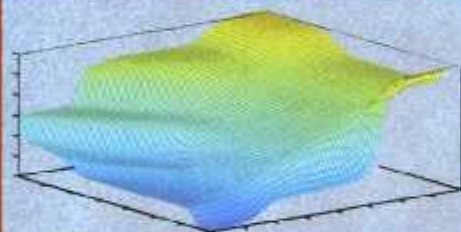


**М. В. Нусс, П. А. Трубаев  
В. К. Классен, В. Н. Коновалов**

**СОВЕТУЮЩАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ  
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**



**Белгород  
2015**

**М.В. Нусс  
П. А. Трубаев  
В. К. Классен  
В. М. Коновалов**

**СОВЕТУЮЩАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ  
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

Монография

Белгород  
2015

УДК 681.518:66.041.491(666.94)

ББК 32.973.2-018

С 56

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета **Н. В. Мозговой**

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова **П.В. Беседин**

Начальник участка АСУТП ЗАО «Осколцемент» **Р.В. Чуликов**

**Советующая** интеллектуальная система управления процессом обжига цементного клинкера: монография / М. В. Нусс, П. А. Трубаев, В. К. Классен, В. М. Коновалов. – Белгород: Изд-во БГТУ; БИЭИ, 2015. – 171 с.

ISBN

В монографии предложена информационно-советующая система, построенная на базе нечёткой логики и предназначенная для контроля и анализа технологического состояния цементной вращающейся печи и определения требуемого управления, позволяющего стабилизировать режим работы печи и интенсифицировать процесс обжига цементного клинкера.

Издание рассчитано на широкий круг научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами автоматизации и управления работой цементных вращающихся печей.

Публикуется в авторской редакции.

**УДК 681.518:66.041.491(666.94)**

**ББК 32.973.2-018**

© Нусс М. В., Трубаев П. А.,  
Классен В.К., В.М. Коновалов, 2015

© Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Моделирование технологической работы цементной вращающейся печи (современное состояние вопроса) .....</b>	<b>8</b>
1.1. Технологические схемы обжига цементного клинкера.....	8
1.2. Процессы, происходящие при обжиге клинкера.....	10
1.3. Задачи интенсификации режима обжига во вращающихся печах .....	14
1.4. Математическое описание работы цементной вращающейся печи.....	16
1.5. Анализ работы промышленных объектов на основе нечёткой логики .....	33
1.6. Выводы по главе.....	44
<b>2. Способы стабилизации заданного режима обжига для использования в информационных системах .....</b>	<b>46</b>
2.1. Анализ причин выхода процесса обжига из режима и особенностей работы вращающейся печи.....	46
2.2. Способы стабилизации технологического режима работы вращающейся печи .....	55
2.3. Анализ влияния щелочных компонентов на режим обжига.....	63
2.4. Анализ режимных параметров цементной вращающейся печи мокрого способа производства .....	70
2.5. Описание параметров, характеризующих процесс обжига.....	80
2.6. Выводы по главе.....	86
<b>3. Технологические зависимости между параметрами процесса обжига, выраженные в нечётком виде .....</b>	<b>88</b>
3.1. Структура модели процесса обжига .....	88
3.2. Оценка теплового состояния холодной части печи .....	90
3.3. Оценка теплового состояния зоны декарбонизации .....	97
3.4. Оценка теплового состояния горячей части печи.....	100
3.5. Определение необходимого технологического режима для текущей производственной ситуации .....	108
3.6. Выводы по главе.....	115
<b>4. Особенности технологической работы цементной вращающейся печи.....</b>	<b>116</b>
4.1. Система нечёткого вывода с учётом особенностей предлагаемого алгоритма.....	116
4.2. Влияние скорости изменения регулируемых параметров на необходимые управляющие воздействия .....	119

4.3. Управление вращающейся печью в критических и аварийных ситуациях.....	125
4.4. Управление вращающейся печью при переходе из одного режима обжига в другой.....	128
4.5. Способы расчёта регулирующих параметров .....	130
4.6. Расчёт необходимого расхода топлива .....	131
4.1. Расчёт открытия шиберы дымососа и разрежения в пыльной камере .....	132
4.2. Расчёт открытия шиберы дымососа и разрежения в пыльной камере .....	133
4.3. Расчёт положения горелки, дросселя и завихрителя для заданного характера горения и профиля факела.....	139
4.4. Выводы по главе.....	143
<b>5. Информационная система по управлению процессом обжига цементного клинкера .....</b>	<b>144</b>
5.1. Характеристики советующей системы по управлению цементной вращающейся печью .....	144
5.2. Представление параметров и зависимостей процесса обжига в советующей системе .....	147
5.3. Применение советующей системы в управлении цементной вращающейся печью .....	152
5.4. Выводы по главе.....	156
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....</b>	<b>157</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>159</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Самой значительной статьёй в себестоимости цемента являются затраты на топливо при обжиге клинкера. Эти затраты резко возрастают в условиях нестабильного режима работы вращающихся печей. Нестабильность режима ведёт к снижению активности клинкера и выпуску бракованной продукции. Таким образом для интенсификации процесса обжига, снижения себестоимости цемента и повышения его качества необходимо обеспечить наиболее стабильную работу печи в заданном режиме, определённом для данных технологических условий обжига с учётом опыта эксплуатации печей и результатов промышленных испытаний. Для эффективной работы необходимо проводить анализ состояния всей печи, используя полный спектр имеющейся информации, и на основе этого определять технологически необходимые действия. Поэтому решение задачи интенсификации процесса обжига возможно только на базе научных знаний о технологии цемента с использованием информационных технологий.

Вращающиеся печи являются сложными объектами с большим количеством взаимосвязанных параметров, характеризующих сложные тепломассообменные, физико-химические и химические процессы обжига цементного клинкера. Управление цементными вращающимися печами осуществляется машинистами на основе показаний контрольных приборов. Основную роль в управлении печью играет профессионализм оператора, который руководствуется субъективным опытом. Количественное увеличение контролирующей аппаратуры в таких случаях не приводит к повышению качества управления, так как человек не в состоянии охватить всю поступающую информацию, а выделяет и использует лишь 2...4 параметра, являющиеся по его мнению наиболее значимыми. При этом оператор (машинист печи) упускает из виду остальные параметры, часто имеющие важное значение.

В настоящее время автоматизация печей мокрого способа производства осуществляется в виде локальных систем автоматического регулирования. Разработанные системы автоматизации работы печей на основе традиционных методов не нашли широкого распространения на заводах из-за ряда факторов, таких как: недостаточной оснащённостью печного агрегата измерительными приборами в виду сложностью контроля ряда параметров; наличием недетерминированных возмущений; отсутствием полных знаний о сложных процессах, протекающих внутри печи; невозможностью создать адекватную математическую модель печи на основе детерминированных зависимостей с приемлемыми для задач автоматизации точностью и временем решения; узкая область применения статистических моделей.

В отечественной цементной промышленности преобладает мокрый способ производства цемента, замена которого в ближайшее время из-за экономических затруднений неосуществима. Поэтому создание информационной системы для анализа технологического состояния вращающихся печей мокрого способа производства и определения необходимых управляющих воздействий является актуальной задачей.

В монографии предложена информационно-советующая система, построенная на базе нечёткой логики и предназначенная для анализа, стабилизации и изменения технологического режима работы цементных вращающихся печей.

Методы, используемые в информационно-советующей системе, основаны на системном анализе технологической и теплотехнической работы печи. В работе рассмотрены следующие задачи:

1. На основе современных представлений и научных знаний разработаны основные положения управления процессом обжига цементного клинкера для стабилизации теплотехнологического состояния агрегата.

2. Проанализировано влияние соединений щелочных металлов на распределение необходимого количества теплоты по печи и на режим обжига.

3. Разработана модель теплотехнологической работы печи и производственные правила вывода для принятия решений об управлении процессом обжига. Произведена адаптация нечёткого логического вывода применительно к технологии получения клинкера. Разработаны способы нечёткого управления печью в переходных режимах, в критических и аварийных ситуациях.

4. Разработана информационная советующая система, предназначенная для контроля и анализа технологического состояния цементной вращающейся печи и выдачи рекомендаций по необходимым управляющим воздействиям.

Созданная интеллектуальная советующая система предназначена для контроля и анализа технологического состояния цементной вращающейся печи и определения требуемого управления, позволяющего стабилизировать режим работы вращающейся печи и интенсифицировать процесс обжига цементного клинкера. Научную новизну решённых задач составляют:

- способы анализа, стабилизации и изменения технологического режима работы цементных вращающихся печей, предназначенные для использования в интеллектуальных системах интенсификации процесса обжига и основанные на системном подходе к анализу технологической и теплотехнической работы печи;

- методика дуального нечёткого управления теплотехнологическим режимом работы вращающейся печи, состоящая из двух этапов: оценка вектора состояния технологических зон печи и нахождение тре-

буемых воздействий по состоянию этих зон с помощью алгоритма нечёткого вывода (по процедуре «фаззификация - агрегирование - активизация - аккумуляция - дефаззификация»). Этапы нечеткого вывода основаны на разработанных двух нечётких продукционных системах, первая из которых позволяет оценивать состояния зон печи в зависимости от значений технологических величин, характеризующих эти зоны, а во второй antecedentes являются оценки теплового состояния агрегата, а консеквентами управляющие воздействия для стабилизации теплотехнологического режима;

– модель стабилизации работы печи, построенная на нечётких зависимостях между технологическими величинами, которая в соответствии с алгоритмом компенсирования дополняется детерминированными зависимостями (учёт изменения свойств шлама) и ограничениями (по теплонапряжению, коэффициенту избытка воздуха, положению зоны горения факела и содержанию щелочных соединений в пыли электрофильтров).

Издание рассчитано на широкий круг научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами автоматизации и управления работой цементных вращающихся печей. Также она может служить пособием для студентов и аспирантов, изучающих методы управления и автоматизации теплотехнологических процессов.



# 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА)

## 1.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

В настоящее время для обжига цементного клинкера применяются вращающиеся печи сухого, мокрого и комбинированного способа производства. Технологические схемы трёх способов представлены на рис. 1.1. Основное различие между схемами в способе приготовления сырья, а также в том, что в сухом и комбинированном способах обжиг проводится в нескольких агрегатах. В последних способах сырьё проходит через два - четыре циклонных теплообменника, затем, возможно, через аппарат - декарбонизатор, имеющий свою подачу топлива, и лишь после этого нагретое и подготовленное сырьё подаётся в печь.

Известно довольно большое количество систем для анализа, контроля и управления режимом работы печных агрегатов сухого способа производства [1-4], но для печей мокрого способа их создание встречает большие затруднения.



**Рис. 1.1. Технологические схемы обжига клинкера**

Основные причины такого положения в следующем:

1. Технологические и теплотехнические процессы для сухого способа конструктивно разграничены. В мокром способе производства сушка, подготовка и обжиг сырья происходит в одном агрегате. Поэтому технологически задача анализа и управления для вращающихся печей мокрого способа намного сложнее, так как любое воздействие влияет на все процессы, протекающие при получении клинкера.

2. Затраты теплоты для процессов минералообразования клинкера определяются главным образом эндотермической реакцией разложения карбонатов [5, 6]. Печи сухого способа, как правило, оборудованы декарбонизаторами, где сжигается 50-65% топлива, подаваемого на обжиг. Перенос теплоты к материалу во взвешенном слое значительно эффективнее, чем во вращающихся печах мокрого способа, где теплообмен от газового потока осуществляется к слою материала. Таким образом, в печах сухого способа несложно обеспечить постоянство температуры и необходимую степень декарбонизации, что позволяет легко и без задержки времени стабилизировать процесс.

Приведённые различия показывают, насколько проще задача управления для печей сухого способа производства [7].

В отличие от промышленно-развитых стран, где в настоящее время преобладают сухой и комбинированный способы, около 80% печей заводов России работают по мокрому способу производства. Несмотря на значительно меньшие затраты топлива в печах сухого способа, существует ряд причин, которые делают экономически нецелесообразной реконструкцию технологических линий с их переводом на сухой или комбинированный способы, а в ряде случаев приводят к более высокой эффективности мокрого способа. Основными из них являются:

- высокая естественная влажность сырья, характерная для отечественных заводов, увеличение которой приводит к возрастанию затрат на сушку сырьевой смеси [8];

- большое содержание хлоридов и щелочей в сырье, что является причиной зарастания настывлями циклонных теплообменников, газоходов и большими трудностями в эксплуатации печного агрегата [9];

- необходимость в значительных капитальных затратах при переводе печей с мокрого на сухой способ производства;

- лучшая степень экологической безопасности мокрого способа производства;

- простота и высокое качество измельчения и усреднения сырьевой смеси при мокром способе;

- характерная для условий России более высокая стоимость электроэнергии по сравнению с природным газом (соотношение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии к 1 м<sup>3</sup> природного газа в России составляет 0,7...0,9, а в Европе – 0,2...0,4), что приводит к худшим экономическим

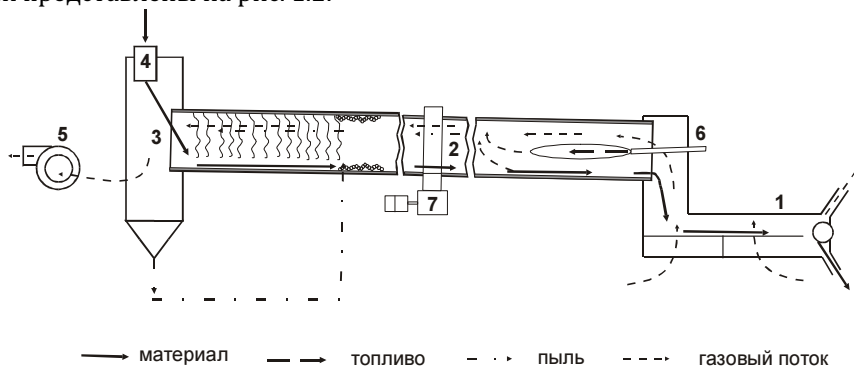
показателям для сухого способа производства по сравнению с европейскими странами.

В связи с этим, а также значительно большей сложностью управления печами мокрого способа, в работе в первую очередь исследовались именно эти агрегаты. Но предлагаемый системный подход позволяет применить результаты работы и для печей сухого и комбинированного способов производства.

## 1.2. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ОБЖИГЕ КЛИНКЕРА

Как отмечается в работе [10], хотя клинкер производится уже более 100 лет, еще не получена ясная картина всего множества физических и химических процессов, протекающих во вращающейся печи. Следовательно невозможно создать детерминированную модель процесса обжига, обладающую требуемой для систем управления универсальностью, точностью и приемлемым временем расчёта. Рассмотрим основные особенности процесса обжига, которые необходимо учитывать при управлении печью.

Устройство и материальные потоки в цементной вращающейся печи представлены на рис. 1.2.



**Рис. 1.2. Материальные потоки в цементной вращающейся печи:**

1 – колосниковый холодильник; 2 – вращающаяся печь; 3 – пыльная камера и электрофильтр; 4 – шламовый питатель; 5 – дымосос; 6 – топливная форсунка; 7 – привод печи

Печь мокрого способа условно разделяется на шесть технологических зон (табл. 1.1), выделенных В.Н. Юнгом [4, 6, 11, 12]. Приблизительный характер изменения массы материалов и температур по длине печи на основе данных из работ [6, 11, 13] показан на рис. 1.3.

В реальности в промышленных печах нет чёткой границы между соседними зонами. Деление печи и процессов клинкерообразования на конкретные зоны можно делать весьма условно, так как отдельные процессы часто накладываются друг на друга.

Таблица 1.1

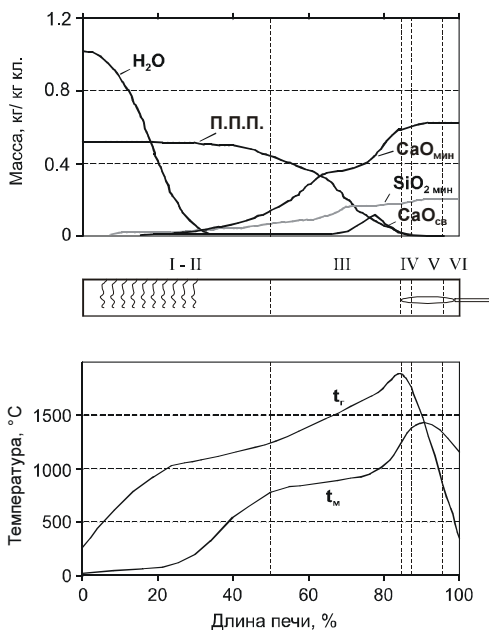
**Технологические зоны цементной вращающейся печи**

№	Наименование зоны	Температура материала	Длина зоны, % [6]
I	Сушки	70-80°C, к концу зоны 200 °C	20...25
<p><i>Основные процессы, происходящие в зоне</i> Испарение физической влаги. Частичная конденсация щелочных соединений. Существует два варианта протекания процессов:</p> <p>1) цепная завеса с низкой плотностью (как правило, гирляндная), влажность материала после цепной завесы не менее 8...10%, количество гранул 60...95%;</p> <p>2) цепная завеса свободновисящая высокой плотности, влажность после цепей практически отсутствует, количество гранул 10...40%.</p> <p>Второй вариант предпочтителен для сырья, несклонного к образованию гранул. Теплота в зоне затрачивается на испарение и нагрев материала, потери через корпус печи очень малы. Теплообмен конвективный.</p>			
II	Подогрева	200...750°C	25...35
<p><i>Основные процессы, происходящие в зоне</i> Выгорают органические примеси, удаляется гидратная влага из глинистых минералов с частичным разложением их на отдельные составляющие. Материал движется вдоль печи, теплообмен идёт в основном между газом и материалом. Теплообмен конвективный. Теплота затрачивается на дегидратацию и нагрев материала, потери через корпус печи незначительны.</p>			
III	Декарбонизации	750...1100°C	30...35
<p><i>Основные процессы, происходящие в зоне</i> Происходит завершение дегидратации, диссоциация карбонатов с выделением CO<sub>2</sub>, образование C<sub>2</sub>F и C<sub>2</sub>S, появление 2C<sub>2</sub>S·CaCO<sub>3</sub> (спуррита). Декарбонизация является наиболее энергоёмкой реакцией клинкерообразования. Теплота в зоне тратится на диссоциацию и нагрев материала, здесь наибольшие потери через корпус. Теплообмен лучистый и конвективный.</p>			
IV	Экзотермических реакций	1100...1300°C	3...5
<p><i>Основные процессы, происходящие в зоне</i> Происходит насыщение известью CA до C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> и далее до C<sub>3</sub>A (трехкальцевого алюмината), образование C<sub>4</sub>AF (алюмоферритов кальция) и C<sub>2</sub>S, завершается процесс твердофазового спекания материала. Преобладает лучистый теплообмен. Расход теплоты идёт на нагрев материала и потери через корпус печи, затраты теплоты компенсируются экзотермическими реакциями.</p>			
V	Спекания	1300...1450...1300°C	10...15
<p><i>Основные процессы, происходящие в зоне</i> Появляется расплав (при температуре 1450 °C количество расплава 20-30% от массы смеси [11]), заканчивается образование клинкерных минералов, происходит растворение в жидкой фазе свободного оксида кальция и образование C<sub>3</sub>S (алита), происходит агломерация клинкера. Теплообмен в основном лучистый. Теплота тратится на образование расплава и образование алита.</p>			

№	Наименование зоны	Температура материала	Длина зоны, % [6]
VI	Охлаждения	1300...1200°C	2...4

*Основные процессы, происходящие в зоне*

Происходит кристаллизация минералов и застывание расплава. Длительное нахождение клинкера при высоких температурах сопровождается клинкерным пылением. Во время медленного охлаждения возможно полиморфное превращение  $\beta$ -C<sub>2</sub>S в  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S и снижение активности клинкера.



