

Нусс М. В., инженер,
Трубаев П. А., д-р техн. наук, доц.,
Классен В. К., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

maxnuss@mail.ru

Предложен способ управления технологической работой цементной вращающейся печи, основанный на анализе и управлении физико-химическими и тепломассообменными процессами обжига клинкера. Вывод рекомендаций по управлению печью включает два этапа: определения технологического состояния частей (зон) печи и нахождение управляющих воздействий по вектору состояний этих частей. Структура определения необходимых значений управляющих параметров построена на основе принципа декомпозиции, то есть перераспределения тепла между технологическими частями печного агрегата. Приведены нечеткие зависимости (лингвистические правила) для управления процессом обжига, способ синтеза нечеткой модели и детерминированных зависимостей.

Ключевые слова: управление, нечеткий вывод, вращающиеся печи, обжиг клинкера.

Цементные вращающиеся печи являются сложными объектами с большим количеством взаимосвязанных параметров, характеризующимися сложными тепломассообменными, физико-химическими и химическими процессами обжига клинкера. Поэтому для анализа и стабилизации технологического режима работы печей необходима своевременная и по возможности более полная информация о процессах внутри агрегата, по которой необходимо проводить анализ работы всей печи и определять необходимые действия [1]. Более чем на 80% отечественных заводов применяется мокрый способ производства. Трудность создание систем автоматизации для таких печей, по сравнению с сухим способом, заключается в следующем:

1. Технологические и теплотехнические процессы для сухого способа конструктивно разграничены. Напротив, в мокром способе производства сушка, подготовка и обжиг сырья происходит в одном агрегате. Поэтому любое воздействие на печь влияет на все процессы, протекающие при получении клинкера, а управление печами мокрого способа требует использования большего количества параметров.

2. Значительная часть теплоты в печи тратится на декарбонизацию сырья. В печах сухого способа это происходит в отдельных декарбонизаторах, где теплообмен между газом и материалом значительно интенсивнее, чем внутри вращающейся печи. Это позволяет для печей сухого способа стабилизировать процесс без задержки времени.

Целью работы является разработка модели управления вращающейся печью мокрого способа производства, предназначенной для стабилизации режима работы вращающейся печи и интенсификации процесса обжига цементного клинкера. Для этого на основе современных представлений и научных знаний разработаны

основные положения управления печью, создана модель технологической работы печи и правила управления процессом обжига.

Определение стратегии управления вращающейся печью

Вращающаяся печь является сложным нелинейным объектом, для которого возможно использование различных неравнозначных способов изменения состояния для перехода в требуемый режим работы. Одной из основных задач при создании информационных систем для анализа работы и управления цементной вращающейся печью, основанных на нечеткой логике, является получение адекватного оптимального множества правил, то есть разработка стратегии управления печью.

Стратегию управления определяют два фактора – субъективный и методологический: кто составляет правила и как они составляются.

Традиционно правила по управлению технологическими объектами составляются на основе опросов операторов, работающих на них. Из-за сложности объекта машинист вращающейся печи выделяет при управлении 2...4 параметра, упуская из виду остальную информацию. Само управление осуществляется машинистом на основе ряда шаблонных действий. Поэтому наборы правил, составленных по опросам машинистов, неполны и часто не являются оптимальными с точки зрения стратегии управления. С другой стороны, попытка связать большое количество параметров описанием всех возможных ситуаций является наиболее целесообразным для несложных объектов, но при применении к вращающейся печи приводит к большому количеству часто по сути одинаковых правил, не позволяет точно описать стратегию управления и приводит к ошибкам при нечетком выводе [3]. Получение правил на основе статистических зависимостей для сложных объектов

с большим числом параметров невозможно из-за множественной взаимной корреляции параметров.

Главной задачей при разработке информационных систем по управлению цементными вращающимися печами является создание методов построения наборов правил, четко определяющих стратегию управления печью и основанных на современных представлениях и научных знаниях о цементной технологии.

Положения, применяемые при стабилизации технологического режима работы вращающейся печи

Для определения методов построения правил для управления печью был проведен анализ причин нарушения режима работы вращающихся печей и способов возврата печи в нормальное состояние. Он проводился по результатам промышленных испытаний печей семи заводов, а также с использованием литературных источников. По результатам анализа нахождение необходимого управляющего воздействия предлагается основывать на трех положениях.

1. Исключение причинности отклонения (первопричины выхода печи из заданного режима работы).

