1
T ₃	F ₁	τ ₂	1	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
T ₃	F ₂	τ ₃	1	0,99	0,96	1	0,97	1	0,98	1	0,97
T ₃	F ₃	τ ₃	1	0,72	0,67	0,84	0,59	0,83	0,48	0,87	0,58
T ₃	F ₄	τ ₄	1	0,99	0,96	0,99	0,97	0,99	0,97	0,99	0,97
T ₃	F ₅	τ ₄	1	1	1	1	1	0,99	1	0,99	1
T ₄	F ₂	τ ₃	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
T ₄	F ₃	τ ₄	1	1	0,99	1	1	1	1	1	1
T ₄	F ₄	τ ₄	1	0,86	1	0,91	1	0,92	1	0,95	1
T ₄	F ₅	τ ₅	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
T ₅	F ₃	τ ₄	1	1	1	1	1	1	1	0,99	1
T ₅	F ₄	τ ₅	1	0,99	0,99	0,99	0,99	1	0,99	1	1
T ₅	F ₅	τ ₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1

температуры горячего дутья на выходе из насадки – при различных заданных значениях температуры дутья, поступающего в доменную печь, представлены на рис. 3.

Максимальная ошибка прогнозирования при использовании гауссовых функций принадлежности до настройки составляет 14,8 мин, что при продолжительности периода 82,4 мин составляет 17,9 %, после настройки – 5 мин и 6 % соответственно. Для колоколообразных функций принадлежности до настройки модели максимальная ошибка прогнозирования составила 7,8 мин и 16,6 %, после настройки – не превысила 5,1 %. Результаты работы подсистемы прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья для всех рассмотренных значений заданной температуры дутья приведены в табл. 2.

Как видно из рис. 3 и данных табл. 2, при использовании в нечёткой модели гауссовой функции принадлежности, ошибка прогнозирования возрастает с увеличением общей продолжительности периода нагрева дутья. Для колоколообразной формы функции принадлежности по результатам тестирования нечёткой модели наблюдается обратная взаимосвязь: при расширении временного диапазона с 47 до 82,4 мин ошибка прогнозирования уменьшается на 1,6 %.

Разработанная на основе нечёткой модели подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья является частью верхнего уровня АСУТП доменной печи и функционирует совместно с математическими моделями нагрева и охлаждения насадки, подпрограммой расчёта горения топлива и нечёткой моделью управления нагревом насадки. Общая схема системы управления работой воздухонагревателей представлена на рис. 4.

Подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева использует результаты работы математической модели охлаждения насадки [5]. Значения прогнозируемого времени нагрева дутья используются нечёткой моделью управления нагревом насадки [3] воздухонагревателей группы, находящихся в режиме нагрева насадки.

Выводы

– С использованием нечёткой модели типа Мамдани реализована подсистема прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья воздухонагревателя доменной печи, на основе экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования работы доменного воздухонагревателя, работающая в реальном времени. После проведённого анализа сформулирован набор логических правил вида «если-то», представляющих собой нечёткую базу знаний о процессе нагрева дутья в воздухонагревателе доменной печи.

– Сформированная нечёткая база знаний использована при разработке нечёткой модели, входными параметрами которой являются текущая температура горячего дутья на выходе из насадки воздухонагревателя и текущий расход холодного дутья, а выходным параметром – прогнозируемая продолжительность периода нагрева дутья.

– Реализованная нечёткая модель настроена по экспериментальным выборкам, полученным при компьютерном моделировании процессов нагрева дутья с различными значениями заданной температуры дутья (от 1000 до 1150 °С). Настройка нечёткой модели осуществлена методом сопряженных градиентов с ограничением значений, принимаемых