**Рис. 1.3. Изменение температуры материала и газа, содержания материала в зависимости от длины печи:**

I - II - зоны сушки и подогрева; III - зона декарбонизации; IV - зона экзотермических реакций; V - зона спекания; VI - зона охлаждения; П.П.П. - потери при прокаливании сырья;  $CaO_{св}$  - не связанный в минералы оксид кальция;  $CaO_{мин}$  - связанный  $CaO$ ;  $H_2O$  - физическая влага;  $SiO_{2 мин}$  - связанный в минералы оксид кремния

В реальности в промышленных печах нет чёткой границы между соседними зонами. Деление печи и процессов клинкерообразования на конкретные зоны можно делать весьма условно, так как отдельные процессы часто накладываются друг на друга. Влияние примесных компонентов (щелочей и сульфатов) усложняет химические реакции.

Как видно из табл. 1.1 и рис. 1.3 процессы преобразования сырья происходят по всей длине печи и требуют различного, строго определённого количества теплоты. Стандартные энтальпии образования или разложения некоторых соединений, представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Стандартные энтальпии  $\Delta H$  основных химических реакций в печи

№	Реакция	$\Delta H$ , кДж/ кг	Источник
Зона подогрева (200...750 °С)			
1	$AS_2H_2$ (каолинит) $\rightarrow Al_2O_3 + 2\beta-SiO_2 + 2H_2O$	+ 455	[14, 15]
2	Монтмориллонит $\rightarrow$ продукты разложения	+ 316	[16, 17]
3	Иллит $\rightarrow$ продукты разложения	+ 348	[16, 17]
4	$2FeO \cdot OH$ (гётит) $\rightarrow \alpha Fe_2O_3 + H_2O$ (г)	+ 254	[5]
5	$CaO + SiO_2 \rightarrow \alpha-CS$	- 710	[15]
	$CaO + SiO_2 \rightarrow \beta-CS$	- 766	
6	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ (г)	+ 1397	[15]
Зона декарбонизации (750...1100 °С)			
7	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ (г)	+ 1782	[15]
8	$CaMg(CO_3)_2 \rightarrow CaO + MgO + 2CO_2$	+ 1868	[14]
Зона экзотермических реакций			
9	$3CaO + 2SiO_2 \rightarrow C_3S_2$	- 811	[15]
10	$2CaO + SiO_2 \rightarrow \beta-C_2S$	- 716	[17]
11	$12CaO + 7\alpha-Al_2O_3 \rightarrow C_{12}A_7$	- 57	[15]
12	$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow C_3A$	- 25	[15]
13	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow C_4AF$	- 84	[17]
Зона спекания			
14	Расплав: 54,8% CaO; 22,7% $Al_2O_3$ ; 16,5% $Fe_2O_3$ ; 6% $SiO_2$	+ 406	[11]
15	$\beta-C_2S + SiO_2 \rightarrow C_3S$	+ 12	[17]

Реакции клинкерообразования многостадийные, то есть превращение сырья в клинкерные минералы происходит через ряд промежуточных соединений [11]. Эти химические процессы могут значительно варьироваться в зависимости от вида сырьевых компонентов. Дополнительно на процессы клинкерообразования большое влияние оказывают примеси, содержащиеся в сырьевых компонентах и топливе [18–20].

Наиболее распространены добавки щелочесодержащих соединений. Накоплению этих веществ в материале способствует их внешняя и внутренняя циркуляция. Результаты наблюдений за работой печей [21–23] показали, что щелочные соединения влияют на процессы клинкерообразования, начиная с зоны подогрева, и заканчивая зоной спекания.

Вовлечение в циркуляцию большого количества щелочных соединений вызывает непредвиденные осложнения в работе печей. Так, по данным В. К. Классена [6] в печах различных заводов при содержании примесей ( $R_2O$  и  $SO_3$ ) более 10% наблюдалась высокая степень диссоциации  $CaCO_3$  и усвоения извести. Вследствие этого, концентрация  $CaO_{св}$  в материале снижалась с 20...25 до 4...7%. Этот процесс сопровождался

более ранним образованием белита, смещением и совмещением отдельных технологических зон. Интенсифицирует возгонку щелочей увеличение температуры обжига, увеличение времени выдержки клинкера при высоких температурах, снижение содержания  $SO_3$ ,  $Fe_2O_3$  и количества жидкой фазы [24]. Водяные пары, образующиеся в результате горения газообразного или жидкого топлива, преобразуют щелочи в легколетучие гидроксиды, которые осаждаются в зоне сушки и в электрофильтрах.

На рис. 1.4. показаны результаты ДТА сырьевой смеси с добавкой пыли электрофильтров, содержащей щелочи и сульфаты и без добавки [6].

Видно, что для смеси с добавкой экзотермический эффект образования клинкерных минералов перекрывается эндозэффектом разложения карбоната. Из этого можно сделать вывод, что возврат пыли оказывает значительное влияние на процессы минералообразования и изменение количества пылевозврата полностью меняет характер протекания реакций, и, следовательно, необходимый режим обжига.

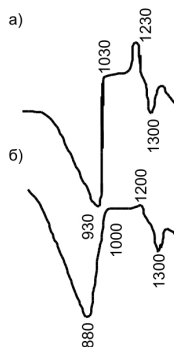
Таким образом при управлении вращающейся печью необходимо обеспечить передачу материалу по длине печи строго определённого количества теплоты, требуемой для протекания процессов клинкерообразования, с учётом состава и свойств сырья.

### 1.3. ЗАДАЧИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РЕЖИМА ОБЖИГА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

Одним из способов интенсификации процесса обжига работающих печей является оптимальное управление их технологическим режимом, то есть поддержание заданного режима с наименьшими отклонениями от него [25]. Для этого необходим анализ режима работы печи, происходящих в ней технологических, теплотехнических, физико-химических процессов, и определение оптимальных с технологической точки зрения способов поддержания и изменения имеющегося режима.

Основными задачами интенсификации процесса обжига согласно работе [26] являются:

- выбор оптимального теплового режима с учётом состава обжигаемого материала;



**Рис. 1.4. ДТА сырьевой смеси:**  
а – без добавки; б – с добавкой 22%  
пыли электрофильтров

- стабилизация выбранного режима при допустимых случайных колебаниях отдельных параметров;
- возможность оптимального перехода из одного режима обжига в другой при выпуске разных видов клинкера;
- пуск вращающейся печи с выходом на заданный режим за минимальное время.

Одной из важнейших технологических задач при обжиге клинкера является поддержание заданного теплотехнологического режима, то есть нагрева материала до нужной температуры с последующей выдержкой в течение времени, необходимого для завершения процессов клинкерообразования [27]. Важное значение при этом имеет скорость нагрева. Таким образом, управление печью заключается в подаче необходимого количества теплоты в нужную зону печи.

По данным работ [10, 28] можно сформулировать следующие принципы анализа и интенсификации работы вращающейся печи. Режим работы печи оценивается по значениям температур газа и материала в ряде контрольных точек (зоне спекания, декарбонизации, после цепной завесы) и составу отходящих газов (характеризующих горение и процесс декарбонизации). При работе печи поддерживается определённая производительность, путём регулирования процента открытия шиберов дымососа обеспечивается полное сгорание топлива, но без излишнего избытка воздуха. Общее количество подаваемой теплоты определяется расходом топлива, а доля теплоты, отдаваемой в горячем и холодном конце – параметрами факела и избытком воздуха (тягой). Также распределение теплоты меняется путём кратковременных изменений расхода топлива. В случае значительного выхода из режима питания печи и её частота вращения снижаются до достижения требуемого прогрева материала в печи.

Технически задача оператора печи заключается в анализе контрольной информации и принятии управляющих воздействий для возврата режима обжига к заданному при возникновении возмущений. В целом на отечественных заводах используются сходные наборы технологических параметров [26, 29]. Количество регулируемых (выходных) параметров достигает 30...40, а регулирующих (входных) – 10...15 [26]. В соответствии с принципами эргономики для оператора такой объём информации является избыточным, и, как правило, он сосредотачивает своё внимание на 4...5 параметрах, упуская, фактически, всю остальную информацию. Усложнение существующих систем контроля при ручном управлении поэтому практически не даёт положительного эффекта [26].

С другой стороны, при обжиге происходит множество взаимосвязанных процессов и наилучшее управление невозможно без чёткого представления оператором состояния всех процессов в печи. Но для этого необходимо обладать большим объёмом знаний в технологии цемента



та, химии, теплотехнике, теории горения. Операторы вращающихся печей обычно не имеют даже среднетехнического образования, поэтому осуществляют управление по набору известных им правил действий в различных ситуациях, во многих случаях без понимания причин отклонений в режиме работы и принципа своих воздействий на печь. Опыт оператора при этом определяется количеством известных ему правил. Кроме того, опыт операторов всегда ограничен теми режимами и ситуациями, в которых они работали, то есть ему присущи все недостатки статистических моделей.

Таким образом разработка информационных систем, обеспечивающих на основе научных принципов анализ всей имеющейся информации и определение необходимых управляющих воздействий, как отмечается в работах [10, 30], позволяет облегчить труд машинистов печей, улучшить качество управления, стабилизировать ход технологических процессов и в итоге снизить удельный расход топлива на обжиг клинкера.

В настоящее время системы управления сложными объектами разделяются на информационно-советующие (выдача рекомендаций по управлению) и автоматического управления, а функции этих систем – на информационные (представление информации об объекте) и управляющие (определение и реализация управляющих воздействий) [26]. Так, в системе автоматического управления, внедрившейся на Себряковском цементном заводе, управляющие воздействия выполнялись только после их подтверждения или корректировки оператором печи.

Ещё одна причина актуальности создания советующей системы следующая. При проведении на заводах экспертами-наладчиками теплотехнических испытаний с последующей наладкой печей вырабатывается определённая стратегия управления, часто кардинально отличающаяся от принятой на заводе. В этом случае важно после завершения работы оставить персоналу, обслуживающему печь, необходимую схему управления в виде советующей системы, с которой он мог бы постоянно консультироваться. Таким образом, важной функцией системы является обучение и передача опыта.

На основании вышеизложенного можно заключить, что создание информационной системы для анализа и регулирования режима обжига требует глубоких технологических знаний, а сами системы должны основываться на научных представлениях о процессе обжига.

#### **1.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ**

С самого начала для анализа и описания режима работы цементной вращающейся печи выделено два направления: «модельный подход» – создание как можно более точной детерминированной модели объек-

та, и «адаптивный подход» – основанный на определении зависимости между отдельными параметрами [10].

### Детерминированное описание

Математическое описание цементной вращающейся печи включает следующие дифференциальные уравнения:

- теплопередачи в печи между газом, материалом и футеровкой, теплотери через футеровку печи;
- движения и неразрывности потоков газа и материала;
- горения топлива;
- физических и химических превращений материальных потоков (состояния материала).

Общий вид этих уравнений приведён в работе [10]. Одними из основных в этой системе являются уравнения состояния материала, определяющие затраты теплоты и температуру материала, а следовательно и температуру газа по длине печи. Но для расчёта хода протекания химических процессов в настоящее время недостаёт надёжных данных. Например, трудно учитываемые факторы (примеси, неоднородность сырья) могут на порядок изменить скорость клинкерообразования [6, 31]. Кроме того, все дифференциальные уравнения содержат константы, получаемые эмпирическим путём, что значительно снижает универсальность моделирования.

Так как создание модели всего печного агрегата необычайно сложно, часто исследователи строят математические модели для какого-либо одного процесса или части установки.

В качестве примера рассмотрим моделирование процесса горения факела в цементной вращающейся печи [32–36].

Уравнение комбинированного переноса теплоты в цилиндрических координатах  $(x, r, \varphi)$  описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial \rho c H}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u H}{\partial x} + \frac{\partial \rho v H}{r \partial r} + \frac{\partial \rho w H}{r \partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho a_{\text{эф}} \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{r \partial r} \left( r \rho a_{\text{эф}} \frac{\partial H}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left( r \rho a_{\text{эф}} \frac{\partial H}{\partial \varphi} \right) = 4\sigma (\alpha T_{\text{л}}^4 - \alpha_{\text{н}} T^4) + Q_0,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\rho$  – плотность газообразной среды, кг/м<sup>3</sup>;  $u, v, w$  – компоненты скорости;  $H$  – удельная массовая энтальпия высокотемпературной газообразной среды;  $a_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент температуропроводности, учитывающий молекулярный и турбулентный перенос теплоты;  $Q_0$  – источник теплоты в единице объёма за единицу времени;  $T$  – термодинамическая температура;  $T_{\text{л}}$  – лучистая температура.

Энтальпия  $H$  является суммой физического теплосодержания, определяемого как произведение массовой удельной теплоёмкости  $c$  (при постоянном давлении) на температуру  $t$  в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), и скрытой теплоты диссоциации  $H_{\text{дис}}$  трёхатомных газов:

$$H = ct + H_{\text{дис}}.$$

Эффективный коэффициент температуропроводности определяется по формуле:

$$a_{\text{эф}} = a + \frac{v_{\text{T}}}{Pr_{\text{T}}},$$

где  $v_{\text{T}}$  – турбулентный аналог кинематического коэффициента вязкости;  $Pr_{\text{T}}$  – турбулентное число Прандтля.

Источник теплоты  $Q_0$  не зависит от энтальпии  $H$  и определяется по выражению:

$$Q_0 = -Q_{\text{H}}^{\text{p}} M_{\text{T}},$$

где  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания топлива;  $M_{\text{T}}$  – масса топлива.

Термодинамическая температура, предложенная в работах [33, 34], имеет вид:

$$T^4 = (H - H_{\text{дис}})(T^3 + T^2 T_0 + T T_0^2 + T_0^3) / (c + T_0^4),$$

где  $T_0$  – термодинамическая температура, соответствующая нулю по шкале Цельсия ( $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ).

Лучистая температура характеризует объёмную плотность лучистой энергии  $U_{\text{л}}$ , проходящей со скоростью света  $c_{\text{л}}$  через расчётную точку по всем направлениям в пределах сферического телесного угла :

$$T_{\text{л}}^4 = \frac{c_{\text{л}} U_{\text{л}}}{4\sigma}.$$

Выражение для граничных условий теплоотдачи в математической модели:

$$q_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} u_*}{Pr_{\text{T}} u_+} (t - t_{\text{ст}}),$$

где  $t$  – температура в ближайшем к стенке узле сетки;  $u_+$  – безразмерная скорость в том же узле сетки;  $\rho_{\text{ст}}$ ,  $c_{\text{ст}}$  – плотность и удельная массовая теплоёмкость среды на стенке;  $t_{\text{ст}}$  – температура поверхности стенки.

В работах [37, 38] поле температур материала определялось классическим уравнением нестационарной теплопроводности для системы без внутренних источников теплоты:

$$c_q \rho_q \frac{\partial T_i^q}{\partial t} = \lambda_q \left( \frac{\partial^2 T_i^q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i^q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_i^q}{\partial z^2} \right),$$

где  $c_q$ ,  $\rho_q$ ,  $\lambda_q$  – удельная теплоёмкость, плотность, теплопроводность материала.

Кроме этого, в качестве частичных моделей можно выделить следующие:

- горения газового факела [39, 40];
- горение пылеугольного факела [6, 41];
- тепловых процессов цементной печи [42];
- теплотехнических процессов в цепных завесах [43–49];
- выноса пыли из вращающихся печей [50];
- работы колосникового холодильника [51];
- движение материала по печи [52, 53].

Существует ряд факторов, мешающих использованию традиционных математических моделей на основе численного решения дифференциальных уравнений в промышленных системах автоматического управления работой цементных вращающихся печей мокрого способа производства.

Отметим некоторые из них:

- недостаточная оснащённость печного агрегата измерительными приборами в виду невозможности их монтажа и сложности условий эксплуатации [2];
- наличие недетерминированных возмущений (износ и обрыв внутренних теплообменных устройств, неравномерное движение материала вследствие образования материальных колец или обрушения обмазки и т.д.);
- отсутствие полных знаний о сложных процессах, протекающих в печи.

Кроме этого, на сегодняшний день существующее детерминированное описание объекта, основанные на численном решении системы дифференциальных уравнений, требует или продолжительных расчётов длительностью несколько десятков минут или часов [39], или вследствие приближений и упрощений (например загромождению расчётной сетки) не обладают необходимой для автоматизированного управления точностью.

Широкое распространение в технологических расчётах получили тепловые и материальные балансы [54–58].

Тепловой баланс зоны представлен в следующем виде [59]:

$$H'_M + H'_T + q_T = H''_M + H''_T + q_{o.c.},$$

где  $H'_M, H''_M$  – энтальпия материала на входе и выходе зоны;  $H'_T, H''_T$  – энтальпия газов на входе и выходе зоны;  $q_T$  – теплота химических реакций, включая теплоту сгорания твердого или жидкого топлива или выгорающих добавок, с положительным знаком для экзотермических реакций и реакций горения и отрицательным – для эндотермических;  $q_{o.c.}$  – потери теплоты в окружающую среду через ограждающие стенки печи.

В качестве примера применения уравнений теплового баланса для моделирования тепловых процессов в обжиговых трубных печах можно рассмотреть работы [60, 61]. В данной работе модель основана на решении уравнений теплового баланса, записанных для ячеек Дирихле вдоль каждой координаты:

$$\begin{aligned} & - \left( c_p \frac{1}{i-\frac{1}{2},j,k} V_{i-\frac{1}{2},j,k} + c_p \frac{1}{i+\frac{1}{2},j,k} V_{i+\frac{1}{2},j,k} \right) \left( \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta t} \right) = \\ & = \lambda \frac{1}{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{l_i} S_{i-\frac{1}{2}} + \lambda \frac{1}{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i+1,j,k}^{n+1}}{l_{i+1}} S_{i+\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

где  $c_p$  – произведение плотности на теплоёмкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $V$  – объем половин ячейки Дирихле;  $S$  – площадь теплообмена между соседними ячейками;  $T$  – температура в ячейке Дирихле в временном слое;  $l_i = R_i - R_{i-1}$  – расстояние между центрами ячеек Дирихле по радиусу ( $R$ );  $\Delta t$  – промежуток времени между двумя соседними временными слоями;  $i, j, k$  – номер текущей ячейки.