При систематизации знаний по управлению вращающейся печью установлено, что необходимые управляющие воздействия зависят лишь от технологического состояния, в котором находится печь. С другой стороны, во многих случаях информация о причине выхода вращающейся печи из режима не позволяет дать количественную оценку степени возмущения (например при кратковременном изменении питания, состава

сырья, прекращении пылевозврата). Поэтому предлагается степень и характер возмущения определять по тепловому состоянию печи, вне зависимости от первопричины возмущения, а необходимое воздействие – только по текущему состоянию печи. Это позволяет формализовать правила и значительно уменьшить их количество. Положение исключения причинности подтверждается в реальных производственных условиях, если ситуация не является аварийной или критической.

2. Декомпозиция объекта.

Вращающаяся печь является объектом с распределенными параметрами, который в соответствии с принципами системного анализа можно представить в виде последовательности ячеек идеального смешения (зон печи), характеризующихся завершенностью определенных стадий переработки сырья в клинкер [2]. Вместо оценки состояния всей печи, она разбивается на две-четыре технологических частей (зон), и управляющие воздействия определяются по вектору состояний этих частей (рис. 1). Таким образом, множество возможных состояний цементной вращающейся печи формируется на основе морфологического анализа, когда исходная задача разбивается на ряд независимых подзадач. Исходя из этого принципа, поддержание необходимого режима обжига заключается в перераспределении тепла между технологическими частями печи. Декомпозиция печи позволяет разделить задачу оценки состояния зон и задачу определения управляющих воздействий, и правила управления не будут зависеть от конкретного набора регистрирующих приборов на печи.

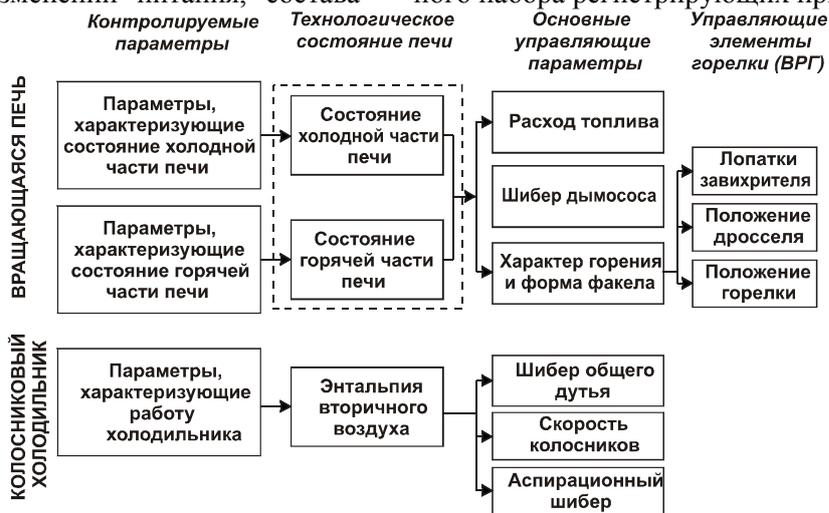


Рис. 1. Декомпозиция вращающейся печи и колосникового холодильника

3. Разделение воздействий для компенсации возмущения и воздействий для перехода в новый режим работы.

Изменение входных параметров приводит к выходу печи из нормального режима работы. Выдвинуто предположение, что количество теп-

лоты, подаваемой в технологическую зону печи, складывается из теплоты, необходимой для возмещения потери тепла в зоне и теплоты для компенсации текущего изменения параметра. Это положение позволяет в информационной системе произвести объединение нечеткой мо-

дели и детерминированных зависимостей (рис. 2).



Рис. 2. Принцип разделения

компенсации возмущения и перехода в новый режим

Принципы обеспечивают основу модели управления процессом обжига, состоящей из двух этапов:

- по значениям контролирующих параметров определение состояния технологических частей печи;
- нахождение управляющих воздействий по состоянию этих частей.

Нечеткие зависимости (лингвистические правила) для вращающейся печи

В соответствии с выдвинутыми положениями, разработана нечеткая модель процесса обжига клинкера. Печь разбивается на 2 ... 4 части, количество которых определяется системой контроля печи:

- холодную часть, состоящую из зон сушки и подогрева;
- зону декарбонизации (может быть выделена при наличии газоанализатора);
- горячую часть, включающую зоны декарбонизации и спекания или только зону спекания;
- зону охлаждения, состоящую из зоны охлаждения печи и холодильника.

Состояние каждой части характеризуется лингвистическими терминами и определяется по контролируемым параметрам, имеющимся на печи. Параметры и состояние элементов печи описываются семью терминами – «много ниже нормы», «ниже нормы», «несколько ниже нормы», «норма», «несколько выше нормы», «выше нормы», «много выше нормы». Исходя из полученного состояния, управляющими параметрами производится перераспределение теплоты между зонами или изменяется количество теплоты, подаваемой в печь (см. рис. 1).