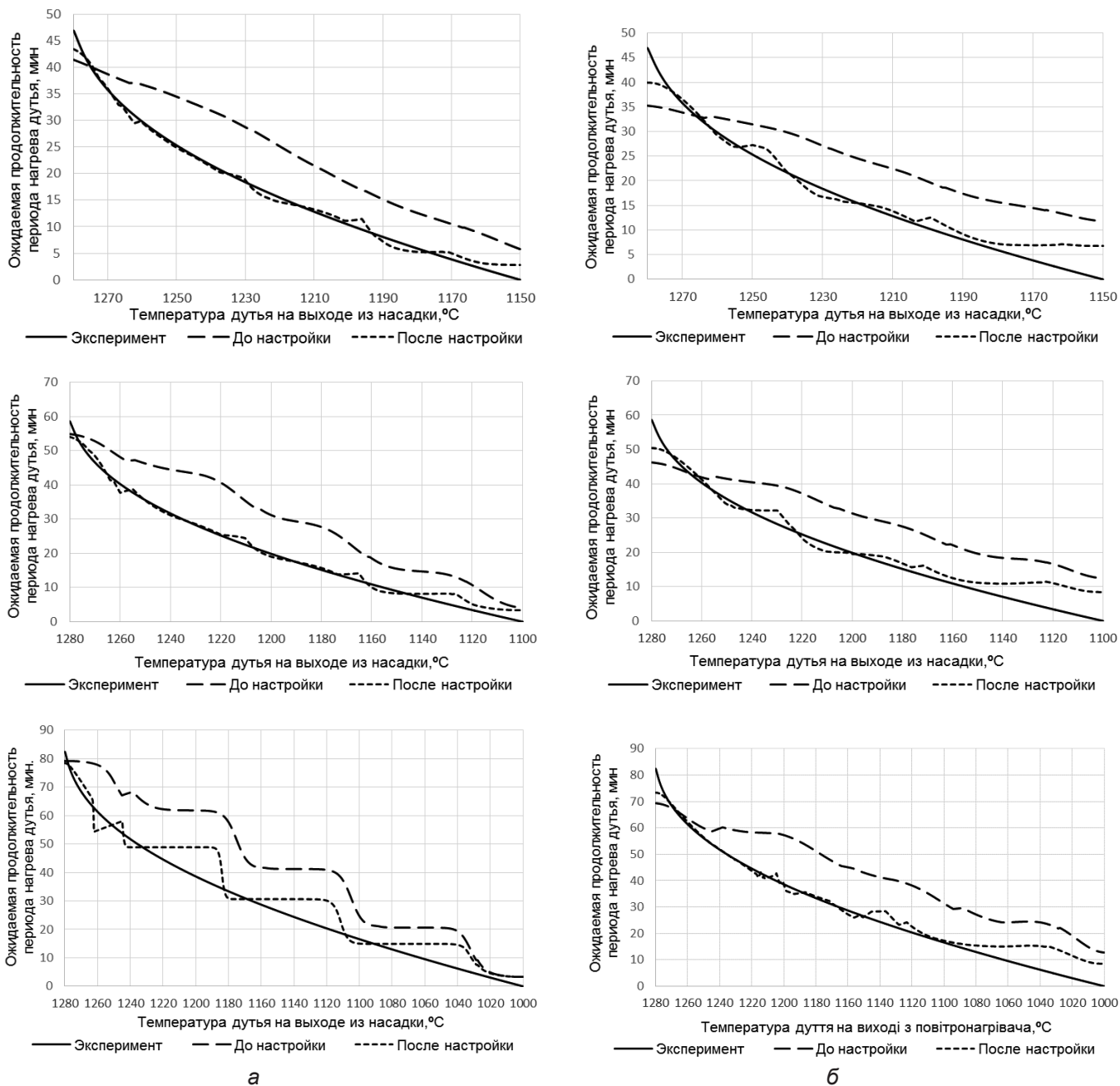


Рис. 3. Результаты работы нечёткой модели прогнозирования продолжительности периода нагрева дутья при заданных температурах дутья 1150, 1100 и 1000 °С: а – для гауссовой функции принадлежности, б – для колоколообразной функции принадлежности