В работе [62] уравнением теплового баланса представлялось изменение температуры газовой составляющей для  $i$ -й зоны печи:

$$c_p G_i^* T_i^g = c_p (G_i^* - G_{i+1}^*) \cdot T_{i+1}^z + P_i^G - Q_i^0 - Q_i^m,$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость газовой смеси;  $T_i^g, i = \overline{1, N}$  – температура газовой смеси в  $i$ -й зоне;  $P_i^G$  – тепловая мощность газовых горелок в данной зоне;  $Q_i^0$  – тепловые потери в окружающую среду;  $Q_i^m$  – количество теплоты, передаваемой материалу.

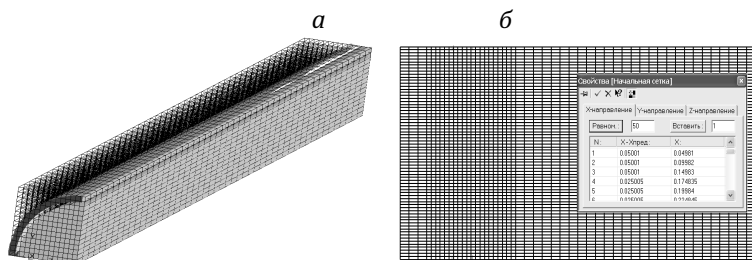
$$G_i^* = G_0 + G_i^G,$$

где  $G_0$  – расход воздуха в зоне горелок;  $G_i^z$  – расход подаваемого воздуха;  $N$  – количество зон;  $G_i^G$  – расход отбираемых дымовых газов.

Применяемые в системах управления позонные балансы обладают в основном теми же недостатками, что и математические модели обжига – они статичны и не могут учитывать недетерминированные возмущения. Балансы всего печного агрегата не дают полной картины происходящих процессов, позволяя только определить, с известной долей погрешности, общий расход теплоты в печи. Балансы отдельных зон неточны, так как нет возможности установить реальный состав материальных потоков на границе зон. В тоже время тепловые балансы обеспечивают достаточную точность для относительного сравнения работы печного агрегата при изменении отдельных факторов, характеризующих режим обжига.

### Пакеты программ компьютерного моделирования газодинамических и тепломассообменных процессов

В конце прошлого века начались разработки пакетов прикладных программ моделирования гидрогазодинамики и тепломассообмена (CAE-технологии). В них реализованы универсальные решения задач вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) и тепломассообмена. При работе с пакетом пользователь осуществляет постановку задачи: в графическом или чертёжном пакете создаёт геометрическую расчётную область (см. рис. 1.5, а); определяет расчётную сетку (рис. 1.5, б); задаёт граничные условия и параметры веществ; выбирает модели протекающих процессов. CAE-система осуществляет расчёт и представляет полученные результаты в табличном и графическом виде. Первоначально CAE-системы из-за больших вычислительных требований функционировали только на специальных мощных компьютерах (кластерах). Но развитие вычислительной техники позволило осуществлять расчёты с приемлемыми временными затратами и на современных персональных компьютерах [63–69].



**Рис. 1.5. Пример построения расчётной сетки в пакете FlowVision [70]:**

- а – равномерная трёхмерная сетка из 9029 расчётных ячеек;
- б – неравномерная двухмерная сетка из 3408 ячеек

В настоящее время для пользователей доступны ряд коммерческих САЕ-систем. Охарактеризуем наиболее распространённые из них\*.

**ANSYS CFX** – программный комплекс для решения задач аэро- и гидродинамики, акустики, теоретической механики, теплофизики, конвективного и радиационного теплообмена, основанный на методе конечных элементов. Включает широкий выбор моделей турбулентности. Эффективен при решении больших моделей с многокомпонентными течениями и сложной структурой. Является признанным лидером при расчётах турбомашин и моделирования в химической промышленности.

**ANSYS FLUENT** – программный комплекс для решения задач механики жидкостей и газов. Использует неструктурированную сеточную технологию, где типы элементов – гексаэдры, тетраэдры, призмы и пирамиды. Включает ламинарные и турбулентные модели гидродинамики, теплопередачи, фазовых переходов и радиационного теплообмена, модели для расчёта кавитации, движения сжимаемых жидкостей, теплообмена, теплопроводности реальных газов, модуль для расчёта параметров влажного пара, семь моделей для химических реакций с возможностью предсказания выхода оксидов азота NO<sub>x</sub>. Включает базу данных по различным видам топлив. Является признанным лидером при расчёте химических реакций и задач горения, многофазного моделирования.

**STAR-CD** – многоцелевой программный комплекс, предназначенный для проведения расчётов в области механики жидкости и газа, тепло- и массопереноса, процессов горения и решения других задач. В нём впервые реализована технология «скользящих сеток». Лидер моделирования в автомобильной промышленности.

**FlowVision** – система моделирование стационарных и нестационарных слабосжимаемых и несжимаемых потоков в технических приложениях. FlowVision основан на конечно-объёмном методе и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением, что позволяет моделировать сложные течения с сильной закруткой и с горением. Для получения адаптивной сетки используется технология подсеточного разрешения, в то время как в альтернативных пакетах при несовпадении границ объектов с расчётной сеткой последняя деформируется или дробится. Недостатком такого подхода является повышенная погрешность при моделировании пограничных слоёв. Система является отечественной разработкой и включает полную русскоязычную документацию.

**FLOW-3D** – пакет общего назначения для моделирования задач течения жидкости и газа. Лидер в моделировании течений со свободной поверхностью, использует метод конечных объёмов с сеткой из ортогональ-

---

\* Использованы материалы интернет-сайтов [www.parallel.ru](http://www.parallel.ru), [www.cad.ru](http://www.cad.ru), [www.intuit.ru](http://www.intuit.ru), [www.processflow.ru](http://www.processflow.ru), [www.fluent.com](http://www.fluent.com), [www.cadferm.ru](http://www.cadferm.ru), [www.flowvision.ru](http://www.flowvision.ru), [www.flow3d.com](http://www.flow3d.com), [www.cfd.ru](http://www.cfd.ru).

ных элементов. Использует метод «мультиблочных сеток», когда расчётная область формируется из нескольких подобластей, имеющих различное разрешение сетки.

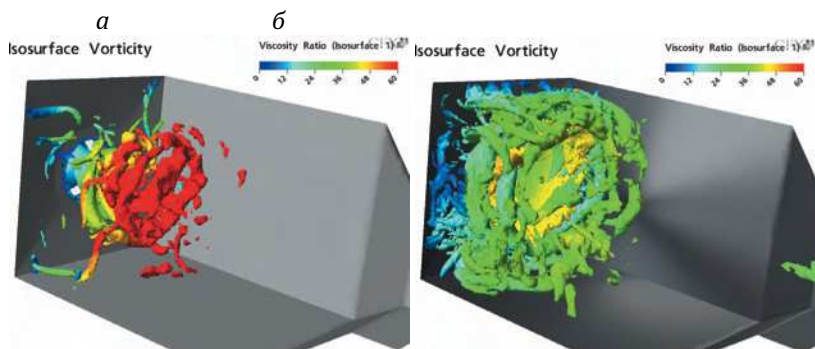
**GDT (GasDynamicsTool)** – это программный продукт, специализирующийся на задачах баллистики, горения и детонации. Позволяет устанавливать динамические сценарии, состоящие из неограниченного числа шагов с разными начальными и граничными условиями. Является отечественной разработкой.

Возможности ведущих пакетов могут быть рассмотрены на примере пакета ANSYS Fluent, который включает:

- а) математические модели физических процессов:
  - сжимаемые и несжимаемые течения;
  - стационарные и нестационарные течения;
  - ламинарные течения, в т.ч. и неньютоновских жидкостей;
- б) модели турбулентности:
  - алгебраическая модель;
  - двухпараметрические дифференциальные модели RANS:  $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$  (включающие осреднённые по времени уравнения переноса для течений с большими числами Re);
  - двухпараметрическая дифференциальная модель Ментера, объединившая достоинства моделей турбулентности  $k$ - $\varepsilon$  и  $k$ - $\omega$ ;
  - модели напряжений Рейнольдса RSM (для потоков с развитой анизотропией);
  - модель крупных вихрей или больших структур LES (Large Eddy Simulation), в которой учитываются вихри с размером, большим размеров ячейки расчётной сетки;
  - модель неприсоединенного или свободного вихря DES (Detached Eddy Simulation);
  - развиваемая в последнее время модель, учитывающая масштабы турбулентных пульсаций SAS (Scale Adaptive Simulation), сочетающая методы записи уравнений Навье-Стокса LES и RANS.
- в) модели теплопередачи:
  - сопряжённый теплообмен;
  - радиационный теплоперенос;
  - естественная конвекция;
  - многокомпонентные течения;
- г) модели горения:
  - модели PDF-типа, описывающие турбулентный поток статистическими методами;
  - модель flamelet для диффузного горения;
  - модель распада вихрей EDM (Eddy Dissipation Model, «быстрая химия»), предполагающая что скорость химических реакций намного выше скорости смешения горючего компонента и окислителя;



– модель конечной скорости химической реакции FRCM (Finite Rate Chemistry Model), где определяющим процессом является молекулярное взаимодействие между реагентами (см. рис. 1.6);

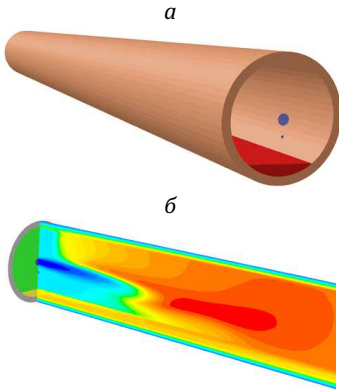


**Рис. 1.6. Моделирование процесса горения в пакете ANSYS CFX [63]:**

*а* – нереагирующая смесь; *б* – с учётом химических реакций

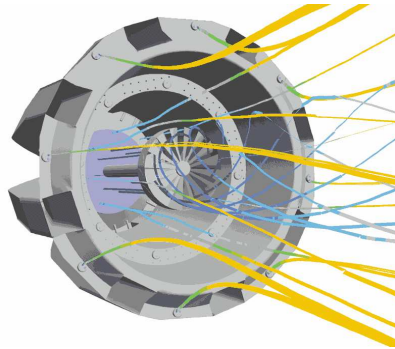
- модель образования оксидов азота  $\text{NO}_x$ ;
- модель образования сажи;
- многофазные течения;
- д) модель течения Эйлера:
  - межфазный тепломассоперенос;
  - межфазная передача импульса;
  - свободные поверхности;
- е) модель движения Лагранжа:
  - распределённое сопротивление (линейные, квадратичные зависимости);
  - объёмные и точечные источники массы, импульса, энергии, компонентов и др.
- ж) вычислительные методы:
  - конечно-объёмная дискретизация уравнений;
  - решение трёхмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса;
  - разностные схемы 1 и 2 порядка;
  - совместное решение уравнений сохранения момента количества движения и массы (Coupled Solver);
  - алгебраический многосеточный метод решения линеаризованных уравнений;
  - поддержка элементов различных типов: гексаэдры, призмы, пирамиды, тетраэдры;
  - интерфейсы сопряжения расчётных сеток – скользящие сетки, произвольное сопряжение;
  - адаптивное сгущение сеток;
  - подвижные и изменяющиеся сетки.

Результаты решения задач горения и теплообмена в промышленных топках и печах с применением рассмотренных пакетов представлены на рис. 1.7–1.9.



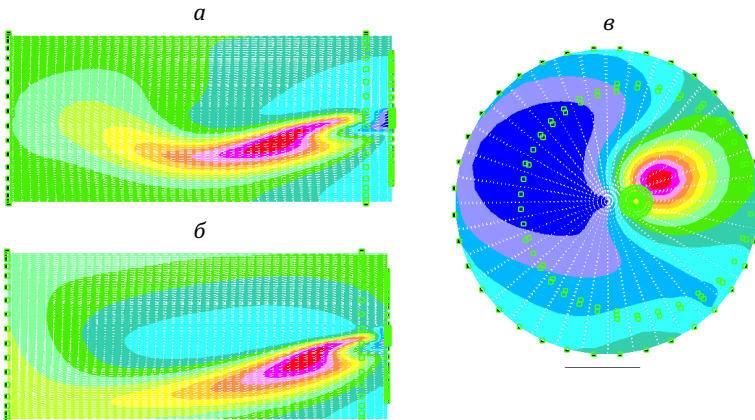
**Рис. 1.7. Моделирование горения во вращающейся печи при сжигании твёрдого топлива в пакете Fluent [67]:**

*а* – трёхмерная расчётная область;  
*б* – распределение температуры в печи



**Рис. 1.8. Моделирование газовой горелки в пакете Fluent**

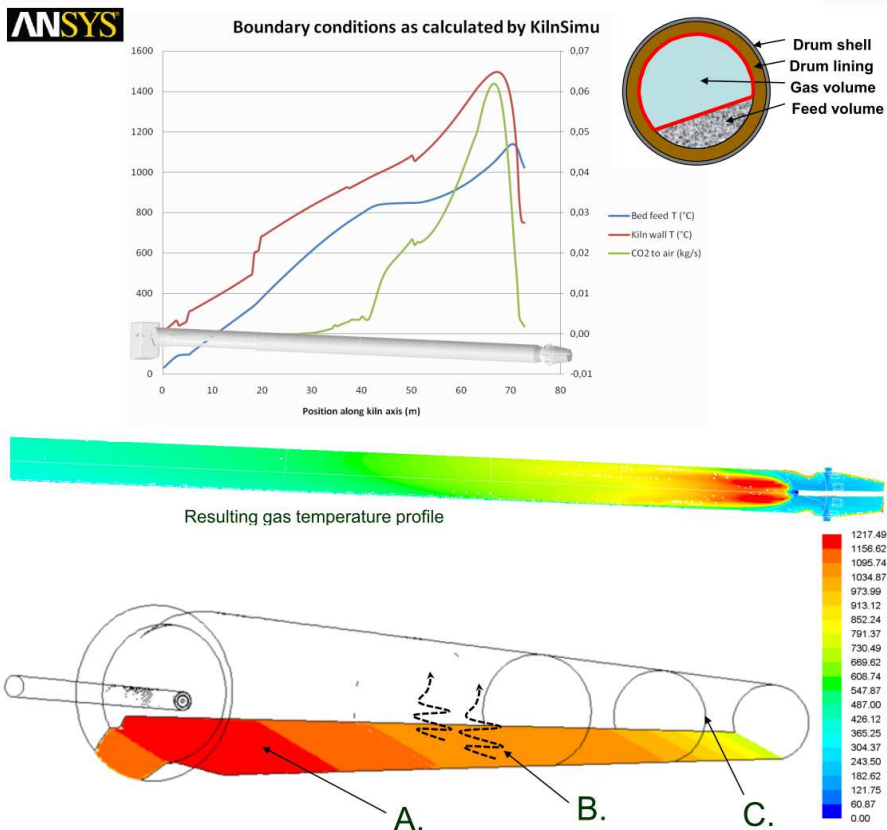
(с сайта [www.fluent.com](http://www.fluent.com))



**Рис. 1.9. Течение и распределение температур во вращающейся печи, моделирование в пакете Star-CD (с сайта [www.cadfem.ru](http://www.cadfem.ru)):**

*а* – горелка расположена с наклоном  $25^\circ$  относительно центральной оси;  
*б* – горелка расположена с наклоном  $45^\circ$  относительно центральной оси;  
*в* – центральное поперечное сечение при горизонтальном расположении горелки

В ряде работ [71–73] в пакете ANSYS Fluent произведено моделирование работы цементной вращающейся печи, включая процессы горения, теплопередачи, в том числе радиационной, и химических реакций клинкерообразования в материале. Пример результатов моделирования представлен на рис. 1.10.



**Рис. 1.10. Математическое моделирование цементной вращающейся печи в системе ANSYS Fluent [72]**

Сравнение рассмотренных пакетов затруднено, так как::

- 1) освоение пакетов требует большой квалификации и точность получаемых решений зависит не столько от системы, сколько от опыта их пользования;
- 2) результаты решения во многом зависят от выбора предлагаемых в пакетах физических моделей и моделей турбулентности, а также построения расчётной сетки;

3) все пакеты характеризуются высокой стоимостью и поэтому пользователь выбирает один из них и не имеет возможности сравнить решение одной и той же задачи в разных системах.

В работе [74] было произведено сравнение пакетов CFX, Fluent и Star-CD при двухмерном моделировании движения среды в диффузоре. Показано, что каждый из этих пакетов позволяет получить достоверные результаты. Но для успеха моделирования необходим выбор правильных физических и численных моделей. Например, отмечается, что при выборе  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности результаты моделирования были недостоверные, кроме того, в разных пакетах они значительно отличались.

Таким образом, преимущества и недостатки пакетов определяются не столько свойствами моделирующих систем, сколько квалификацией эксплуатирующих их инженеров-исследователей.

Мировым лидером по продажам является пакет Fluent, затем с отставанием в 3-5 раз находятся пакеты Star-CD и CFX. В нашей стране распространение получил также пакет FlowVision.

Недостатками пакетов численного моделирования газодинамических и тепломассообменных процессов являются:

- 1) большая погрешность при расчёте пограничных слоёв;
- 2) недостаточная точность моделей турбулентности, которые традиционно в вычислительной гидродинамике основываются на эмпирических зависимостях;

- 3) неточность расчёта радиационного теплообмена: а) в пакете ANSYS CFX отсутствуют стандартные средства для расчёта теплообмена излучением между твёрдыми телами и рассчитывается только излучение нагретого тела в окружающую среду [75]; б) в пакете FlowVision используются две модели излучения: между телами в прозрачной среде и модель излучения в объёме при постоянных свойствах среды, причем совместно эти модели использованы быть не могут [76];

- 4) необходимость большого практического опыта для грамотной эксплуатации пакетов. В работе [77] отмечается, что несмотря на обширную литературу по численным методам решения задач гидродинамики и тепломассообмена, программы часто используются в режиме «черного ящика» без глубокого понимания реализованных в них математических моделей, алгоритмов, приемов и особенностей адаптации пакетов к прикладной задаче.

**Адаптивный подход** (установление зависимостей между отдельными параметрами)

Другой подход описания печи (называемый «адаптивным») связан с исследованием взаимосвязей между отдельными параметрами. Взаимному влиянию параметров обжига посвящён большой ряд исследований [1, 3, 6, 28, 78–88].

По данным работ [2, 6, 7, 10, 26, 29] можно выделить следующие взаимосвязи, используемые для вращающихся печей:

- содержание  $O_2$  в отходящих газах → расход топлива, частота вращения или расход отходящих газов;
- содержание в отходящих газах  $O_2$ ,  $CO_2$  → соотношение расходов топлива, материала и воздуха;
- температура материала в зоне кальцинирования и спекания → расход топлива;
- разрежение в пыльной камере → частота вращения печи или расход отходящих газов (тяги в печи);
- нагрузка на привод печи и температура отходящих газов → расход топлива и частота вращения печи;
- нагрузка на привод печи, температура спекания, температура вторичного воздуха → расход топлива и расход отходящих газов (тяги в печи);
- температура отходящих газов (или влажность шлама за цепной завесой) → расход отходящих газов;
- температура газов, материала после цепей и в зоне спекания → расход отходящих газов и топлива;
- температура газов по длине печи → расход топлива, температура отходящих газов, скорость вращения печи;
- диаметр гранул, насыпная плотность и  $CaO_{св}$  клинкера → частота вращения печи;
- давление воздуха под решёткой колосникового холодильника → скорость решётки;
- разрежение в головке печи → расход воздуха аспирации;
- давление топлива → расход топлива;
- скорость вращения печи → расход шлама.

