

Управление продолжительностью циклов работы доменных воздухонагревателей с использованием имитационной модели

А. С. Прасолов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

aspr.88@yandex.ru

С. М. Андреев

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

asm@magtu.ru

Аннотация. В данном исследовании рассматривается вопрос оптимизации времени переключения доменных воздухонагревателей и разработка системы определения продолжительности цикла нагрева насадки и продолжительности цикла нагрева дутья. Используя имитационную модель, система вычисляет оптимальное время циклов при заданных параметрах для всех воздухонагревателей в блоке и, используя алгоритмы нечеткой логики, определяет продолжительность циклов в следующий период работы блока. Задача системы обеспечить стабилизацию температуры горячего дутья, подаваемого в доменную печь, на максимально возможном значении при текущем теплотехническом состоянии блока воздухонагревателей. Увеличение температуры горячего дутья приводит к экономии кокса на текущую плавку доменной печи.

Ключевые слова: имитационная модель, доменный воздухонагреватель, нечеткая логика, оптимизация времени

I. ВВЕДЕНИЕ

Доменная печь потребляет большое количество тепловой энергии основным источником, которой является горячее дутьё. Горячее дутьё производится в регенеративных печах башенного типа называемых воздухонагревателями. Подача дутья производится почти непрерывно, при этом его температура должна поддерживаться на определенном уровне. Для непрерывной подачи воздуха в печь используются блоки, состоящие из 3–4 воздухонагревателей, при этом остывший воздухонагреватель сменяется нагретым, для стабильного поддержания температуры [1]. Время периодов нагрева и дутья для воздухонагревателей выбирается согласно режимной карты работы, в зависимости от количества работающих воздухонагревателей. При этом существует ряд проблем при эксплуатации блока воздухонагревателей:

- ухудшение состояния насадки воздухонагревателей,
- паузы в подаче горячего дутья, при выпуске чугуна из печи.

При достижении максимальной температуры дымовых газов, воздухонагреватель отсекается от подачи топлива и ждёт перевод в дутьевой режим, при этом теряется тепловая энергия, полученная в период нагрева.

Также возможен простой в период выпуска чугуна из печи. Поэтому не всегда необходимо поддерживать максимальную температуру в период нагрева, увеличивая при этом период нагрева, а также экономя топливо. Определение возможностей каждого воздухонагревателя в блоке и величин коррекции режимной карты должно производиться непрерывно, на протяжении всего времени эксплуатации. Такую оценку наиболее удобно проводить с использованием имитационной модели процесса теплопередачи в насадке, которая может использоваться как в процедуре оптимальной корректировки режимной карты, так и для непрерывной оценки состояния воздухонагревателя для планирования времени достижения максимальной температуры дымовых газов.

II. МОДЕЛЬ НАСАДКИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

Насадка воздухонагревателя (ВН) представляет выложенные друг на друга кирпичи шестиугольной формы с круглыми каналами для протекания теплоносителя. В газовый период дымовые газы протекая по каналам насадки, сверху вниз, передают тепло огнеупорам, а в дутьевой период холодное дутьё протекает по каналам снизу вверх, постепенно нагреваясь подается далее в доменную печь, насадка при этом охлаждается [2]. В модели насадка заменяется толстостенными цилиндрами (рис. 1). Тепловые параметры стенки цилиндров берутся такими же, параметрами материала используемых в данном воздухонагревателе огнеупоров изменяются по высоте (сверху диас, снизу шамот).

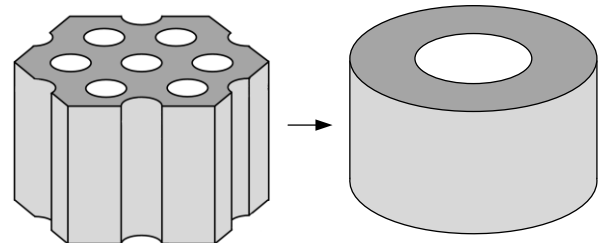


Рис. 1. Представление слоя насадки воздухонагревателя теплотехнически подобным элементом в форме толстостенного цилиндра

Цилиндры накладываются друг на друга в виде трубы, разбитой на n участков одинаковой длины h .