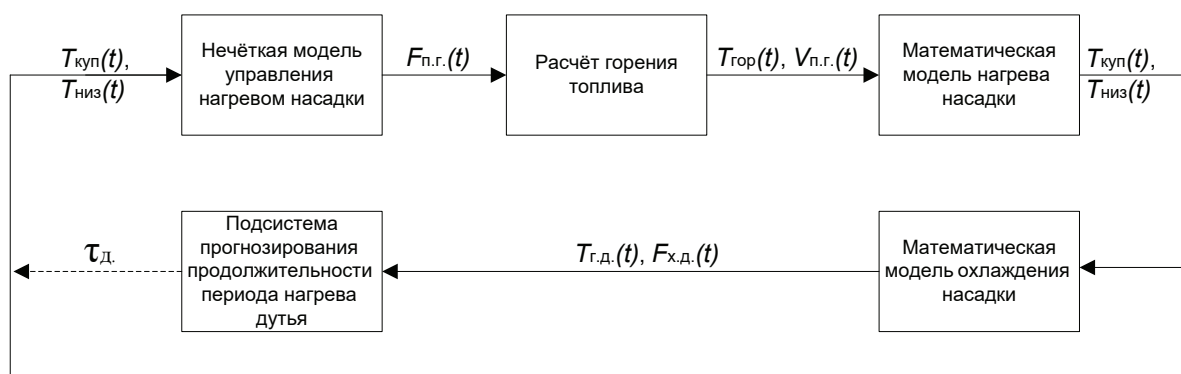


Рис. 4. Общая схема системы управления работой доменных воздушнонагревателей на основе комплекса компьютерного моделирования

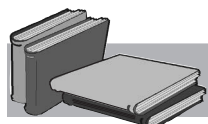
Результаты работы подсистемы прогнозирования

Заданная температура дутья, °С			Ошибка прогнозирования		Продолжительность периода нагрева дутья, мин	Количество тепла, переданное дутью за период нагрева дутья, ГДж
			мин	%		
Т д. = 1150 °С	до настройки	ф.п. (1)	7,1	15,1	47	302,3
		ф.п. (2)	7,8	16,6		
	после настройки	ф.п. (1)	1	2,1		
		ф.п. (2)	2,4	5,1		
Т д. = 1100 °С	до настройки	ф.п. (1)	9,5	16,3	58,6	359,1
		ф.п. (2)	9,4	16,1		
	после настройки	ф.п. (1)	1,4	2,4		
		ф.п. (2)	2,4	4,2		
Т д. = 1050 °С	до настройки	ф.п. (1)	12,1	17,2	70,3	408,9
		ф.п. (2)	11,1	15,9		
	после настройки	ф.п. (1)	2,8	3,9		
		ф.п. (2)	2,7	3,8		
Т д. = 1000 °С	до настройки	ф.п. (1)	14,8	17,9	82,4	454,3
		ф.п. (2)	13	15,7		
	после настройки	ф.п. (1)	5	6		
		ф.п. (2)	3,6	3,5		

параметрами настройки, методом штрафных функций. Ошибка прогнозирования после настройки нечёткой модели составляет от 2 до 6 %.

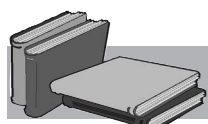
– При тестировании нечёткой модели установлено, что гауссову функцию принадлежности целесообразно применять в условиях повышенной температуры дутья, когда общая продолжительность периода нагрева дутья снижается. В данном случае ошибка прогнозирования составляет не более 3 %. Колоко-

лообразной формой функций принадлежности наиболее рационально описывать нечёткие множества входных и выходных параметров при более низких температурах дутья, поступающего в доменную печь, когда время нагрева дутья, расход холодного воздуха на смешение и температура горячего дутья на выходе из воздухонагревателя охватывают более широкий диапазон значений.