Например, большинство схемы автоматизации цементных печей состоят из совокупности отдельных систем стабилизации, называемых контурами, связывающих обычно два, реже три-четыре параметра [7]. Обычно выделяются следующие контуры [26]:

- определение общего расхода топлива по тепловому балансу;
- компенсация возмущений;
- определение расхода отходящих газов (или отношения расхода топлива и воздуха), который регулируется изменением тяги в печи;
- определения расхода шлама.

Для определения взаимосвязи применялись следующие методы:

- 1) детерминированное описание процессов;
- 2) лабораторные исследования;
- 3) пассивный промышленный эксперимент;
- 4) активный промышленный эксперимент.

Эти методы обладают существенными недостатками. Недостатки первого уже рассмотрены, во втором на результаты значительно сказывается идеализированность лабораторного эксперимента. В третьем и четвёртом методах – погрешность вызывается влиянием не учитываемых факторов и не универсальностью получаемых зависимостей. Кроме того, так как на работающем объекте обычно поддерживается стабильный режим, в пассивном эксперименте погрешность параметра часто сопоставима с величиной его изменения, и зависимость теряется в случайном шуме [89].

Многие авторы исследовали влияние отдельных регулируемых параметров на расход топлива [80, 90–97], некоторые из данных приводятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Влияние параметров на удельный расход топлива**

Параметр	Изменение параметра	Изменение удельного расхода топлива, кут/ т. кл.	Источ точ-ник
Температура отходящих газов	10°C	3,9 2,1...2,4	[96] [97]
Влажность шлама	1%	4,0...4,9 4,0...5,0	[96] [97]
Недожог (% CO)	0,1%	1,6	[80]
Температура клинкера после холодильника	10°C	0,34	[80]
Коэффициент насыщения сырьевой смеси (клинкера)	0,01	1	[96]

Определению качественных и количественных зависимостей между параметрами процесса обжига посвящён ряд работ. Чаще всего для получения статических характеристик использовался экспериментально-статический метод при пассивном наблюдении [89, 98–100].

В работе [101] сделан вывод, что гранулометрический состав клинкера характеризует качество обжига, и предложен способ косвенного определения среднего гранулометрического состава клинкера по параметрам работы печи. В работе [26] говорится, что влажность материала за цепной завесой характеризуется температурой отходящих газов печи, стабилизация которой в конечном счете приводит к стабилизации зоны подсушки. В работах [6, 87] показана зависимость между состоянием зон декарбонизации и спекания и химическим составом отходящих газов. Приведены методы ведения обжига по результатам химического анализа отходящих газов и опытным путём установлен наилучший характер распределения температуры корпуса печи в зоне спекания. В.К. Классеном и П. А. Бесединым [6, 79, 102] была выявлена зависимость

скорости движения материала от температурного режима в зонах печи. Установлено, что материал в печи перемещается с различной скоростью в зависимости от режима обжига и физико-химических свойств шлама. Также сделан вывод, что равномерный ход процесса характеризуется постоянной степенью подготовки материала по длине печи. В работах А. В. Лошинской и В. К. Хохлова отмечается, что время транспортирования материала по печи соизмеримо с частотой возмущений, благодаря чему нередки случаи, когда требования к управлению зонами подготовки материала и спекания противоречивы [3]. Например, состояние материала в зоне спекания таково, что необходимо уменьшить количество топлива, подаваемого в печь, а в зоне сушки находится материал, для которого нужно увеличить количество подаваемой теплоты.

Коэффициенты корреляции, характеризующие взаимосвязь между параметрами, представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

### Коэффициенты корреляции параметров

Зависимости	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Источник
$G_t, t_{ог}$	-	0,77	[26]
$O_2, G_t$	$O_2 = 31,35 - 0,003 \cdot G_t$	0,22	[99]
	-	0,62	[26]
$G_t, t_{э.п.}$	-	0,81	[26]
$G_t, t_{эд}$	-	0,57	[26]
	$t_{эд} = 0,076 \cdot G_t - 239$	0,43	[99]
$t_{э.п.}, t_{эд}$	-	0,67	[26]
$t_{ог}, t_{э.п.}$	-	0,40	[26]
$W_M, G_{шл}$	$W_M = 0,31 \cdot G_{шл} - 17,1$	0,28	[99]
$W_M, P_{пк}$	$W_M = -0,12 \cdot P_{пк} + 17,74$	0,56	[99]
$W_M, W_{шл}$	$W_M = 0,45 \cdot W_{шл} - 9,04$	0,23	[99]
$ППП_{эд}, t_{эд}$	$ППП_{эд} = -0,0092 t_{эд} + 36,75$	0,46	[99]
$t_{в}, t_{кл}$	$t_{в} = 0,22 t_{кл} + 166$	0,12	[99]
$\tau_{эд}, t_{эд}$	-	0,74	[6]
$t_{ог}, \tau$	-	0,64	[6]
$P_{гп}, V_{асп}$	$P_{гп} = 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{асп} + 0,48$	0,20	[99]

Примечание:  $G_t$  – расход топлива;  $t_{ог}$  – температура отходящих газов;  $O_2$  – содержанием кислорода в отходящих газах;  $t_{эп}$  – температура материала после теплообменника;  $t_{эд}$  – температура в зоне декарбонизации;  $W_M$  – влажность материала после цепной завесы;  $G_{шл}$  – количество шлама, поступающего в печь;  $P_{пк}$  – разрежение в пыльной камере;  $W_{шл}$  – влажность шлама;  $ППП_{эд}$  – потери при прокаливании сырья в зоне декарбонизации;  $t_{в}$  – температура воздуха поступающего в печь;  $t_{кл}$  – температура клинкера на выходе из печи;  $\tau_{эд}$  – время нахождения материала в зоне декарбонизации;  $\tau$  – временем нахождения материала в печи;  $P_{гп}$  – разрежение в головке печи;  $V_{асп}$  – количество аспирационного воздуха.

Как можно видеть из табл., коэффициенты корреляции за редким исключением ниже 0,7, то есть прямой взаимосвязи между двумя параметрами нет, или она не парная, а многофакторная.

Примеры множественной корреляции параметров можно найти в работах Г. М. Гофмана и Классена В. К. [6, 103]. НИИЦементом [103] на печи  $4.5 \times 170$  м Себряковского цементного завода проведен активный многофакторный эксперимент в промышленных условиях. Математическое описание представляло собой систему линейных уравнений регрессии. В качестве входных параметров фиксировались влажность материала после цепной завесы, температура материала на выходе из теплообменника, температура материала перед зоной кальцинирования, потери при прокаливании перед зоной кальцинирования. Набор выходных параметров состоял из расхода топлива, процента открытия регулирующего шибера дымососа.

Анализируя накопленный опыт, обозначим следующие недостатки рассмотренного подхода. Как отмечается в работе [2], для сложных высокопроизводительных агрегатов, характеризующихся взаимосвязью большого количества изменяющихся параметров, такая деструктуризация и упрощение не эффективны и не позволяет получить адекватное описание объекта в целом.

Это вызвано тем, что устанавливается взаимосвязь между параметрами, соответствующим разным процессам, или характеризующим сразу комплекс отдельных процессов. Например, температура отходящих газов, всегда используемая в анализе режима работы печи, показывает количество теплоты, поступающей в холодную часть печи, степень подготовки материала, режим работы цепной завесы, а также кратковременные возмущения в холодной части печи, например, перебой подачи шлама, увеличения вязкости шлама. Также анализ режимов работы печей затрудняет отсутствие способов оценки отдельных технологических зон [2].

Другой недостаток рассматриваемых зависимостей в том, что в большинстве случаев в их качестве используются статистические зависимости между отдельными параметрами, полученные на конкретных печах [89, 98]. Поэтому они жёстко привязаны к конкретным условиям, виду навески цепной завесы, используемому сырью и т. д. Они не могут быть без изменений перенесены на другие печи, даже находящиеся на этом же заводе и питаемые одним и тем же сырьевым шламом, или применены при изменении условий обжига. Такие зависимости не учитывают все факторы, влияющие на процесс обжига, они устанавливались максимально между семью параметрами, но обычно не более чем между двумя - тремя.

Среди систем необходимо выделить самоадаптирующиеся, то есть постоянно накапливающие данные о работе печи и на основании их ста-



статистического анализа корректирующие уравнения взаимосвязи между параметрами. Но при применении такого подхода для цементных печей, в связи с их сложностью и большим количеством взаимовлияющих параметров, имеющиеся зависимости теряются в «шуме» объекта, что хорошо показано в результатах исследования [26].

### **Определение рационального режима процесса обжига**

В настоящее время имеется много литературы, посвящённой определению и установке оптимальных параметров обжига [1, 3, 6, 31, 55, 56, 81, 82, 84, 86, 88, 91, 96, 97, 104–115]. В то же время в работе [116] отмечается, что единого технологического критерия оптимизации процесса обжига не существует, поэтому невозможно строить системы управления, основываясь на каком-то одном параметре.

Группой исследователей под руководством Г. М. Гофмана для системы по управлению процессом обжига во вращающейся печи [105, 117] создан альбом определения наиболее рационального управления, основанного на компьютерных расчётах. С помощью таблиц альбома по производительности печи, химическому составу и тонкости помола шлама определялись наилучший расход топлива и аэродинамический режим (содержание кислорода в отходящих газах). В Гипроцементе была сделана попытка количественно оценить зависимость между изменением коэффициентом насыщения, кремнезёмным и глинозёмным модулями клинкера и расходом теплоты на обжиг [118]. Опыты проводились на Себряковском цементном заводе в рамках разработки автоматизированной системы управления печью. Исследователями из НИИЦемент [81, 110] был разработан графоаналитический метод подбора рациональных параметров, обеспечивающих стабильное и экономичное ведение процесса обжига. В основе метода используется экспериментальная зависимость между гранулометрическим составом клинкера и температурой газового потока в зоне спекания. По силе воздействия на температуру газов в зоне спекания регулирующие параметры были расположены следующим образом: коэффициент избытка воздуха (обратная зависимость), количество вторичного воздуха (прямая зависимость), температура вторичного воздуха (прямая зависимость), производительность печи (обратная зависимость), расход топлива (прямая зависимость). Величина изменения того или иного фактора определялась методом подбора по номограмме.

На основе приведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Интенсификация и управление режимом работы печи возможны только на основе комплексного анализа технологического состояния печи. Параметры, описывающие работу печного агрегата, должны рассматриваться в комплексе, так как в связи со сложностью объекта де-

терминированное описание работы печи на основании взаимного влияния отдельных параметров не эффективно.

2. Имеющийся опыт позволяет описать основные зависимости между параметрами, характеризующими режим обжига и необходимыми управляющими воздействиями. Необходимо формализовать эти зависимости и выбрать критерий оценивающий оптимальность режима обжига клинкера.

## **1.5. АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ**

### **Основные положения теории нечётких множеств**

Создание математических моделей для сложных промышленных объектов встречает большие трудности и на сегодняшний момент не всегда является наиболее эффективным методом автоматизации. В настоящее время имеется около 400 компьютерных систем, производящих управление сложными технологическими объектами на основе теории нечётких множеств. Эта теория разработана Л. Заде в 60-е годы нашего века [119]. В таких системах строится не модель объекта, а модель управления объектом [120]. В целом нечёткая модель адекватна адаптивному подходу в управлении [10]. Теория нечётких множеств имеет обширный математический аппарат, который позволяет использовать нечёткие определения и понятия.

Основным понятием в теории является понятие нечёткого множества.

*Нечёткое множество* – это множество, элементы которого принадлежат ему с определённой степенью вероятности. Описание нечёткого множества заключается в определении степени принадлежности для элементов множества некоторым числом, как правило из интервала [0..1]. В этом случае крайние значения 0 и 1 соответствуют понятиям «принадлежит» и «не принадлежит». Нечёткое множество математически представляется как

$$A = \{x, \mu_A(x)\},$$

т. е. это совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов  $x$  универсального множества  $U$  и соответствующих степеней принадлежности  $\mu_A(x)$  [119, 121, 122]. Универсальным множеством  $U$  нечёткого множества  $A$  называется область определения функции принадлежности  $\mu_A(x)$ .

*Функция принадлежности* является математическим правилом, ставящим в соответствие элементу нечёткого множества его степень принадлежности.

Методы построения функций принадлежности делятся на две основные группы – прямые и косвенные. Прямые методы в основном используются для описания понятий, имеющих измеряемые свойства (например расход, температура). Эти методы основаны на непосредственном задании степени принадлежности с помощью формулы, таблицы или набора значений. Косвенные методы определяют функции принадлежности, значения которых находятся для заранее сформулированных условий. Экспертная информация в этих методах используется лишь в качестве исходной для дальнейшей обработки. Дополнительные условия могут налагаться как на вид получаемой информации, так и на процедуру обработки. Косвенные методы применяются для таких сложных понятий, не имеющих способов измерения, как «качество», «рациональность», «необходимость» и т. д. Прямые и косвенные методы могут применяться как на основе мнения одного эксперта, так и группы экспертов. Таким образом имеется четыре основных типа методов построения функций принадлежности.

При создании советующей системы наиболее рационально применять прямой метод построения функции принадлежности для одного эксперта, так как система должна основываться на научных представлениях о работе объекта.

В настоящее время часто применяется один из таких методов – метод стандартного набора графиков [123]. Метод состоит в том, что в советующей системе уже имеется некоторое количество стандартных функций принадлежности. Пользователь лишь выбирает одну из имеющихся функций. Недостаток этого подхода в том, что применение стандартных функций часто не соответствует интуитивному представлению опрашиваемого эксперта об оценке значений технологических параметров. Так же пользователь, выбирающий функцию принадлежности, обычно не знаком с теорией нечётких множеств, и поэтому не может сделать объективный выбор. В то же время точность нечёткого вывода зависит от адекватности функции принадлежности, поэтому рационально получение функции индивидуально для конкретной задачи.

Функции принадлежности упорядоченного базового терм - множества  $T = \{T_i\}$ ,  $i \in L = \{1, 2, \dots, m\}$  должны удовлетворять следующим условиям [124]:

а) функции крайних лингвистических значений должны иметь форму половинного вида:

$$\mu_{T_1}(u_{min}) = 1, \mu_{T_m}(u_{max}) = 1;$$

б) существует хотя бы один типовой представитель каждого понятия:

$$\forall i \in L \exists u \in U \mid \mu_{T_i}(u) = 1;$$

в) не могут существовать такие участки из области определения, которым не соответствует никакие понятия, а так же не могут быть в наличии не разграниченные понятия:

$$\forall i, i + 1 \leq m, 0 < \max_{u \in U} \mu_{T_i \cap T_{i+1}}(u), < 1.$$

*Расстояние между нечёткими множествами*

Если A и B являются конечными нечёткими множествами, заданными на универсальном множестве X, то можно представить следующие виды расстояний между ними [125]:

а) расстояние Хемминга (линейное расстояние):

$$\rho(A, B) = \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|, 0 \leq \rho(A, B) \leq n;$$

б) относительное расстояние Хемминга:

$$\rho_{rel}(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|, 0 \leq \rho_{rel}(A, B) \leq 1;$$

в) евклидово (квадратичное) расстояние:

$$e_{rel}(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i))^2}, 0 \leq e(A, B) \leq \sqrt{n};$$

г) относительное Евклидово расстояние:

$$e_{rel}(A, B) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i))^2}, 0 \leq e_{rel}(A, B) \leq 1.$$

Выбор вида расстояния зависит от конкретной проблемы и обладает достоинствами и недостатками которые очевидными при практическом решении той или иной технической задачи [126].

Как правило, нечёткие модели показывают наилучшие результаты, когда входные функции принадлежности пересекаются на уровне 0,5 [127].

*Построение нечёткой модели* состоит из следующих основных этапов:

1. Создание базы данных, которая включает в себя следующие элементы:

- создание наборов входных и выходных параметров;

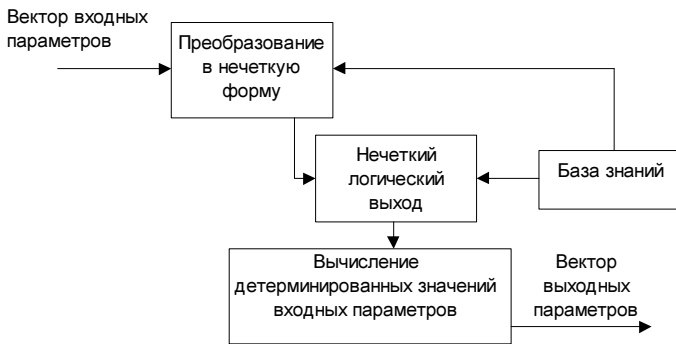
- представление параметров в виде лингвистических переменных [119], имеющих название, множество термов, множество значений и т. д.;

- выбор стандартных или получение новых функций принадлежности для терм - множеств параметров;

- построение множества правил, составленного экспертом или группой экспертов.

2. Разработка алгоритма нечёткого вывода (используются имеющиеся или разрабатывается новый с учётом специфики решаемой задачи).

Последовательность этапов нечёткого логического вывода приведена на рис. 1.11 [124].



**Рис. 1.11. Последовательность этапов нечёткого логического вывода**

База знаний представляет собой базу нечётких продукций (нечётких продукционных правил).

*Нечёткое продукционное правило* можно представить в виде следующего выражения [126, 128]:

$$(i): Q; P; A \Rightarrow B; S, F, N,$$

где  $(i)$  – имя нечёткой продукции;  $Q$  – сфера применения нечёткой продукции;  $P$  – условие применимости ядра нечёткой продукции;  $A \Rightarrow B$  – ядро нечёткой продукции, в котором  $A$  – условие ядра (или антецедент);  $B$  – заключение ядра (или консеквент);  $\Rightarrow$  – знак логической секвенции или следования;  $S$  – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра;  $F$  – коэффициент определённости или уверенности нечёткой продукции;  $N$  – постусловия продукции.

Согласованное множество нечётких продукционных правил образует нечёткую продукционную систему, у которой имеются требования к полноте и непротиворечивости [129, 130].

*Полнота нечёткой продукционной системы*

Полноту нечёткой продукционной системы можно оценить как:

$$X = \bigcup_{i=1}^n \text{Supp}A_i,$$

где  $\text{Supp}A_i$  - носитель нечёткого множества  $A_i$ .

Выражение показывает, что для каждого текущего состояния  $x$  процесса существует хотя бы одно управляющее правило, посылка которого имеет ненулевую степень принадлежности для  $x$ .

*Непротиворечивость нечёткой продукционной системы*

Непротиворечивость совокупности правил обычно определяется как отсутствие продукционных правил, имеющие сходные условия (антецеденты) и различные или взаимоисключающие заключения (консеквенты) [129].