Теплота, отданная или полученная теплоносителем от цилиндра, вычитается (складывается) с энтальпией в предыдущем участке трубы.

Температура теплоносителя протекающего внутри цилиндра для нулевой координаты по высоте берется в соответствии с показаниями датчиков температуры купола для газового периода и температуры холодного дутья в дутьевой период.

Количество теплоты, переданное теплоносителем рассчитывается по закону Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha(T_f - T_w)F \quad (1)$$

где T_f – это температура теплоносителя; T_w – температура стенки; F – площадь поверхности теплообмена; α – коэффициент теплоотдачи.

В период нагрева насадки коэффициент теплоотдачи рассчитывается как сумма конвективного α_c и лучистого α_r теплообмена:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (2)$$

В период дутья лучистый теплообмен минимален, поэтому рассчитывается только конвективный теплообмен.

Конвективный теплообмен рассчитан с помощью следующего уравнения [3]:

$$\alpha_c = (1.123 + 0.283U \cdot d^{-0.4})T_f^{0.25} \quad (3)$$

где U – скорость теплоносителя; d – диаметр канала.

Коэффициент лучистой теплоотдачи от газа к твердой стенке рассчитывают по формуле [4]:

$$\alpha_r = \frac{\sigma(T_f^4 - T_w^4)F}{\left(\frac{1}{\varepsilon_f} - \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)(T_f - T_w)} \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; ε_f – степень черноты дымовых газов; ε_w – степень черноты материала насадки.

Изменение температуры теплоносителя по высоте для i -го рассчитывается участка как:

$$T_{f(i)} = T_{f(i-1)} - \frac{Q}{c_f W} \Delta\tau \quad (5)$$

где c_f – это теплоемкость теплоносителя; W – массовый расход; $\Delta\tau$ – шаг по времени; $T_{f(i-1)}$ – температура теплоносителя в предыдущем участке.

После вычисления количества теплоты переданного теплоносителем к стенке вычисляется температура материала насадки в следующий момент времени:

$$T_{wi}^{\tau+1} = \frac{Q\Delta\tau}{m_w c_w} + T_{wi}^{\tau} \quad (6)$$

где c_w – это теплоемкость материала стенки; m_w – масса стенки.

Для приведения модели к показаниям реального ВН производится поиск нужных значений внешнего, внутреннего диаметров, степени черноты материала, а также скорости течения теплоносителя, при этом

изменяются параметры расхода теплоносителя, массы стенки коэффициента теплопередачи (рис. 2).

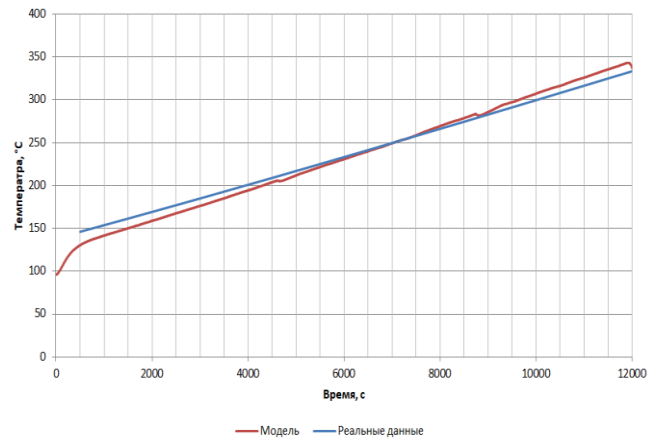


Рис. 2. Изменение температуры дыма внизу насадки в сравнении с реальными данными

Распределение температур по высоте в сравнении с реальными данными распределения температур, можно использовать для определения состояния насадки. Так как измерение температуры по высоте внутри насадки не производится, то можно измерить температуру кожуха ВН. Сравнивая исторические данные работы в начальном периоде эксплуатации с текущими показателями, при этом возможно найти место повреждения и его вид (закупорка, растрескивание, оплавление, нагар сажи и т. д.), изменяя соответствующие параметры.