ЛИТЕРАТУРА

1. Грес Л. П. Высокоэффективный нагрев доменного дутья. – Днепропетровск : Пороги, 2008. — 492 с.
2. К вопросу оптимизации теплового режима работы воздухонагревателей доменных печей / В.И. Романенко, А. И. Марченко, И. М. Понизовцев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 3. – С. 58-60.
3. Kobysh E. I. Control model of the heating hot blast stove regenerative chamber based on fuzzy knowledge with training set / E. I. Kobysh, A. I. Simkin // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – No. 6. – P. 96-101.
4. Пат. 98080 Україна, МПК С21В 9/14 G05В 15/00 . Система автоматичного регулювання температури гарячого дуття / Койфман О. О., Кравченко В. П., Сімкін О. І., Кобиш О. І.; заявник і власник Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – № а 2011 06165; заявл. 17.05.11; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7.
5. Кобыш Е. И., Симкин А. И., Койфман А. А. Компьютерная модель работы доменного воздухонагревателя // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2012. – Вип. 25. – С. 239-245.



REFERENCES

1. Gres L. P. (2008). *Vysokoeffektivnyi nagrev domennogo dut'ia*. [The heating highly effective domain blowing]. Dnepropetrovsk: Porogi. [in Russian].
2. Romanenko V. I., Marchenko A. I., Ponizovcev I. M. et al. (2009). *K voprosu optimizatsii teplovogo rezhima raboty vozdukhonagrevatelei domennykh pechei*. [Question on thermal regime optimization work domennon furnace stoves]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost'*, № 3, pp. 58-60. [in Russian].
3. Kobysh E. I., Simkin A. I. (2015). Control model of the heating hot blast stove regenerative chamber based on fuzzy knowledge with training set. *Metallurgical and Mining Industry*. № 6, pp. 96-101.

4. Patent 98080 of Ukraine, MPK C21B 9/14 G05B 15/00 . Systema avtomatychnoho reholuvannya temperatury hariachoho duttia. [Automatic temperature control of hot blow]. Koifman O. O., Kravchenko V. P., Simkin O. I., Kobysh O. I. Derzhavnyi vyschy navchal'nyi zaklad "Pryazovskii State Technical University". – № 2011 06165 ; zaiavl. 17.05.11 ; publ. 10.04.12, Bull. № 7. [in Ukrainian].
5. Kobysh E. I., Simkin A. I., Koifman A. A. (2012). Komp'iuternaia model' raboty domennogo vozduhonagrevatel'ia. [Computer work domain model heater]. Visnyk Pryazovsk'oho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu: Mariupol'. Issue 25, pp. 239-245. [in Ukrainian].

Анотація

Кобиш О. І., Сімкін О. І.

Підсистема прогнозування тривалості періоду нагріву дуття в повітрянагрівачі доменної печі на основі нечіткої бази знань

На підставі аналізу експериментальних даних і результатів комп'ютерного моделювання охолодження насадки доменного повітрянагрівача сформовано нечітку базу знань про процес нагріву дуття в повітрянагрівачі доменної печі. На основі нечіткої моделі типу Мамдані розроблено підсистему прогнозування тривалості періоду нагріву дуття як частину системи управління роботою групи доменних повітрянагрівачів. Здійснено налаштування і тестування нечіткої моделі при різних значеннях заданої температури доменного дуття для різних форм функцій належності вхідних і вихідних параметрів.

Ключові слова

доменний повітрянагрівач, дуття, прогнозування, нечітка база знань, функція приналежності, ваговий коефіцієнт

Summary

Kobyshe E., Simkin A.

Subsystem of prediction the duration of heating blow period in air heater blast furnace based on fuzzy knowledge base

It was formed fuzzy knowledge base on the process of heating blow in air heater blast furnace based on the analysis of experimental data and the results of computer simulation of cooling of the packing in a blast-furnace air heater. And also it was developed a subsystem of prediction of the heating blow period duration as a part of system to control of air heater blast furnace based on fuzzy model type Mamdani. The adjustment and testing of fuzzy model were realized for different values of a blow air heater set temperature for different forms of membership functions of input and output parameters.

Keywords

air heater blast furnace, blowing, prediction, base of fuzzy knowledge, membership function, weighting factor

Поступила 07.07.2016