Степень непротиворечивости  $i$ -го и  $k$ -го правила оценивается выражением:

$$C_{jk} = \left| \bigcup_X (\mu_{A^i}(x) \wedge \mu_{A^k}(x)) - \bigcup_Y (\mu_{B^i}(y) \wedge \mu_{B^k}(y)) \right|.$$

Суммируя по  $k$ , получаем оценку непротиворечивости  $i$ -го правила в системе:

$$C_i = \sum_{k=1}^N C_{ik}, \quad 1 < i < N, \quad k \neq i.$$

Если эта оценка превосходит некоторое пороговое значение, то правило из системы удаляется.

Необходимое количество нечётких продукций в системе обычно значительно меньше их полного перебора и может быть определено выражением [131]:

$$N = l_1 \cdot l_2 \cdot \dots \cdot l_n,$$

где  $n$  - количество входных переменных;  $l_i$  - мощность терм-множества для оценки  $i$ -ой входной переменной.

Этапы нечёткого вывода [125, 126, 128, 132-134] следующие:

- фаззификация;
- агрегирование;
- активизация;

- аккумуляция;
- дефаззификация.

Фаззификация (введение нечёткости) – это установка соответствия между численным значением входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной.

Агрегирование – определение степени истинности условий по каждому из правил нечёткой продукционной системы. Результатом агрегирования будут найденные значения  $c_i$  для каждого из правил  $R_i$  входящего в рассматриваемую базу правил нечёткого вывода.

$$c_i = \min\{b_j\} \quad i = 1..n,$$

где  $i$  – номер подусловий с  $j$ -ой входной переменной  $b$ ;  $n$  – количество правил.

Множество значений истинности можно представить как

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}.$$

Активизация осуществляется с помощью одного из методов нечёткой композиции [27, 30, 104, 120, 121, 135–140]. Наиболее распространены на практике следующие методы активизации [126]:

- *min*-активизация

$$\mu(y) = \min\{c_i; \mu(x)\};$$

- *prod*-активизация

$$\mu(y) = c_i \mu(x);$$

- *average*-активизация

$$\mu(y) = 0,5(c_i + \mu(x)),$$

где  $\mu(x)$  – функция принадлежности терма лингвистической переменной;  $c$  – степень истинности нечёткого высказывания;  $\mu(y)$  – функция принадлежности терма некоторой выходной переменной, заданной на универсуме  $Y$ .

Целью аккумуляции является получение итоговой функции принадлежности для выходной лингвистической переменной. Аккумуляция вычисляется как объединение функций принадлежности всех подзаключений. Имеются следующие виды аккумуляции:

- 1) *max*-объединение

$$\forall y \in Y \quad \mu_{B1 \cup B2}(y) = \max\{\mu_{B1}(y); \mu_{B2}(y)\};$$

- 2) алгебраическое объединение

$$\forall y \in Y \quad \mu_{B1+B2}(y) = \mu_{B1}(y) + \mu_{B2}(y) - \mu_{B1}(y)\mu_{B2}(y);$$

3) граничное объединение

$$\forall y \in Y \mu_{B1 \otimes B2}(y) = \min\{\mu_{B1}(y) \cdot \mu_{B2}(y); 1\};$$

4) драстическое объединение

$$\forall y \in Y \mu_{B1 \vee B2}(y) = \begin{cases} \mu_{B1}(y), & \text{если } \mu_{B2}(y) = 0 \\ \mu_{B2}(y), & \text{если } \mu_{B1}(y) = 0 \\ 1, & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

5)  $\lambda$  - сумма

$$\forall y \in Y \mu_{(B1+B2)\lambda}(y) = \lambda \mu_{B1}(y) + (1-\lambda) \cdot \mu_{B2}(y), \lambda \in [0; 1].$$

Переход от функции принадлежности к её численному значению осуществляется с помощью одного из методов дефаззификации.

Рассмотрим наиболее часто применяемые на практике методы дефаззификации [126, 128, 141].

1. Метод максимума (*Max-Height*)

$$y = \max \mu_B(x),$$

где  $y$  – результат дефаззификации;  $\mu_A(x)$  - функции принадлежности нечёткого множества  $A$ .

2. Метод среднего максимального значения (*Mean-of-Maximum*)

$$y = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S x_s,$$

где  $x_s$  – максимум, достигаемый на некотором множестве точек ( $s = 1, 2, \dots, S$ ), соответствует одному из максимальных значений функции принадлежности  $\mu_A(x)$ .

3. Метод левого модального значения (*LM, Left Most Maximim*)

$$y = \min\{x_m\},$$

где  $x_m$  - модальное значение (мода) нечёткого множества для выходной переменных ( $x_m = \arg \max \{\mu_B(x)\}$ ).

4. Метод правого модального значения (*RM, Right Most Maximim*)

$$y = \max\{x_m\}.$$

5. Метод центра площади (*Centre of Area*). Значение  $y$  определяется из уравнения:



$$\int_{x_{min}}^y \mu(x) dx = \int_y^{x_{max}} \mu(x) dx,$$

где  $[x_{min}; x_{max}]$  – носитель нечёткого множества выходной лингвистической переменной.

#### 6. Метод центра тяжести (*Centre of Gravity*)

$$y = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \mu(x) dx}.$$

На сегодняшний день распространены следующие алгоритмы нечёткого вывода [126, 128, 141]: Мамдани, Цукамото, Ларсена, Сугено и упрощенный алгоритм нечёткого вывода. Алгоритмы различаются этапами нечёткого вывода и способом построения системы нечётких продукционных правил.

#### **Управление и контроль на основе нечёткой логики**

Управление промышленными объектами на основе нечёткой логики в настоящее время применяется во многих отраслях промышленности. Так, существуют системы для процесса варки стекла [142], по управлению доменной печью [143], нефтеперегонных установок [137], прогнозирования показателя текучести расплава полиэтилена [144], управления печью пиролиза ацетона [138, 139], управления процессами выплавки и холодного проката стали [143, 145], работой паровых котлов, насосных и водонагревательных установок [143, 146, 147], нечёткие модели интеллектуального управления приводами [140, 143], мельницами помола клинкера [148].

В настоящее время за рубежом для контроля и управления цементными печами преимущественно применяются компьютерные системы с использованием нечёткой логики. Такие крупные известные во всем мире фирмы как *F. L. Smidth*, *Polysius*, *KHD*, *Siemens* разрабатывают и применяют системы с нечёткой логикой, начиная с 1979 года [10, 25, 149–152]. Проведенный специалистами фирмы «*F. L. Smidth*» (Дания) анализ эксплуатации компьютерных систем с нечёткой логикой [25], установленных для 13 печей в различных странах мира, в том числе трёх мокрого способа производства, показал:

1. Применение автоматизированных систем на основе нечёткой логике возможно практически и экономически выгодно. В зависимости от

типа печи внедрение таких систем привело к экономии топлива от 2 до 4%, увеличению срока компании печного агрегата от 30 до 50% и даже улучшило марку выпускаемого цемента.

2. Для внедрения на новой печи системы с нечёткой логикой требовалось некоторое время (около 4...6 месяцев) чтобы накопить достаточный опыт, прежде чем выработать стратегию контроля и управления.

Были выделены следующие преимущества разработанной фирмой *F. L. Smidth* системы:

1. Стратегия контроля и управления основана на практическом опыте и учитывает все особенности конкретной печи. Система получена по фактическим данным работы печи, а не из математической модели.

2. В качестве оператора печи система контролирует и управляет процессом обжига 24 часа в сутки. Не происходит замены «личности оператора» между рабочими сменами. Это вносит дополнительную стабильность в работу печи.

3. Управляющие воздействия более плавные, и в тоже время происходят раньше, чем производимые человеком-оператором. Это также делает работу печи стабильнее.

Несмотря на большой опыт внедрения и использования систем с нечёткой логикой иностранными фирмами, для печей мокрого способа производства эти системы практически не разрабатывались. Исключением являются три печи мокрого способа производства в Дании фирмы «*F. L. Smidth*» [25, 149]. Системы были установлены с 1979 по 1983 г. на печах производительностью 1200, 1150 и 1500 т/сут, оборудованных планетарными холодильниками. В системе использовались следующие параметры:

- температура в зоне спекания;
- частота вращения печи, которая синхронизировалась с подачей шлама в печь;
- мощность, потребляемая приводом печи;
- расход топлива;
- разрежение в головке печи;
- температура отходящих газов на холодном обрезе печи;
- содержание  $O_2$  в отходящих газах печи;
- объем или давление первичного воздуха;
- содержание свободной извести в клинкере.

Нечёткая модель в системе основывалась на 50...80 правилах. Применяемый алгоритм являлся реляционной моделью лингвистических правил и использовал вывод на основе меры возможности равенства двух нечётких множеств. Недостатки такого подхода были приведены выше.

В отечественной литературе имеется описание нескольких разработок информационных систем на основе нечёткой логики для цементных вращающихся печей [30, 36, 153–157].

Все известные системы обладают рядом существенных недостатков:

- не учитывается скорость изменения регулируемых параметров (фактор, имеющий очень большое значение при управлении вращающейся печью);

- не осуществляется необходимая связь нечёткой модели с существующими детерминированными ограничениями и дополнениями (например, контроль необходимого количества воздуха для горения топлива);

- жёстко фиксировались наборы регулируемых и регулирующих параметров, что приводит к неработоспособности системы при выходе хотя бы одного регистрирующего прибора строя.

- не осуществлялся плавный переход из одного режима обжига в другой при выпуске разных видов клинкера или разного вида сырья.

Отметим, что система, описанная в работе [157], является по существу «пустой» советующей системой. Эти системы представляют собой универсальные «заготовки» советующих или экспертных систем с незаполненной базой данных, которые заполняются в режиме диалога с пользователем. Процедуры организации «пустых» систем реализуются на этапе проектирования [158]. Такие универсальные системы мало пригодны для использования в задачах управления цементными печами, так как не учитывают специфики объекта и технологии производства клинкера. Как отмечается в работе [159], в каждом конкретном случае «пустые» системы будут адаптированы к проблемной области хуже, чем предметно-адаптированные системы.

### **Нейронечёткие модели**

В последнее время большую популярность получили системы управления промышленными объектами на основе нейронечётких моделей [131, 160–165].

Нейронечёткие модели формально по структуре идентичны многослойной нейронной сети. Слои в такой модели соответствуют этапам функционирования нечёткой системы. В нейронечётких системах объединены свойства искусственных нейронных сетей к обучению и наглядность нечёткой логики.

Достоинством этих систем является:

- сочетание способности к обучению и возможности интерпретации в качестве нечёткой модели;

- возможность комбинирования числовых данных и нечётких знаний;

– дополнительная оптимизация описания, которая базируется на правилах с использованием данных.

В тоже время, у нейронечётких систем имеется ряд недостатков затрудняющие их использование для автоматического управления цементными печами:

– временные затраты на процедуру обучения и корректировки такой системы велики;

– в виду того что оптимальные значения параметров характеризующих работу печи могут изменяться в течении незначительного времени, нейронечёткая система будет постоянно не успевать в своём обучении, а значит принимать решения с заведомой погрешностью;

– у нейронечёткой системы может быть только одна выходная переменная, а правилам присваивается один и тот же единичный вес, что вызывает значительные проблемы при большом (более 5-6) количестве входных переменных [162].

Таким образом, несмотря на достоинства нейронечётких моделей, преимущество их перед классическими системами нечёткого вывода для управления цементными печами не очевидны.

### **Правила управления печью**

Одной из основных проблем при создании советующей системы на основе нечёткой логики для цементных печей является трудность получения адекватного множества правил, то есть получения стратегии управления печью. Основные причины этого в следующем:

1. Как правило, объектами экспертного опроса являются машины вращающихся печей что может быть причиной субъективных ошибок при формировании базы нечётких продукций. Такие ошибки связаны с различием подходов к способам управления работой печи. База нечётких продукционных правил составленная таким образом, может не удовлетворять условиям полноты и непротиворечивости.

2. При создании правил берутся взаимосвязи изменения какого-либо регулируемого параметра и необходимого управляющего значения. Такой подход можно найти и в инструкциях по управлению печью. Правила получают по следующей схеме. В начале определяются все причины изменения регулируемого параметра. Например, «причины колебания температуры отходящих газов могут быть: изменение питания печи; колебание влажности шлама; изменение количества и качества форсуночного топлива (калорийность, выход летучих и т. д.); изменение тяги в печи; неравномерность возврата пыли в печь» [113]. Затем, по имеющемуся набору причин формируются ситуации. Такой подход приводит к большому количеству часто по сути повторяющихся правил и не позволяет точно описать стратегию управления.

При создании базы правил необходимо учитывать существующие в настоящее время методы управления вращающимися печами мокрого

способа производства. Несмотря на большой опыт по наладке печей, методам управления посвящено мало литературы [28, 87, 113, 115, 166]. В основном литература по этому вопросу представляет собой инструкции для машинистов печей (например [167]) и по существу является правилами правильной эксплуатации печного агрегата.

Таким образом, одной из задач разработки системы управления является создание методов построения набора правил, точно определяющих стратегию управления печью.

## 1.6. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Создание информационной системы для анализа и регулирования режима обжига является актуальной задачей и требует глубоких технологических знаний, а сами системы должны основываться на научных представлениях о процессе обжига. Такая система облегчит труд машинистов печей, улучшит качество управления, стабилизирует ход технологических процессов и в итоге снизит удельный расход топлива на обжиг клинкера. Информационная система будет способствовать передаче необходимой стратегии поддержания режима обжига непосредственно машинистам вращающихся печей.

2. В печи происходят сложные, до конца не изученные химические, физические и тепло-массообменные процессы. На эти процессы дополнительно оказывают влияние различные примесные компоненты, которые могут накапливаться в печном агрегате за счёт циркуляции при пылевозврате. Возврат пыли оказывает значительное влияние на процессы минералообразования и изменение количества пылевозврата полностью меняет характер протекания реакций, и, следовательно, необходимый режим обжига.

При управлении вращающейся печью необходимо обеспечить передачу материалу по длине печи строго определённого количества теплоты, требуемой для протекания процессов клинкерообразования, с учётом состава и свойств сырья, а также циркулирующих в результате пылевозврата примесных веществ.

3. Разработанные системы автоматизации работы печей на основе традиционных методов не нашли широкого распространения на заводах из-за ряда факторов, таких как:

- недостаточной оснащённостью печного агрегата измерительными приборами (в виду сложностью контролирования ряда параметром);
- наличием недетерминированных возмущений (износ и обрыв внутренних теплообменных устройств, неравномерное движение материала вследствие образования материальных колец или обрушения обмазки и т.д.);

– отсутствием полных знаний о сложных процессах, протекающих внутри печи;

– невозможностью создать адекватную математическую модель печи на основе детерминированных зависимостей с приемлемыми для задач автоматизации точностью и временем решения;

– узкой областью применения статистических моделей.

4. Информационные системы на основе нечёткой логики для цементных вращающихся печей используются с 1979 года и позволяют обойти слабые стороны существующих традиционных систем автоматического управления на основе математического моделирования и детерминированных зависимостей.

Автоматизированные системы на основе нечётких множеств обеспечивают простоту настройки на объекте управления, позволяют учесть недетерминированные возмущения и качественные параметры, измерение которых затруднено или не может быть выполнено оперативно. В тоже время необходима дальнейшая работа для повышения эффективности использования систем с нечёткой логикой, так как они имеют ряд недостатков и не до конца учитывают особенности управления печами мокрого способа производства, характеризующиеся большим количеством взаимосвязанных входных и регулируемых технологических величин и управляющих воздействий.

## 2. СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЗАДАННОГО РЕЖИМА ОБЖИГА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

### 2.1. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ПРОЦЕССА ОБЖИГА ИЗ РЕЖИМА И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Целью анализа являлась классификация причин нарушения режима работы вращающихся печей и способов возврата печи в нормальный режим работы. Анализ проводился по результатам промышленных испытаний печей семи заводов, проводимых в период с 1995 по 2000 г., а также с использованием литературы, посвящённой наладке и эксплуатации цементных печей [1, 3, 6, 26, 28, 55, 87, 167].

Причины выхода печи из нормального режима работы, а так же характер изменения параметров обжига, представлены в табл. 2.1.

*Таблица 2.1*

#### Анализ причин выхода из режима вращающейся печи мокрого способа производства и методы стабилизации её работы

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
1.	Снижение температуры отходящих газов. Снижение температуры материала в зоне подготовки. Разрежение в пыльной камере незначительно повышается или остается постоянным.	Недостаток теплоты в холодной части печи	1. По техническим причинам некоторое время подавалось повышенное количество шлама. 2. Увеличилась влажность сырьевой шихты при постоянном питании печи шламом. 3. Снизилась растекаемость шлама, материал менее подвижен. 4. Периодическое увеличение количества материала в цепной зоне в результате неверной навески цепной завесы (материал накапливается на цепях, а затем пересушивается и сбрасывается).	1. Проверить работу питателя. Увеличить количество материала пропорционально увеличению влажности (если печь работает с постоянной производительностью). 2. Увеличить открытие шибера дымососа (увеличить количество теплоты, поступающей в холодный конец печи). 3. При длительном возмущении увеличить расход топлива.