В воздухонагревателях в дутьевой период горячее дутье смешивается с холодным, это нужно для стабильной температуры подаваемого в домну горячего воздуха [5]. В модели возможно подобрать такое изменение расхода, холодного воздуха, чтобы прогнозировать время дутьевого периода, а также температуру смешанного дутья. График изменения температуры дутья при увеличивающемся расходе представлен на рис. 4.

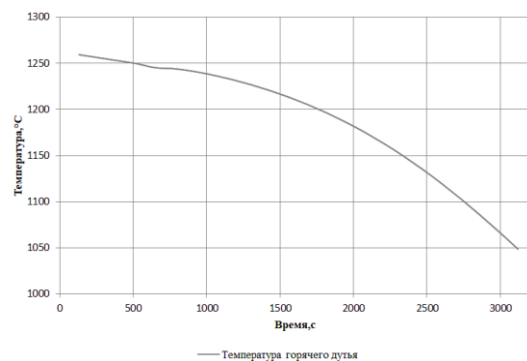


Рис. 3. Изменение температуры горячего дутья при постоянном расходе

III. АЛГОРИТМ РАБОТЫ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Цикл работы ВН состоит из двух основных временных промежутков – времени периода дутья и времени периода нагрева. Так как в работе рассматривается последовательный режим работы, то время нагрева конкретного ВН будет являться суммой времени циклов дутья двух других ВН (7).

$$\begin{cases} \tau_{1h} = \tau_{2b} + \tau_{3b} \\ \tau_{2h} = \tau_{1b} + \tau_{3b} \\ \tau_{3h} = \tau_{1b} + \tau_{2b} \end{cases} \quad (7)$$

где τ_{1h} – время цикла нагрева n -го ВН; τ_{1b} – время цикла дутья n -го ВН.

В работе было принято, что управляемым параметром является время работы ВН в период дутья. Для управления этим параметром в условиях неопределенности состояния ВН в работе предложено использовать регулятор времени на основе нечеткой логики. Для такого типа регулятора требуется формирование базы правил, использование которой позволит формировать направление изменения времени дутья [4].

Для синтеза нечетко-логического регулятора (НЛР), разработана база правил при всех возможных состояниях системы. В качестве критерия оценки работы регулятора используется два параметра системы – это разница значений температур горячего дутья в конце дутьевого периода, а также динамика изменения данного параметра.

Принцип работы системы заключается в следующем – в конце дутьевого цикла работы измеряется минимальная температура горячего дутья. Когда все 3 воздухонагревателя закончили продувку, вычисляется среднеарифметическая температура горячего дутья (8).

$$T_A = \frac{1}{3}(T_1 + T_2 + T_3) \quad (8)$$

где T_A – среднеарифметическая температура горячего дутья; T_1, T_2, T_3 – температуры горячего дутья в конце цикла каждого ВН.

Далее вычисляется разница между среднеарифметической температурой и температурой горячего дутья в конце цикла каждого ВН (9).

$$T'_n = T'_n - T_A \quad (9)$$

Выбирается «слабый» ВН с самой низкой температурой горячего дутья. Далее вычисляются два значения e_1 – разность между температурой горячего дутья «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце цикла продувки (10), $e_{2(i)}$ – величина изменения температур горячего дутья за цикл работы блока (11).

$$e_{1(i)} = T_{(Lo)i} - T_{Ai} \quad (10)$$

$$e_{2(i)} = e_{1(i)} - e_{1(i-1)} \quad (11)$$

где $e_{1(i)}$ – величина разности между температурой горячего дутья $T_{(Lo)i}$ «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце текущего цикла продувки T_{Ai} ; $e_{1(i-1)}$ – величина разности между температурой горячего дутья «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце предыдущего цикла продувки.