Оценка состояния элементов и определение управляющих воздействий происходит с использованием нечеткой логики согласно разработанным множествам технологических правил. Данные множества правил являются, по сути, нечеткими технологическими зависимостями между параметрами, характеризующими процесс обжига. Лингвистические правила разрабатывались по результатам промышленных испытаний и анализа литературных данных.

Получены множества правил для различных вариантов наборов параметров, имеющихся на отечественных заводах. Так, для холодной части рассмотрено пять вариантов возможной комбинации контролируемых параметров (табл. 1), для зоны декарбонизации – три (табл. 2), для горячей части – семь (табл. 3). В каждый из этих вариантов входит от пяти до 25 правил, основанных на ряде линейных зависимостей.

Таблица 1

Наборы контролируемых параметров для холодной части печи

Контролируемые параметры	Наборы параметров				
	1	2	3	4	5
Температура отходящих газов $t_{ог}$	•	•	•	•	•
Температура материала в зоне подогрева $t_{зп}$		•			•
Количество гранул материала после цепной завесы $N_{гп}$				•	
Влажность материала после цепей W_m			•		•
Влажность шлама, поступающего в печь P					

Таблица 2

Наборы контролируемых параметров для оценки зоны декарбонизации

Контролируемые параметры	Наборы параметров		
	1	2	3
Температура в зоне декарбонизации $t_{зд}$	•		•
Содержание технологического CO_2 в отходящих газах CO_2^p		•	•

Таблица 3

Наборы контролируемых параметров для горячей части печи

Контролируемые параметры	Наборы параметров						
	1	2	3	4	5	6	7
Видимость в головке печи E_k	•		•			•	•
Нагрузка на главный привод печи $A_{гп}$	•	•	•	•	•		
Преобладающий размер гранул клинкера $d_{кл}$		•	•		•		•
Температура в зоне декарбонизации $t_{зд}$				•	•	•	
Уровень подъема материала H_m						•	•

Для холодной части использованы следующие зависимости: между состоянием части и температурой отходящих газов – прямая зависимость; температурой в зоне подогрева – прямая; влажностью материала после цепей – обратная; количеством гранул материала после цепной завесы – прямая, влажностью шлама – прямая.

Для зоны декарбонизации между состоянием зоны и температурой материала в зоне декарбонизации – прямая зависимость; содержанием технологического CO_2 в отходящих газах – обратная.

Между состоянием горячей части печи и контролируруемыми параметрами имеют место зависимости вида: видимость в головке печи – не может быть выражена в численном виде; нагрузка на главный привод – прямая; преобладающий размер гранул клинкера – в зависимости от значения возмущения прямая или обратная; температура в зоне декарбонизации – прямая; уровень подъема материала в печи – прямая.

Все множества правил подтверждаются известными детерминированными зависимостями.

Аналогично разработаны правила оценки состояний технологических зон вращающейся печи и определения управляющих воздействий для возможных наборов управляющих параметров. Первоначально вычисляются три основных управляющих параметра: расход топлива; процент открытия шиберы дымососа (либо необходимое разрежение в пыльной камере); характер горения и форма факела. Лингвистический параметр «Характер горения и профиль факела X_ϕ » определяет распределение температуры в зоне спекания, а также режим горения топлива. По нему рассчитываются управляющие параметры горелки (рис. 1). Предлагаемый способ позволил создать универсальные множества лингвистических правил для любых типов горелок, в том числе комбинированных.

Лингвистические правила осуществляют привязку информационной системы к конкретным задачам и условиям работы печи. Изменяя множество правил, можно корректировать технологическую задачу режима обжига, необходимую технологию цеха. Преимущества нечеткой логики, кроме использования качественных параметров, заключаются также в том, что правила в лингвистических моделях не должны охватывать все возможные варианты, так как возможности теории нечетких множеств позволяют производить вывод в неизвестных ситуациях, основываясь на заданных правилах.

Модель стабилизации процесса обжига строится на основе нечеткого вывода по следующему выражению:

$$B' = \max_i (\bigcap_j (A'_j \circ R_{ij})),$$

где B' – выходное нечеткое множество; A' – входное нечеткое множество; R – матрица нечеткого отношения, вычисляемая по одному из видов импликаций. i – номер правила; j – номер входного параметра; \circ – операция минимаксной композиции.