Продолжение табл. 2.1

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
2.	<p>Снижение температуры отходящих газов.</p> <p>Снижение температуры материала в зоне подготовки.</p> <p>Падение нагрузки на главный привод (увеличение скорости вращения печи).</p> <p>Уменьшение уровня подъёма материала, видимого в головке печи.</p> <p>Уменьшение размера гранул на выходе из печи.</p> <p>Увеличение давления под решёткой колосникового холодильника и температуры вторичного воздуха.</p> <p>Увеличение содержания CO<sub>2</sub> в отходящих газах.</p> <p>Зона с недожжённым клинкером приближается к горячему обреза печи.</p>	<p>Недостаток теплоты в целом по печи</p>	<p>1. Недостаточное количество подаваемого топлива.</p> <p>2. Увеличение количества подаваемого материала.</p> <p>3. Недостаточная подготовка материала в подготовительных зонах печи, что привело к увеличению слоя в зоне спекания.</p> <p>4. Изменение характеристик шлама.</p>	<p>1. Увеличить расход топлива.</p> <p>2. Интенсифицировать процесс горения (поднять горелку от материала, возможно даже направить её на футеровку в верхней части печи, использовать завихритель или дроссель горелки).</p> <p>3. Увеличить скорость движения колосниковых решёток холодильника для стабилизации температуры вторичного воздуха.</p> <p>4. При недостатке O<sub>2</sub> на горение открыть шибер дымососа.</p> <p>Примечание. Если регулируемые параметры отклонились от нормы на значительную величину, необходимо перевести печь в режим "тихого хода", то есть уменьшить частоту вращения и питание печи в 2 раза, снизить расход топлива ~20% и уменьшить разрежение в пыльной камере приблизительно в 3 раза</p>



Продолжение табл. 2.1

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
3.	<p>Падение нагрузки на главный привод (увеличение скорости вращения печи). Уменьшение размера гранул клинкера. Увеличение давления под решёткой колосникового холодильника и температуры вторичного воздуха. Уменьшение уровня подъёма материала. Снижение температуры материала в зоне кальцинирования. Увеличение содержание CO<sub>2</sub> в отходящих газах. Появление на выходе из печи кусков обмазки, обрушившихся вследствие перепада температур. Снижение видимости в головке печи. Резкие смены разрежения в головке печи.</p>	<p>Недостаток теплоты в горячей части печи</p>	<p>1. Изменение химических свойств шлама. Снижение влажности материала при постоянном питании печи. 2. Увеличение слоя материала на входе в зону спекания. 3. Увеличение содержания в материале частиц менее 1 мм (возможно перед этим было увеличение температуры отходящих газов). 4. Неполное сгорание (недожог) топлива. 5. Внутреннее нестационарное возмущение по неизвестным или неустановленным причинам.</p>	<p>1. Увеличить расход топлива. 2. Интенсифицировать процесс горения (поднять горелку от материала, использовать завихритель или дроссель горелки). 3. Увеличить скорость движения колосниковых решёток холодильника для стабилизации температуры вторичного воздуха. Примечание. Если регулируемые параметры отклонились от нормы на значительную величину, необходимо перевести печь в режим "тихого хода". В печи не хватает теплоты (печь "села"), в зону спекания поступает плохо подготовленный материал.</p>

Продолжение табл. 2.1

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
4.	<p>Падение нагрузки на главный привод (увеличение скорости вращения печи). Уменьшение размера гранул клинкера. Уменьшение уровня подъёма материала. Снижение температуры материала в зоне кальцинирования. Кратковременное увеличение температуры отходящих газов. Появление на выходе из печи кусков обмазки, образовавшихся в следствии перепада температур.</p>	<p>Недостаток теплоты в горячей части печи, одновременно избыток теплоты в холодной части</p>	<p>1. Неверная работа тягодутьевых устройств (в холодную часть печи поступает лишнее тепло) 2. Волнообразное движение материала (то есть имеет место большой слой материала в зоне спекания и малый в холодной части печи). 3. Большие колебания подачи топлива в печь (<math>\pm 10\%</math>). 4. Снижение влажности шлама при постоянном питании. 5. Увеличение количества частиц менее 1 м (пыль с большой скоростью проходит подготовительные зоны и не успевает прогреться). 6. Неполное сгорание топлива.</p>	<p>1. Увеличить расход топлива. 2. Если позволяет состав отходящих газов, прикрыть шибер дымососа. 3. Интенсифицировать процесс горения (поднять горелку от материала, возможно даже направить её на футеровку в верхней части печи, ввести завихритель или ввести дроссель горелки). 4. Стабилизировать температуру вторичного воздуха увеличением скорости движения решётки колосникового холодильника. Примечание. Если регулируемые параметры отклонились от нормы на значительную величину, необходимо перевести печь в режим "тихого хода". В печи не хватает теплоты (печь "села" по всей длине), в зону спекания поступает плохо подготовленный материал.</p>

Продолжение табл. 2.1

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
5.	<p>Снижение температуры отходящих газов.</p> <p>Возрастание нагрузки на главный привод (уменьшение скорости вращения печи).</p> <p>Уменьшение содержания CO<sub>2</sub> в отходящих газах.</p> <p>Некоторое увеличение разряжения в пыльной камере.</p> <p>Клинкерное пыление (если печь сильно перегрета), или увеличение размера гранул клинкера до 5 -20 см.</p> <p>Увеличение уровня подъёма материала.</p> <p>Повышение температуры материала в зоне кальцинирования.</p>	<p>Избыток теплоты в горячей части печи, недостаточное количество теплоты в холодной части</p>	<p>1. Неверный режим горения топлива (факел короткий, напряжённый, светлый, зона спекания короткая, то есть теплота в основном передаётся материалу в горячем конце печи).</p> <p>2. Материал задерживается в цепной зоне (возможно, образует кольцо).</p> <p>3. Неверный тяготуевой режим печи (шибер сильно прикрыт).</p> <p>4. Увеличение влажности шлама при постоянном объёме питания печи (в этом случае снижается количество материала в высокотемпературных зонах).</p> <p>5. Большой слой материала в холодной части печи и малый в горячей (слоение материала).</p>	<p>1. Открыть шибер, увеличивая разрежение в печи.</p> <p>2. Растянуть факел (прижать к материалу).</p> <p>3. Вывести дроссель или убрать завихритель.</p> <p>4. Снизить расход топлива.</p> <p>5. При снижении давления под решёткой колосникового холодильника понизить скорость движения решётки.</p> <p>Примечание. При сильном перегреве материала в зоне спекания временно на 1-3 минуты снизить расход топлива на 70-80%.</p>
6.	<p>Увеличение температуры отходящих газов.</p> <p>Увеличение температуры материала в зоне подогрева.</p> <p>Увеличение количества пыльной фракции за цепной завесой.</p> <p>Снижение влажности материала после цепей</p>	<p>Избыток теплоты в холодной части печи</p>	<p>1. Снижение влажности материала при постоянном питании печи.</p> <p>2. Некоторое время подавалось пониженное количество шлама.</p> <p>3. Увеличение растекаемости шлама, материал более подвижен.</p> <p>4. Периодическое сбрасывание материала в зоне цепей в</p>	<p>1. Проверить работу питателя. Уменьшить количество материала пропорционально уменьшению влажности шлама.</p> <p>2. Уменьшить открытие шибера дымососа (снизить количество теплоты, поступающей в холодный конец печи).</p>

Продолжение табл. 2.1

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
	<p>(не фиксируется, если печь работает с влажностью после цепей 0 - 1%).</p> <p>Незначительное снижение разрежения в пыльной камере/</p>		<p>результате их неверной навески (материал накапливается на цепях, а затем пересушивается и сбрасывается с них).</p> <p>5. Внутреннее нестационарное возмущение по неизвестным причинам.</p>	<p>3. При сильном возмущении дополнительно убавить подачу топлива.</p>
7.	<p>Температура отходящих газов выше нормы.</p> <p>Увеличение температуры материала за цепной завесой.</p> <p>Увеличение нагрузки на главный привод.</p> <p>Увеличение размера гранул клинкера (при сильном перегреве возможно клинкерное пыление).</p> <p>Увеличение уровня подъёма материала.</p> <p>Увеличение температуры материала в зоне кальцинирования.</p> <p>Снижение содержание CO<sub>2</sub> в отходящих газах.</p> <p>Снижение давления под решёткой колосникового холодильника.</p>	<p>Перегрев всей печи</p>	<p>1. Снижение питания печи.</p> <p>2. Изменение свойств сырьевого шлама.</p> <p>3. Большой расход топлива.</p>	<p>1. Снизить количество топлива.</p> <p>2. Прикрыть шибер дымососа (уменьшить разрежение в пыльной камере).</p> <p>3. Если печь сильно перегрета, на 1-3 минуты резко сократить подачу топлива на 70-80%.</p> <p>4. Понизить скорость движения решётки колосникового холодильника.</p>

№	Изменение параметров	Тепловое состояние печи	Причины выхода из режима	Необходимые действия
8.	Увеличение нагрузки на главный привод (снижение скорости вращения печи). Увеличение размера гранул клинкера (при сильном перегреве возможно клинкерное пыление). Увеличение уровня подъёма материала. Увеличение температуры материала в зоне кальцинирования. Снижение содержание CO <sub>2</sub> в отходящих газах. Яркое свечение печи (до соломенно-жёлтого).	Избыток теплоты в горячей части печи	1. Изменение химических свойств шлама. 2. Увеличение влажности материала при постоянном питании печи. 3. Уменьшение слоя материала на входе в зону спекания. 4. Внутреннее нестационарное возмущение. 5. Большой расход топлива.	1. Снизить количество подаваемого топлива. 2. Приоткрыть шибер дымососа, увеличив разрежение в пыльной камере. 3. При сильном перегреве на 2-3 минуты резко сократить подачу топлива на 70-80%. 4. Если произошло снижение давления под решёткой колосникового холодильника, понизить скорость движения решётки.

События, приводящие к выходу печи из режима можно разбить на следующие группы:

- а) изменение химического состава шлама;
- б) изменение физических свойств материала (влажности, тонкости помола, структуры материала);
- в) неверные управляющие воздействия (например, неправильно установленные тягодутьевой режим, питание печи, расход топлива, положение форсунки и т. п.);
- г) выход из номинального режима работы оборудования (замазывание цепной завесы шламом, плохая работа холодильника, залипание контрольного бачка шламом);
- д) аварии оборудования (кратковременное или полное прекращение работы оборудования);
- е) внутренние нестационарные возмущения.

Аварии влекут за собой обязательную остановку печного агрегата, способы оценки аварийной ситуации рассмотрены в разд. 4.3. Остальные события приводят к изменению тепловой работы печи. Поэтому изме-

нение режима работы, независимо от вызвавших его событий, можно объяснить тремя причинами:

- а) нехваткой теплоты в целом по печи или в отдельных зонах;
- б) повышенным теплонапряжением (избытком теплоты) в печи или в отдельных зонах;
- в) неправильным распределением теплоты, когда в одной из зон печи имеется повышенное теплонапряжение, а в другой – недостача теплоты.

Рассмотрим основные особенности управления вращающимися печами.

Главное отличие обжига цементного клинкера во вращающихся печах мокрого способа производства состоит в том, что различные процессы химического и структурного преобразования сырья, горения и теплообмена протекают в одном аппарате. Поэтому практически невозможно регулировать один процесс без влияния на остальные, то есть вращающаяся печь является объектом связанного регулирования, и любая компенсация возмущения в определённой зоне печи приводит к изменениям на других участках [3]. Так, открытие шиберы дымососа для увеличения количества теплоты, поступающей в зону подогрева, приводит к укорачиванию факела и увеличению теплонапряжения печи на коротком участке. Увеличение расхода топлива для прогрева зоны спекания приводит к перегреву остальных зон. Таким образом, любое управляющее воздействие должно приниматься на основе комплексного анализа и знаний о взаимосвязи всех параметров печи.

Для вращающихся печей, даже одного типа и размера и работающих на одинаковом шламе, нет универсальных оптимальных значений параметров. Наилучшие режимы обжига на всех печах несколько отличаются и подбираются конкретно для каждого агрегата. Режим обжига зависит от следующих факторов: размеров печного агрегата, длительности рабочей компании печи (степени износа оборудования), характеристик внутренних теплообменных устройств, свойств сырьевого шлама, возможностей управления, качества работы вспомогательного оборудования (холодильника, электрофильтров и др.), заданной производительности печи, профессионального уровня операторов. В процессе эксплуатации вращающейся печи факторы, определяющие оптимальные значения параметров обжига, могут меняться, что вызывает необходимость корректировки режима. Поэтому наиболее рациональный режим обжига подбирается для одной печи при конкретных условиях её работы.

Одна из важных особенностей печного агрегата – его технологическая инерционность и запаздывание результатов управляющих воздействий и возмущений. Большая часть возмущений и воздействий дают о себе знать лишь через некоторое время (например изменение свойств шлама, увеличение расхода топлива). Это необходимо учитывать как

при контроле, так и при управлении печью. Вследствие инерционности резкое изменение управляющего воздействия приводит к возникновению сложных технологических ситуаций. Поэтому не допустимо "раскачивать" печь, то есть периодически резко изменять количество теплоты, поступающего в неё. Это влечёт за собой увеличение возмущения, и в конечном итоге приводит к переводу печи в режим "тихого хода", а возможно и к аварийной ситуации. Для появления видимых результатов управляющего воздействия должно пройти некоторое время, оно уменьшается при увеличении величины воздействия. При рациональном своевременном воздействии время запаздывания составляет не менее 5-10 минут.

Рассмотрим следующую ситуацию. Содержание  $\text{CO}_2$  в отходящих газах увеличивается, и машинист печи добавляет топливо. Содержание  $\text{CO}_2$  в этот момент ещё больше возрастёт, так как в реакцию декарбонизации вовлекается большее количество материала. Через некоторое время длина зоны декарбонизации установится и количество  $\text{CO}_2$  снизится.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что управляющие воздействия должны быть своевременными и по возможности плавными. Отметим, что существуют резкие кратковременные способы воздействия на характер режима обжига, но они относятся к критическим ситуациям [6].

Печь можно разделить на две технологические зоны – холодную и горячую, которые оказывают взаимное влияние друг на друга.

Режим работы холодной части печи (зоны сушки и подогрева) при постоянных свойствах шлама в основном определяется характеристиками цепной завесы и внутренних теплообменников, разрабатываемых с учётом конкретных реологических и физических свойств материала. Изменение количества теплоты, поступающей в холодную часть печи, меняет характер работы цепной завесы и имеет отрицательные последствия (изменение положения зоны критической вязкости шлама, перелив шлама в пыльную камеру, увеличение количества пылевидной фракции в материале, образование колец в цепной завесе и т. п.). Избыточное количество теплоты приводит к возрастанию содержания пылевидной фракции в материале и увеличению слоя материала в результате того, что пересушенный материал стряхивается с цепей. Это является причиной осложнений в последующих зонах, так как поверхность теплообмена у пыли меньше чем у гранул, в то время как скорость движения пыли по печи значительно больше. Таким образом, необходимо поддерживать постоянный технологический режим в холодной части печи.

Особенностью обжига материала в зоне спекания является наличие теплового запаса. Тепловой запас печи – некоторый избыток теплоты в

зоне, поддерживающийся и сохраняющийся некоторое время вследствие тепловой инерционности. Наличие теплового запаса позволяет сглаживать незначительные возмущения (небольшой перепад величины слоя материала, химических свойств шлама, степени подготовки материала в предыдущих зонах). При стабильной работе оборудования, подготовке шлама с минимальными отклонениями химических и физических свойств этот тепловой запас должен быть минимальным. В противном случае интервал приходится увеличивать, что ведёт к некоторому перерасходу топлива, но обеспечивает постоянный режим обжига клинкера и, следовательно, стабильность работы печного агрегата.

Наиболее сильно на тепловой режим печи влияет расход топлива. Поэтому при управлении печью следует избегать изменения количества подаваемого топлива, отдавая предпочтение более мягким воздействиям (используя возможности регулировки факела, изменения открытия шиберы дымососа и энтальпии вторичного воздуха).

По результатам анализа нахождения необходимого управляющего воздействия предлагается основывать на четырёх положениях:

- исключение причинности процесса (независимость текущего состояния и способов выхода из него от причины отклонения);
- декомпозиции объекта (позонная оценка состояния печи и управление путём перераспределения теплоты между зонами);
- разделение воздействий для компенсации возмущения и воздействий для перехода в новый режим работы;
- постоянство теплового режима печи.

## **2.2. СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ**

Стабилизацию технологического режима обжига предлагается основывать на четырёх положениях:

- исключение причинности процесса;
- декомпозиции объекта;
- постоянство теплового режима печи;
- разделение компенсации возмущения и перехода в новый режим работы.

### **Исключение причинности процесса**

При систематизации знаний по управлению вращающейся печью установлено, что необходимые управляющие воздействия зависят лишь от теплового 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, загрузлении помола, прекращении пылевозврата и т. п.).



О величине возмущения всегда можно судит по тепловому состоянию печного агрегата. Одновременно это позволяет учитывать имеющийся тепловой запас печи. В то же время, как правило, о причине и степени выхода из режима машинист печи не знает, если возмущение было кратковременным, или узнает с опозданием.

Рассмотрим пример выхода печи из нормального режима работы.

**Пример 1** ( табл. 2.2).

*Причина возмущения.* Уменьшение влажности сырьевой шихты при постоянном питании печи шламом.

*Описание производственной ситуации.* Изменение технологического состояния печи выражено в уменьшении затрат теплоты на испарение влаги и увеличение количества материала в горячей части печи. Химический состав шлама в этот период практически не менялся.

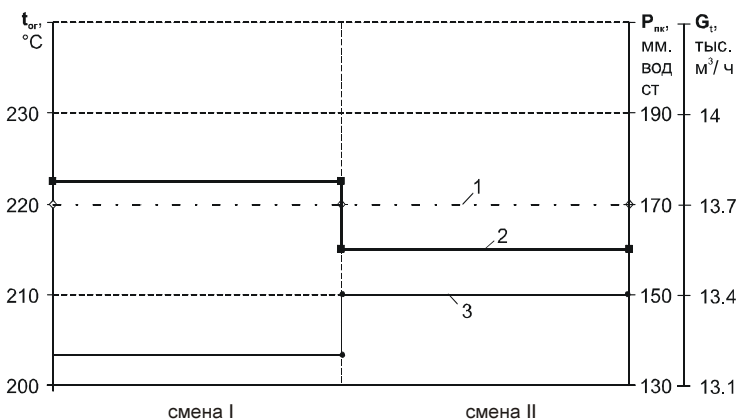
Таблица 2.2

**Параметры работы печи № 2 размером 5×185 м ОАО «Осколцемент»**

Дата	Значение параметров (средние за смену)				
	Расход шлама, м <sup>3</sup> /ч	Расход топлива, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Влажность шлама, %	Температура отходящих газов, °С	Разрежение в пыльной камере, мм. вод. ст.
24.03.98	112,5	13,2	38,4	220	175
25.03.98	112,5	13,4	37,5	220	160

*Управляющие действия.* Для обеспечения снижения затрат теплоты в холодной части печи и увеличения в горячей части уменьшено разрежение в пыльной камере ( $P_{пк}$ ) и несколько увеличен расход топлива ( $G_t$ ).

Изменение параметров показано на рис. 2.1.



**Рис. 2.1. Величина необходимого разрежения в пыльной камере в зависимости от температуры отходящих газов:**

1 – температура отходящих газов; 2 – разрежение в пыльной камере; 3 – расход топлива

**Пример 2** (табл. 2.3).

*Причина возмущения.* Кратковременное снижение питания печи.

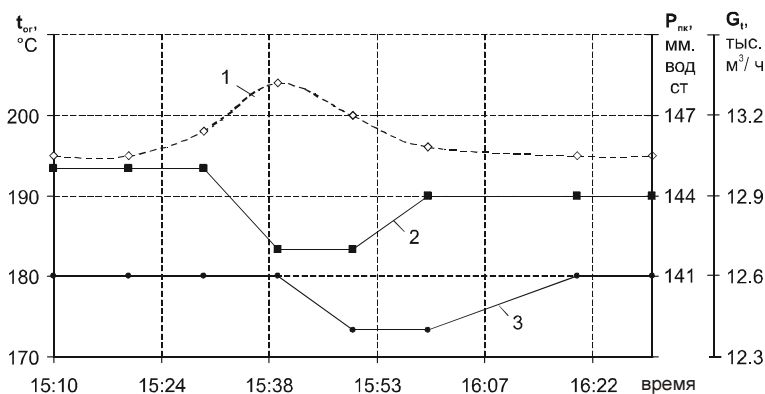
*Описание производственной ситуации:* По механическим причинам какое-то время печь получала пониженное количество шлама. Продолжительность снижения питания точно не известна, так как питание печи измеряется периодически по времени наполнения контрольного бачка. Малое количество шлама вызвало повышение температуры отходящих газов ( $t_{ог}$ ), то есть технологическое состояние холодной части печи изменилось.