Нормирование значений $e_{1(i)}$ и $e_{2(i)}$ производится через весовые коэффициенты K_1 и K_2 , которые являются настроенными значениями НЛР по формулам:

$$X_1 = K_1 e_{1(i)} \quad (12)$$

$$X_2 = K_2 e_{2(i)} \quad (13)$$

Полученные нормированные значения переменных X_1 и X_2 являются входными сигналами НЛР. Значения этих переменных определяют величину отклонения параметров «слабого» ВН от среднего значения состояний ВН в блоке. Значение X_1 определяет саму величину отклонения, а X_2 – скорость изменения величины X_1 при постоянном времени цикла работы ВН.

Так как значения X_1 и X_2 формируются только в конце периода дутья каждого ВН, то особенностью реализации НЛР является выполнение вычислений, только в момент окончания цикла работы всего блока. То есть регулятор обладает свойством дискретности, чтение и изменение параметров производится в определенные моменты времени.

Результатом работы НЛР является выходная лингвистическая переменная Y определяющая направление и скорость изменения времени дутья ВН. Значения изменения времени цикла дутья определены лингвистической переменной Y соответствующей функциями принадлежности: B_1 – Положительное очень большое; B_2 – Положительное большое; B_3 – Положительное малое; B_4 – Положительное очень малое; B_5 – Нулевое; B_6 – Отрицательно очень малое; B_7 – Отрицательно малое. Значения параметра b выходной лингвистической переменной представлены вектором $b = [1; 0,75; 0,5; 0,25; 0; -0,25; -0,5]^T$

Для нечеткого управления используется основное эвристическое правило: «Если наблюдается рассогласование между текущим и средним значениями температуры, тогда необходимо изменение времени дутья для подавления текущего значения рассогласования».

Функционирование предлагаемого нечеткого регулятора определяется следующей базой правил (14):

$$\begin{aligned} R_1 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_1, \\ R_2 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_2, \\ R_3 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3, \\ R_4 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_2, \\ R_5 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3, \\ R_6 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4, \\ R_7 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3, \\ R_8 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4, \\ R_9 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5, \\ R_{10} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4, \\ R_{11} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5, \\ R_{12} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_6, \\ R_{13} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5, \\ R_{14} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_6, \\ R_{15} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_7. \end{aligned} \quad (14)$$

Процедура агрегирования выполняется согласно таблице:

ТАБЛИЦА I. ТАБЛИЦА АГРЕГАЦИИ

X2	X1				
	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0,5	0,25	0	-0,25	-0,5
A2	0,75	0,5	0,25	0	-0,25
A3	1	0,75	0,5	0,25	0

Значение степени истинности каждого ползаклучения определяется как минимум степени истинности i -го подзаклучения и значения функции принадлежности терма из подзаклучения (15).

$$\mu_i(y) = \min\{c; \mu(x)\} \quad (15)$$

где $\mu_i(y)$ – «активизированная» функция принадлежности; $\mu(x)$ – функция принадлежности терма; c – степень истинности i -го подзаклучения.

Аккумуляция нечетко логического вывода производится по методу Мамдани путем объединения функций принадлежности всех подзаклучений (16).

$$\mu'_i = \begin{cases} Sb_i, \max\{\mu_i(y); \mu_i(x)\}; \\ 0. \end{cases} \quad (16)$$

где S – максимальный шаг изменение времени цикла дутья «слабого» ВН.

Изменение времени дутья для n -го ВН определяется дефазификации выходной лингвистической переменной по формуле (17):

$$\Delta t_n = \frac{\sum_{i=1}^m \mu'_i}{X_{1(n)}} (T_{n(i)} - T_{A(i)}) \quad (17)$$

где $T_{n(i)}$ – температура горячего дутья в конце цикла дутья n -го ВН.