Нечеткая модель, несмотря на свои достоинства, не обеспечивает решение всех требуемых технологических задач управления процессом обжига цементного клинкера. Важное значение для печи имеют свойства сырьевого шлама и эффективность процесса горения, определяющие расход топлива на обжиг и качество получаемого клинкера. Поэтому предлагается дополнить нечеткую модель детерминированными зависимостями (учетом изменения свойств шлама) и ограничениями (по теплоснабжению, коэффициенту избытка воздуха и положению зоны горения факела). Это позволяет сделать выдвинутое положение о разделении воздействий для компенсации возмущения и воздействий для перехода в новый режим работы.

Учет изменения свойств шлама

Состав сырьевого шлама является одним из основных параметров, влияющим на режим обжига. Колебания химических и физических свойств шлама вызывают необходимость изменения режима обжига. Это особенно важно при выпуске рядового клинкера из нетрадиционных видов сырья и техногенных продуктов.

Выделено два способа расчета управляющих параметров: с учетом и без учета свойств шлама. В первом случае анализируется изменение свойств шлама и по разности тепловых балансов двух режимов работы определяется необходимое воздействие для компенсации этого изменения. Во втором случае изменение свойства шлама не отслеживается, а необходимое воздействие определяется по произошедшему изменению контролируемых параметров печи. Этот способ наиболее близок к управлению, осуществляемому машинистом печи.

Оба способа расчета имеют некоторые недостатки. Так, при учете свойств шлама невозможно принять во внимание все факторы, например, изменение пластичных свойств шлама, увеличение запесоченности шлама, увеличение потерь через корпус печи, и поэтому управляющие воздействия могут быть определены с некоторой погрешностью. При управлении без учета свойств шлама необходимое воздействие определяться с запозданием, так как из-за инер-

ционности печи изменение контролируемых параметров и выход из режима произойдет через некоторое время после изменения свойств шлама. Но несмотря на недостатки, первый метод управления является более рациональным, так как заблаговременно реагирует на изменение свойств сырьевой смеси (при условии своевременного определения химических свойств шлама). Предлагается использовать оба способа одновременно, с возможностью выбора оператором печи необходимого.

Постоянство теплового режима печи

Постоянный тепловой режим печи необходим для обеспечения стационарности протекающих в ней процессов [1]. Как правило, стабильность режима обжига поддерживается изменением расхода топлива при постоянном питании печи, что сопровождается различными переходными процессами (изменением положения и длины зон печи, количества выделяющегося CO_2 , количества теплоты, поступающей в холодную часть печи и т. п.). Такие переходные процессы представляют собой временные возмущения, величина которых зависит от управляющего воздействия. Большие по величине значения управляющих воздействий сами могут являться причинами дальнейшего выхода печи из нормального режима работы.

Так как тепловой режим печи определяется объемной удельной тепловой мощностью, то оптимальному тепловому режиму соответствует определенное значение теплонапряжения. Наибольшее значение объемного теплонапряжения соответствует ситуация, когда полное сгорание топлива невозможно, то есть имеется опасность недожога, а наименьшее – когда по производительности слишком большой запас, то есть печь работает в неэкономичном режиме. Согласно [1] можно выделить допустимый интервал изменения объемного теплонапряжения, при котором следует поддерживать постоянную производительность. На границах интервала поддерживается постоянный тепловой режим с изменением производительности.

Такое ограничение позволит снизить вредное влияние на работу печи переходных процессов, уменьшить удельный расход топлива на обжиг, а также предотвратить ситуации, связанные с недожогом топлива и работой печи в неэкономичном режиме.

После расчета управляющего параметра полученное значение проверяется на заданные ограничения. При несоблюдении допустимого теплонапряжения расход топлива корректируется до возможного предельного значения с одновременным изменением производительности печи. Также проверяются разрежение в пыль-

ной камере – по допустимому значению коэффициента избытка воздуха, параметры газовой горелки – по допустимому положению зоны горения печи.

Выводы

Разработаны модель и правила для управления технологической работой цементной вращающейся печи применительно к информационным системам, основанные на анализе и управлении физико-химическими и тепломассообменными процессами обжига клинкера. Вывод рекомендаций по управлению печью включает два этапа: определения технологического состояния частей (зон) печи и нахождение управляющих воздействий по вектору состояний этих частей. Структура определения необходимых значений управляющих параметров построена на основе принципа декомпозиции, то есть перераспределения тепла между технологическими частями печного агрегата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В. К. Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печью. В помощь машинистам печей и технологам цеха "Обжиг" / В.К. Классен // Цемент и его применение, 2004. – № 2. – с.39-42.
2. Кафаров В. В. Математическая модель технологического процесса производства цемента / В. В. Кафаров, В. И. Сатарин, В. Б. Шифрин // Цемент, 1974. – № 10. – с. 15-16.
3. Пономарев А.С. Нечеткие множества в задачах автоматизированного управления и принятия решений / А.С. Пономарев. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 232 с.