Таблица 2.3

**Параметры работы печи при кратковременном снижении питания**

Время	Расход шлама, м <sup>3</sup> /ч	Расход топлива, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Нагрузка на главный привод, А	Температура отходящих газов, °С	Температура в зоне подгрева, °С	Разрежение в пыльной камере, мм. вод. ст.	Процент открытия шибер дымососов, №1/№2
15 <sup>10</sup>	112,5	12,6	15,8	195	480	145	34/30
15 <sup>20</sup>	112,5	12,6	16,0	195	480	145	34/30
15 <sup>30</sup>	111,1	12,6	16,0	198	480	145	34/30
15 <sup>40</sup>	107,1	12,6	16,2	204	480	142	32/30
15 <sup>50</sup>	111,8	12,4	16,2	200	485	142	32/30
16 <sup>00</sup>	113,2	12,4	16,4	196	483	144	34/29
16 <sup>30</sup>	113,2	12,6	15,6	195	480	144	34/29

*Управляющие действия.* Для стабилизации работы был уменьшен процент открытия шибер дымососа, то есть уменьшено разрежение в пыльной камере, с последующим снижением расхода топлива. Взаимное влияние изменения  $t_{ог}$ ,  $P_{пк}$  и  $G_t$  показано на рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Величина необходимого разрежения в пыльной камере в зависимости от температуры отходящих газов:**

1 – температура отходящих газов; 2 – разрежение в пыльной камере; 3 – расход топлива

**Пример 3** (табл. 2.4).

*Причина возмущения.* "Ослабление" печи, постановка на "тихий ход" и перегрев печи во время "тихого хода" (работы печи с пониженными оборотами и питанием).

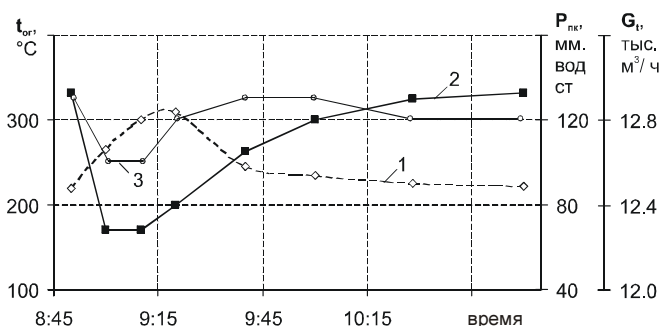
Таблица 2.4

**Параметры работы печи № 2 АО «Осколцемент»  
во время и после «тихого хода»**

Время	Расход шлама, м <sup>3</sup> /ч	Расход топлива, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Разрежение в пыльной камере, мм вод. ст.	Температура отходящих газов, °С	Температура в зоне подогрева, °С	Нагрузка на главный привод, А	Примечания (частота вращения печи)
1	2	3	4	5	6	7	8
8 <sup>50</sup>	112,5	12,9	133	220	470	17,8	Печь "остыла" (1,07 об/мин)
9 <sup>00</sup>	59,4	12,6	68	265	480	17,8	"Тихий ход" (1,52 об/мин)
9 <sup>10</sup>	59,4	12,6	68	300	510	17,8	"Тихий ход" (1,52 об/мин)
9 <sup>20</sup>	81,1	12,8	80	310	510	19,2	3 <sup>й</sup> контакт (1,26 об/мин)
9 <sup>40</sup>	111,8	12,9	105	245	500	22,6	Полный ход (1,07 об/мин)
10 <sup>00</sup>	111,8	12,9	120	235	490	22,8	-
10 <sup>28</sup>	111,8	12,8	130	225	490	23,6	Печь перегрета
11 <sup>00</sup>	111,1	12,8	133	222	480	23,0	-

*Описание производственной ситуации.* Уменьшение скорости вращения печи привело к уменьшению теплообмена в холодной части печи. Кроме этого не пропорционально уменьшению скорости вращения и расхода шлама был снижен расход топлива. Эти причины привели к резкому возрастанию температуры отходящих газов.

*Управляющие действия.* Для удержания наилучшего технологического режима уменьшается разрежение в пыльной камере. В результате открытия шиберы дымососа  $P_{пк}$  принимает своё рабочее значение по мере возвращения печи в нормальный режим работы. Взаимное влияние  $t_{ог}$  и  $P_{пк}$  показано на рис. 2.3.



**Рис. 2.3. Величина необходимого разряжения в пыльной камере и расхода топлива в зависимости от температуры отходящих газов в нестационарном режиме:**

1 – температура отходящих газов; 2 – разряжение в пыльной камере; 3 – расход топлива

В приведённых примерах управляющие воздействия для стабилизации теплообмена в холодной части печи, несмотря на различие причин возмущения, одинаковые по характеру и отличаются только величиной значения.

Таким образом, можно сделать вывод, что необходимое воздействие на печь мало зависит от причины выхода из режима, а определяется только её текущим технологическим состоянием.

Данное положение сходно с классической задачей оптимального управления (оптимизацией конечного состояния объекта управления), когда исследуется и оптимизируется конечное состояние объекта, а каким «путём» объект пришёл в это состояние, не учитывается. В нашем случае тепловое состояние печи является лингвистическим параметром и не может быть определено численно.

Положение позволяет формализовать производственные правила и значительно уменьшить их количество.

### **Декомпозиции объекта**

Положение заключается в позонной оценке состояния печи и перераспределения теплоты между зонами. Печь разбивается на две - четыре технологических зоны (называемых далее также частями печи) и, в зависимости от теплового состояния зоны, определяются управляющие воздействия, заключающиеся в перераспределении теплоты в печи.

Во вращающейся печи происходит тепловая обработка материала. Для этого к нему подводится определённое количество теплоты, требуемое для завершения последовательных стадий преобразования. Выход из нормального режима происходит вследствие недостачи теплоты на проведении одной из стадий (так называемая затянута или остывшая зона) или превышении необходимого количества теплоты (что приво-

дит к перегреву части печи). Поэтому управление печью осуществляется рациональным распределением теплоты в печи.

Вращающаяся печь является объектом с распределёнными параметрами, который в соответствии с принципами системного анализа можно представить в виде последовательности ячеек идеального смешения (зон печи), характеризующихся завершённостью определённых стадий переработки сырья в клинкер. Количество зон, состояние которых можно оценивать, определяется системой контроля печи.

На печах мокрого способа производства выделяется холодная и горячая части или холодная часть, зона декарбонизации и горячая часть. По состоянию зоны определяется необходимое воздействие для возвращения зоны в нормальный режим работы, которое заключается в добавлении или снижении количества передаваемой материалу теплоты.

Декомпозиция печи позволяет разделить задачи оценки состояния зон и определения управляющих воздействий, в результате нечёткие производственные правила управления не будут зависеть от конкретного набора регистрирующих приборов на печи. Положение делает базу правил нечётких производств более структурированной, полностью описывающей объект управления, что позволяет избежать избыточности и противоречивости.

Кроме этого, данное положение во много раз уменьшает количество правил, необходимое для обеспечения требования полноты нечёткой производственной системы.

Для подтверждения этого вывода рассмотрим следующий пример. В системе имеется семь входных параметров, каждый из которых описан пятью терм-множествами. Три параметра характеризуют тепловое состояние одной технологической части печи, а четыре другой.

Необходимое количество производственных правил будет равно [131]:

$$N = \prod_{i=1}^n l_i,$$

где  $n$  – количество входных переменных;  $l_i$  – мощность терм-множества для оценки  $i$ -ой входной переменной.

Таким образом, необходимое количество правил для обеспечения требования полноты системы нечётких производств, сформированной обычным способом, равно  $78125$ , а предложенным способом –  $125 + 625 + 25 = 775$ .

### **Постоянство теплового режима печи**

Рациональный тепловой режим работы печи определяется объёмным теплонапряжением в ней.

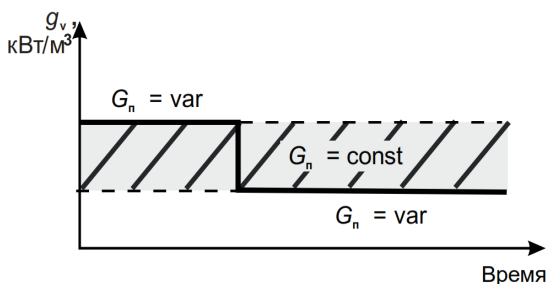
Объёмное теплонапряжение печи  $q_v$ , кВт/м<sup>3</sup> [6], определяется по формуле:

$$q_v = \frac{G_T \cdot Q_p^H}{V_{п}},$$

где  $G_T$  - расход топлива;  $Q_p^H$  - низшая рабочая теплота сгорания топлива;  $V_{п}$  - внутренний объем печи.

Постоянный тепловой режим печи необходим для обеспечения стационарности протекающих процессов. 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<sub>2</sub>, 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 объёмным теплонапряжением (объёмной удельной тепловой мощностью) в ней, то оптимальному тепловому режиму соответствует определённое значение теплонапряжения, которое необходимо поддерживать. Наибольшее значение объёмного теплонапряжения соответствует ситуации, когда становится невозможным полное сгорание топлива, то есть имеется опасность недожога, а наименьшее – когда имеется слишком большой запас по производительности, то есть печь работает в неэкономичном режиме. Можно выделить допустимый интервал изменения объёмного теплонапряжения, при котором следует поддерживать постоянную производительность печи. Вне этого интервала поддерживается постоянный тепловой режим с изменением производительности (рис. 2.4).

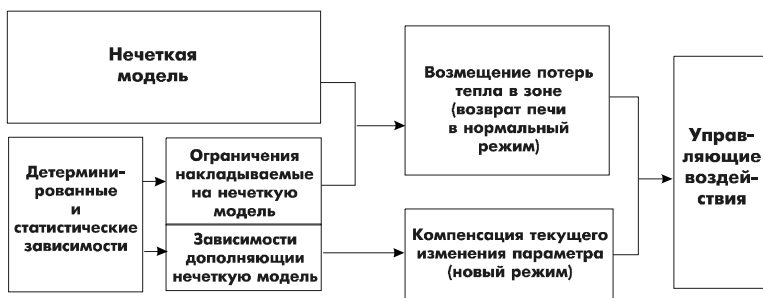


**Рис. 2.4. Пределы допустимого изменения объёмного теплонапряжения печи  $q_v$  и производительностью печи  $G_{п}$  ( $\tau$  - время)**

В соответствии с этим положением управление основано на постоянном тепловом режиме печи, а не постоянной производительности, как часто осуществляется на практике (то есть задаётся не расход топлива, необходимый для обжига материала, а количество материала, которое можно обжечь при заданном расходе топлива, то есть при фиксированном теплонапряжении). Это 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.

### **Разделение компенсации возмущения и перехода в новый режим работы**

При изменении технологических параметров, например, свойств сырья, происходит нарушение стабильности работы печи. Для возврата к нормальному режиму работы необходимо ликвидировать возникшие возмущения и учесть изменение режима в связи с новыми значениями параметров. Поэтому количество теплоты, подаваемой в технологическую зону печи, определяется как сумма изменения теплоты, необходимой для возмещения нарушения теплового режима зоны и изменения количества теплоты в связи с изменениями параметров. Реализация положения показана на рис. 2.5.



**Рис. 2.5. Разделение компенсации возмущения и перехода в новый режим**

Этот тезис позволяет произвести объединение нечёткой модели и детерминированных зависимостей в экспертной системе.

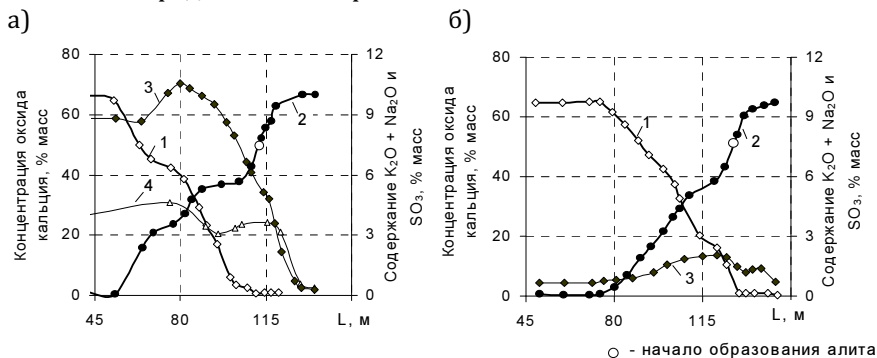
Он может быть рассмотрен на следующем примере. Об изменении влажности шлама становится известно только через час или более (время зависит от периодичности замеров, производимых заводской лабораторией). За этот срок печь частично выходит из нормального режима работы. Поэтому общее изменение теплоты равно изменению теплоты для вывода печи в нормальный режим работы и теплоты для перевода печи в новый режим с изменившейся влажой.

## 2.3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА РЕЖИМ ОБЖИГА

Состав сырьевого шлама имеет огромное значение при определении наилучшего режима обжига цементного клинкера. Колебания химических и физических свойств шлама вызывает необходимость изменения режима обжига. Это особенно важно при выпуске рядового цемента из нетрадиционных видов сырья, так как сырьевая база заводов истощается, и все чаще в качестве сырья применяются различные производственные отходы, содержащие примеси. Особую роль в определении наилучшего режима обжига играют щелочные соединения. В результате исследований [6, 20, 23, 24, 168–170] установлено, что щелочные соединения при температуре до 1200°C ускоряют процессы образования низкоосновных силикатов, особенно  $C_2S$ . Кроме того, щелочи возгоняются из клинкера в высокотемпературной области печи, частично присаживаются в зоне сушки, а частично осаждаются в электрофильтрах и возвращаются в печь с пылью. Циркуляция щелочей в печном агрегате приводит к их накоплению с течением времени.

Для исследования механизма влияния щелочей на режим обжига клинкера были рассмотрены результаты испытаний двух печей Белгородского цементного завода [6]. Печи № 2 и № 4 имеют типоразмер 4×150 м и оснащены планетарными холодильниками. В обжигаемом материале печи № 4 содержалось большое количество щелочных оксидов, обжиг сопровождался клинкерным пылением. В печи № 2, наоборот, физико-химические процессы протекали ближе к классическим представлениям Юнга [171].

По отобранным пробам определялся минералогический состав материала по длине печи. Изменение по длине печи оксида кальция в карбонатах  $CaO_{кар}$ , оксида кальция связанного в минералы  $CaO_{мин}$ , а так же  $K_2O$  и  $Na_2O$  представлено на рис. 2.6.



**Рис. 2.6. Изменение содержания оксида кальция и щелочей по длине печи  $L$ :**  
а – печь № 4; б – печь № 2; 1 -  $CaO_{кар}$ ; 2 -  $CaO_{мин}$ ; 3 -  $K_2O + Na_2O$ ; 4 -  $SO_3$



По изменению минералогического состава материала было определено положение технологических зон печи (табл. 2.5). При определении границ технологических зон печи использовались следующие утверждения:

1. Конец зоны подогрева находится в месте начала разложения  $\text{CaCO}_3$ .
2. Длина зоны декарбонизации определяется существованием  $\text{CaCO}_3$ .
3. Экзотермические реакции происходят одновременно с образованием расплава, таким образом зона экзотермических реакций объединяется с зоной спекания.
4. Зона охлаждения относительно обреза печи определяет профиль и положение факела.

Таблица 2.5

**Размер и положение зон печей**

Зона печи	Длина зон печи №2		Длина зон печи №4	
	м	%	м	%
Сушки и подогрева	75	50	53	35
Декарбонизации	49	33	57	38
Экзотермических реакций	0	0	0	0
Спекания	17	11	22	15
Охлаждения	9	6	18	12

Из таблицы и графиков, приведённых на рис. 2.6, видно, что в конце зоны декарбонизации некоторое количество  $\text{CaO}$  уже связано в минералы. Это объясняется интенсифицирующим действием щелочей на образование белита ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Так, для печи № 2 содержание  $\text{CaO}_{\text{мин}}$  на выходе из зоны декарбонизации равно 42%, а для печи № 4 – 43%. Из данных, приведённых в табл. 2.5, можно сделать вывод о том, что режим работы печи № 4 характеризуется смещением зон в сторону холодного конца, что также может быть объяснено влиянием большего содержания циркулирующих по печному агрегату щелочных веществ.

### **Определение теплоты возгонки и конденсации щелочных соединений**

При определении влияния щелочей на обжиг цементного клинкера необходимо знать теплоту, затрачиваемую на возгонку (испарение) щелочных соединений. В литературе такие данные не приводятся, поэтому необходимо было экспериментально определить эту величину.

Для определения теплоты возгонки составлялись шихты состоящие из 80%  $\text{CaCO}_3$  и 20% одного из щелочных соединений ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Затем полученные смеси были подвергнуты термиче-

скому анализу и проводилось сравнение пиков кривых дифференциально термического анализа (ДТА), соответствующих возгонке исследуемых соединений (рис. 2.7). Для интенсификации возгонки щелочей анализ проводился в атмосфере водяных паров по методике В.К. Классена [6]. Потери массы, которые определялись по кривой потери масс, соответствующие термическим пикам, совпадали с исходной массой добавленных щелочей.

Определение энтальпии возгонки осуществлялось по следующей схеме:

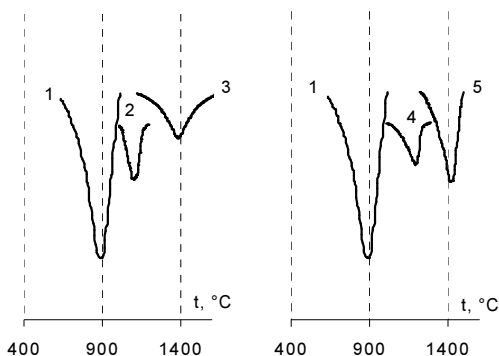
1. Определялись отношения площади пика термической кривой к массе соединения, то есть теплота реакции  $H_p$ .

2. Рассчитывалось отношение  $H_p$  щелочных соединений к  $H_p \text{ CaCO}_3$ .

3. По известной из справочных данных энтальпии реакции декарбонизации определялось значение энтальпии возгонки щелочных соединений по формуле:

$$H = k \cdot H_{\text{CaCO}_3},$$

где  $H$  - энтальпия возгонки щелочного соединения;  $k$  - отношение  $H_p$  щелочных соединений к  $H_p \text{ CaCO}_3$ ;  $H_{\text{CaCO}_3}$  - стандартная энтальпия реакции декарбонизации. Результаты расчётов представлены в табл. 2. 6.



**Рис. 2.7. Тепловые эффекты возгонки щелочей и декарбонизации  $\text{CaCO}_3$  :**  
 1 –  $\text{CaCO}_3$  (80 мас. %); 2 –  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (20 мас. %); 3 –  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (20 мас. %); 4 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (20 мас. %);  
 5 –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (20 мас. %).