После определения времени изменения цикла дутья для слабого ВН, это время перераспределяется между двумя сильными ВН. При этом общее время работы блока не изменяется, а только лишь изменяется время периодов нагрева и дутья в ту или иную сторону. Доля перераспределение времени циклов между двумя другими воздухонагревателями выбирается пропорционально отклонениям от среднего значения (рис. 5).

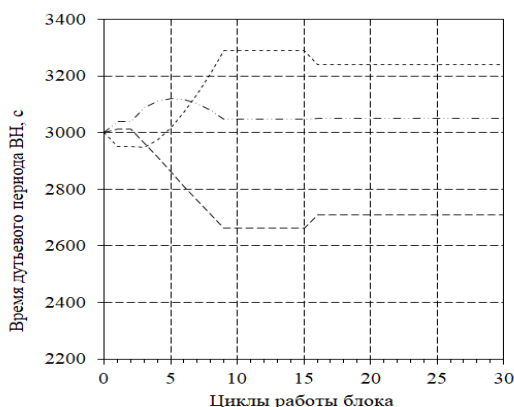


Рис. 4. Изменение времени цикла дутья ВН

При этом минимальная температура горячего дутья повысилась на 60°C, а минимальная на 18 °C (рис. 6).

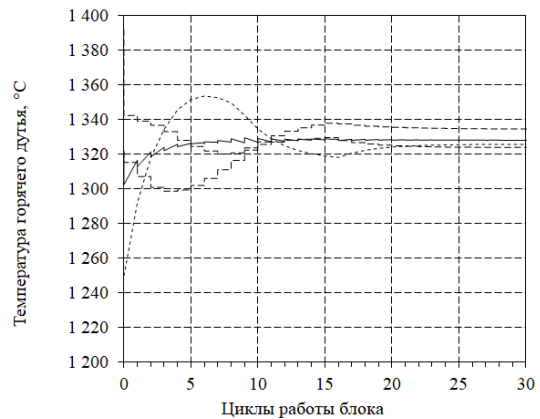


Рис. 5. Изменение температуры горячего дутья ВН

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как в процессе эксплуатации изменяются теплотехнические характеристики воздухонагревателей, то разработка системы для синхронизации работы блока позволит учитывать изменение характеристик, для выработки стратегии управления всем блоком. Использование имитационной модели воздухонагревателей позволит разработать систему автоматического управления для коррекции времени периодов работы всего блока воздухонагревателей. Это позволит увеличить отдачу тепла и повысить температуру дутья, подаваемого в доменную печь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кривцов А.Ю. Исследование и разработка методов повышения эффективности режимов работы доменных воздухонагревателей с учетом их индивидуальных теплотехнических характеристик: Автореферат диссертации. ЛГТУ. - Липецк, 2007. 22. с. 7.
- [2] Прасолов А.С. Математическая модель последовательного режима работы блока воздухонагревателей доменной печи / А.С. Прасолов, С.М. Андреев, В.В. Стебелева // Автоматизированные технологии и производства. 2021. № 2(24). С. 14-17.
- [3] Zhong L., Liu Q., Wang W. Computer Simulation of Heat Transfer in Regenerative Chambers of Self-preheating Hot Blast Stoves // Isij Int. ISIJ INT. 2004. Т. 44. С. 795–800.
- [4] Интеллектуальная система автоматической коррекции длительности периодов для воздухонагревателей доменной печи с учетом их реального состояния / С.М. Андреев, А.С. Прасолов, И.С. Бондарев, Н.В. Швидченко // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 57-66. DOI 10.18503/2311-8318-2023-1(58)-57-66
- [5] Хаджинов А.С. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя / А.С. Хаджинов, Е.А. Хаджинов, В.А. Тищенко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 20. С. 154-159.