Таблица 2.6

**Энтальпии возгонки и разложения щелочных соединений**

Вещество	$H_p$	$k$	$H$	
			кДж/ моль	кДж/ кг
$\text{K}_2\text{SO}_4$	139,2	1,18	210,5	1208
$\text{K}_2\text{CO}_3$	76,2	0,64	114,2	826
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	67,0	0,57	101,0	953
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	158,0	1,34	238,3	1678

## Расчёт позонного теплового баланса

Целью расчётов является определение распределения по длине печи необходимого количества теплоты для нагрева материала и реакций клинкерообразования, с учётом тепловых изменений в результате возгонки и конденсации щелочных соединений. Расчёт произведён по данным работы печей Белгородского цементного завода с разным содержанием щелочей в материале. Для сравнения выполнен расчёт идеализированного варианта, когда химические процессы протекают согласно классическим представлениям В. Н. Юнга.

По литературным данным [6, 171, 172] для расчёта баланса были приняты следующие температурные границы зон (табл. 2.7). Некоторые параметры и химический состав клинкера для печей № 2 и № 4 Белгородского цементного завода приводятся в табл. 2.8.

Таблица 2.7

### Температурные границы зон печи

Название зон	Температура, °С	
	начальная граница	конечная граница
Сушки	20	100
Подогрева	100	900
Декарбонизации	900	1200
Экзотермических реакций и спекания	1200	1450
Охлаждения	1450	1200

Таблица 2.8

### Характеристики сырьевого шлама и клинкера

Наименование	Значение		Наименование	Значение	
	Печь № 2	Печь № 4		Печь № 2	Печь № 4
Химический состав клинкера:			Минералогический состав:		
CaO	66,5	67,9	C <sub>4</sub> AF	4,7	5,2
SiO <sub>2</sub>	22,6	22,3	C <sub>3</sub> S	59,5	67,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	4,9	C <sub>2</sub> S	19,9	12,6
F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	4,6	C <sub>3</sub> A	14,9	14,0
K <sub>2</sub> O	0,6	0,2	Содержание K <sub>2</sub> O+SO <sub>3</sub> в материале,%	4	18
SO <sub>3</sub>	0,5	0,2			
Модульные характеристики:			Количество C <sub>2</sub> S на границе зоны декарбонизации,%	42	37
КН	0,90	0,93	Влажность шлама,%	39,5	39,5
n	2,3	2,3			
p	1,0	1,07			

В приводимом расчёте необходимо показать основные закономерности, проявляющиеся при увеличении циркулирующих в печи щелочей, поэтому для упрощения были приняты следующие допущения:

- 1) отсутствует пылеунос материала из печи, то есть все щелочи подвергшиеся возгонки в зоне спекания присаживаются в зоне сушки;
- 2) не учитываются потери с газом из печи и стенками печного агрегата;
- 3) щелочные соединения представлены  $K_2SO_4$ ;
- 4) в качестве глинистого компонента используется каолинит.

Превращение материала по зонам для двух печей показано в табл.

2.9. Результаты расчётов тепловых балансов представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.9

**Материальный баланс печей, кг/кг кл.**

Соединение	Температурные границы зон, °С									
	Печь № 2					Печь № 4				
	20	100	900	1200	1450	20	100	900	1200	1450
CaCO <sub>3</sub>	1,19	1,19	1,19	0	0	1,21	1,21	1,21	0	0
CaO	0	0	0	0,38	0	0	0	0	0,39	0
SiO <sub>2</sub>	0,17	0,17	0,23	0,07	0	0,16	0,16	0,22	0,06	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0
H <sub>2</sub> O	1,02	0,00	0	0	0	1,02	0,00	0	0	0
AS <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,12	0,12	0	0	0	0,12	0,12	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0,05	0,05	0	0	0	0,05	0,05	0
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,01	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,19	0,19	0,19	0,004
C <sub>3</sub> S	0	0	0	0	0,59	0	0	0	0	0,68
C <sub>2</sub> S	0	0	0	0,44	0,20	0	0	0	0,44	0,13
C <sub>3</sub> A	0	0	0	0	0,15	0	0	0	0	0,14
C <sub>4</sub> AF	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0,05
Сумма	2,56	1,58	1,56	1,04	1,00	2,58	1,74	1,72	1,18	1,00

Таблица 2.10

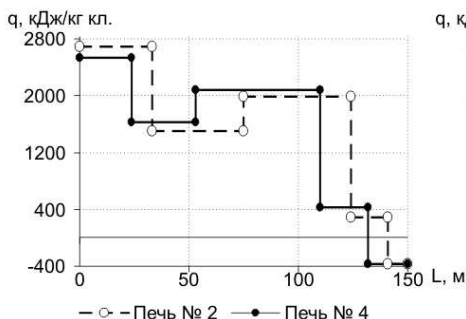
**Необходимое количество теплоты, кДж/кг кл**

Печь	Температурный интервал зон, °С					Сумма	
	20÷100	100÷750	750÷1100	1100÷1450	1450 ÷ 1200		
№ 4	2533	1635	2088	435	-367	6324	
№ 2	2701	1502	1992	294	-367	6121	
Согласно данным В. Н. Юнга	2701	1502	2187	-352	352	-367	6022

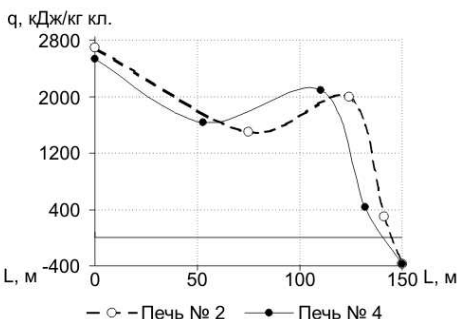
Сравнительный анализ распределения необходимого количества теплоты приводиться на рис. 2.8 – 2.10.

Для печи № 4 (по сравнению с печью № 2) имеет место увеличение количества необходимой теплоты в высокотемпературных зонах и её снижение в зоне сушки, вследствие увеличения возгонки и конденсации щелочей. Если дополнительно учитывать пылеунос, необходимость теплоты в зоне сушки печи № 4 будет ещё выше.

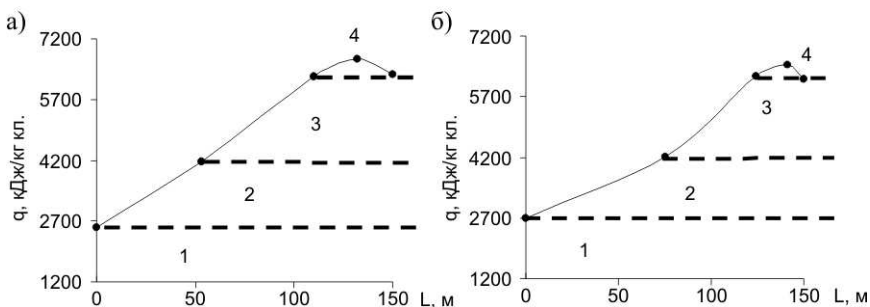
Согласно работам Г. Эйгена [173] увеличение теплотерь в высокотемпературных зонах в несколько раз увеличивает необходимую теплоту на обжиг в целом по печи. Кроме того, смещение зон в сторону холодного обреза сократило полезный объём печи. Таким образом, работа печи № 4 значительно менее экономична по сравнению с печью № 2. Этот вывод подтверждается значением удельного расхода топлива. Так, несмотря на более низкую производительность (на 6 т), на печи № 2 был зафиксирован расход топлива меньше на 5 кут/ т кл.



**Рис. 2.8. Распределение необходимой теплоты  $q$  по зонам печей**



**Рис. 2.9. Интегральное распределение необходимой теплоты  $q$  по длине печей  $L$**



**Рис. 2.10. Необходимое количество теплоты  $q$  в технологических зонах печей:**

а – печь № 4; б – печь № 2; 1 – зона сушки и зона подогрева; 2 – зона декарбонизации; 4 – зоны экзотермических реакций и спекания

Основные причины неэкономичной работы печи № 4 следующие. Исходная химия шлама в рассмотренных примерах отличалась не значительно, в то время как режимы обжига различны. Это указывает на нерациональный режим обжига, который привёл к неправильному распределению теплоты по печи. Так, по результатам испытаний содержание кислорода в отходящих газах печи № 4 достигло 3%. Имел место большой коэффициент избытка воздуха, и как следствие, короткий удалённый факел с поздним воспламенением. Положение зоны спекания указывает на дальнюю зону горения факела. В результате усилилась возгонка щелочей из материала в зоне спекания (если для печи № 2  $R_2O$  в клинкере 0,6%, то для печи № 4 – 0,2%) и произошло накопление его в печном агрегате. Это привело в свою очередь к перераспределению необходимого количества теплоты по длине печи. В результате эндотермического процесса возгонки щелочных соединений появилась необходимость ещё большей подачи теплоты в зону спекания, то есть обжиг клинкера значительно отдался от оптимального режима работы. Произошло смещение технологических зон к холодному обрезу печи. Результатом являлось появление клинкерного пыления, что также ухудшило режим работы и потребовало ещё больше теплоты из-за ухудшения условий теплообмена в зоне спекания. Всё это стало причиной нестабильной работы печного агрегата.

Необходимые меры регулирования режима обжига могут быть следующими. Первопричиной приведённой ситуации является принятие неверного решения машинистом печи. Поэтому необходимо изменить режим обжига и вывести щелочные вещества из рециркуляции. Следовательно нужно изменить профиль и положение факела (сделать его рациональной длины), тем самым снизить температуру в зоне, уменьшить возгонку и вывести лишние щелочи из печи вместе с клинкером. В результате процесс обжига вернётся к наилучшему режиму работы для текущих условий.

Ситуация, аналогичная приведённой для печи № 4, может возникнуть по причине увеличения содержания щелочей в сырьевом шламе. В этом случае произойдут процессы, схожие приведённым в примере, измениться лишь первопричина. Действия, которые должен предпринять машинист, такие же как рекомендуемые выше. Разница с разобранный ситуацией в том, что наилучший режим обжига (к которому следует стремиться) будет несколько иным и определяется повышением содержания щелочей в сырьевом шламе. Причина в следующем, увеличение щелочей в сырьевом шламе вызовет несколько иное распределение необходимого количества теплоты. В любом случае необходимо не допустить накопление циркулирующих по печному агрегату щелочей. В исключительных ситуациях рекомендуется делать байпасирование пыли из печи.

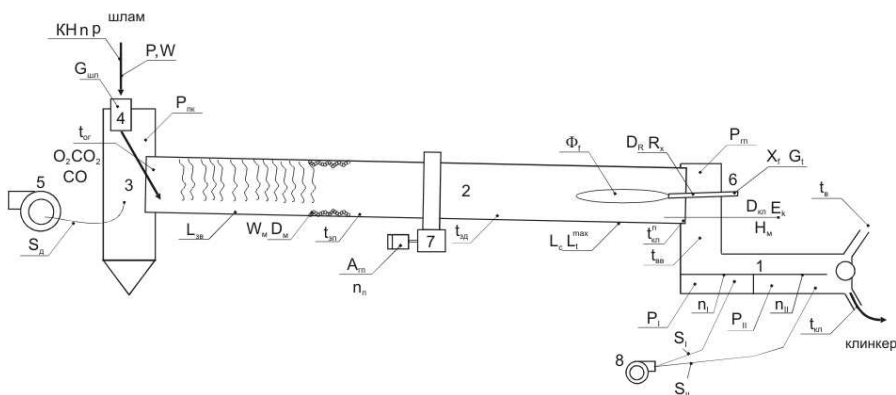
В настоящее время существуют рентгено-флуоресцентные анализаторы позволяющие определять содержание щелочных элементов в потоке (например, CONX рентгено-флуоресцентный анализатор-спектрометр BSI фирмы Bruker Baltic). Это делает возможным использование этого параметра для контроля и управления, установив подобный прибор для анализа состава возвращаемой пыли электрофильтров.

Таким образом, анализ изменения содержания щелочных оксидов в возвратной пыли из электрофильтров позволяет корректировать работу печного агрегата, контролировать характер горения топлива.

#### 2.4. АНАЛИЗ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ МОКРОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА

Наборы регулируемых (выходных) и регулирующих (входных) параметров, которые могут использоваться при управлении цементными печами мокрого способа производства работающих на газообразном топливе, представлены в табл. 2.11 и в табл. 2.12

Как видно из табл. 2.11, оптимальные значения параметров колеблются в значительных пределах. Поэтому в информационных системах целесообразно задавать оптимальное значение параметра для конкретной печи, а управление вести по абсолютному или относительному отклонению от оптимального значения. Все параметры разделены на группы, характеризующие состояние той или иной технологической части печи. Какую из технологических частей характеризует выходной параметр отмечено в табл. 2.11. На рис. 2.11 показана система контроля печи мокрого способа производства.



**Рис. 2.11. Система контроля печи мокрого способа производства (на газообразном топливе):**

- 1 – колосниковый холодильник; 2 – вращающаяся печь; 3 – пыльная камера; 4 – контрольный бачок; 5 – печной дымосос; 6 – топливная форсунка; 7 – главный привод печи

Таблица 2.11

## Регулируемые параметры цементной вращающейся печи мокрого способа производства

Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Питание печи шламом	$G_{шл}$	Количественное	В зависимости от размера печи	×	×	×	Устанавливает количество шлама, поступающего в печь. Как правило, на отечественных заводах определяется по времени наполнения контрольного бачка.
Длина зоны спекания, %	$L_c$	Количественное	10...15	-	-	×	Определяется по длине участка образования обмазки. Определяет качество клинкера, распределение температуры в зоне спекания. Измерение производится стационарными и переносными пирометрами и тепловизорами.
Уровень подъёма материала	$H_m$	Качественное	-	-	-	×	Зависит от химического состава материала и температуры в зоне спекания. Определяется визуально, а также косвенно по нагрузке на главный привод.
Нагрузка на привод, А	$A_{гп}$	Количественное	Зависит от характеристик оборудования	-	-	×	Зависят от степени нагрева, свойств и количества материала.
Частота вращения печи, мин <sup>-1</sup>	$n_p$	Количественное		-	-	×	Зависят от степени нагрева, свойств и количества материала.
Видимость в головке печи	$E_k$	Качественное	-	-	-	×	Комплексная визуальная оценка состояния зоны спекания, зависит от уровня свечения обмазки и материала, а также от наличия клинкерного пыления. Характеризует температуру зоны спекания.



Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Температура клинкера на выходе из печи, °С	$t_{кл}^п$	Количественное	900...1200	-	-	×	Характеризует длину зоны охлаждения, температуру и положение зоны спекания. Как правило, оценивается визуально.
Температура клинкера на выходе из холодильника, °С	$t_{кл}$	Количественное	50...200 (рекуператорные до 500 °С)	-	-	×	Определяется заводской лабораторией.
Преобладающий размер гранул клинкера на обресе печи, мм	$D_{кл}$	Качественное	10...30	-	-	×	Является функцией температуры в зоне спекания и химического состава шлама. Отсутствуют оперативные способы определения
Температура вторичного воздуха, °С	$t_{вв}$	Количественное	650...100	-	-	×	Для печей с колосниковым холодильником. Точное значение не определяется (на термопару влияет излучение факела). Расчётное значение 300 – 450 °С.
Температура избыточного воздуха, °С	$t_{в}^{изб}$	Количественное	70...210	-	-	×	Только для печей с колосниковым холодильником. Косвенно характеризует распределение воздуха на выходе и КПД холодильника.
Давление в первой камере колосникового холодильника, мм. вод. ст.	$PI$	Количественное	110...160	-	-	×	Только для печей с колосниковым холодильником. Позволяет судить о высоте слоя материала, размере гранул клинкера и количестве продуваемого воздуха.

Продолжение табл. 2.11

Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Давление в первой камере колосникового холодильника, мм. вод. ст.	$P_I$	Количественное	110...160	–	–	×	Только для печей с колосниковым холодильником. Позволяет судить о высоте слоя материала, размере гранул клинкера и количестве продуваемого воздуха.
Давление во второй камере колосникового холодильника, мм. вод. ст.	$P_{II}$	Количественное	70...100	–	–	×	Только для печей с колосниковым холодильником. Позволяет судить о высоте слоя материала, размере гранул клинкера и количестве продуваемого воздуха во второй камере холодильника.
Расстояние от обреза печи до максимальной температуры корпуса, м	$L_t^{max}$	Количественное	10...25	–	–	×	Является функцией от расхода топлива и формы факела. Определяется непрерывно термосканами.
Разрежение в головке печи, мм. вод. ст.	$P_{гп}$	Количественное	1...5,5	–	–	×	Для печей с колосниковыми холодильниками рекомендуется не более 2.5 мм. вод. ст. и не менее 1 мм. вод. ст. Для печей с рекуператорными холодильниками не контролируется
Химический состав шлама	–	Количественное	КН= =0.88...0.98 $n = 1,7...3,5$ $p = 0,9...3,0$	–	×	×	Определяется в лабораторных условиях (задержка около 2 часа). Характеризует необходимое количество теплоты на обжиг клинкера (ТЭК), температуру появления расплава, склонность к образованию обмазки. Обычно оценивается по КН, $n$ и $p$ .

Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Фазовый состав сырьевых материалов	–	Количественное	–	–	×	×	Влияет на режим обжига клинкера. Определяется в лабораторных условиях
Содержание CO <sub>2</sub> , в отходящих газах, %	CO <sub>2</sub> <sup>p</sup>	Количественное	19...25 (при работе на угле до 29%)	–	×	–	Определяется по содержанию CO <sub>2</sub> и O <sub>2</sub> в отходящих газах. Характеризует технологический режим работы зоны декарбонизации. Оптимальное значение CO <sub>2</sub> <sup>p</sup> подбирается индивидуально для каждой печи.
Содержание CO в отходящих газах, %	CO	Количественное	0...0.1	–	–	×	Показывает наличие неполного горения топлива.
Коэффициент избытка воздуха	α	Количественное	1.06...1.2	–	–	×	Определяется по анализу отходящих газов (процентному содержанию CO, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> и N <sub>2</sub> ). Необходимо стремиться к наименьшему значению α, при условии полного сгорания топлива.
Минералогический состав клинкера	–	Количественное	C <sub>3</sub> S≈45...63% C <sub>2</sub> S≈14...25% C <sub>3</sub> A≈4...13% C <sub>4</sub> AF≈10...18%	–	–	×	Определяется в лабораторных условиях. Зависит от химического состава сырья и состояния зоны спекания.
Микроструктура клинкера	–	Качественное	–	–	–	×	Определяется в лабораторных условиях. Зависит от свойств сырья и состояния зоны спекания.

Продолжение табл. 2.11

Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Максимальная температура корпуса печи, °C	$t_k^{max}$	Количественное	200...350	-	-	×	Контролируется для предотвращения образования прогаров.
Цвет и форма факела	$\Phi_f$	Качественное	-	-	-	×	Характеризует температуру и полноту сгорания топлива. Определяется визуально.
Температура в зоне декарбонизации, °C	$t_{зд}$	Количественное	600...1000	-	×	-	Определяется термопарой, установленной в зоне.
Количества гранул материала после цепной завесы, %	$D_m$	Количественное	20...80	×	×	-	Оперативных методов определения нет. Определяется на ситах в лаборатории либо приблизительно визуально. Диапазон оптимальных значений зависит от свойств сырья, вида цепной навески и режима работы печи.
Влажность материала после цепной завесы, %	$W_m$	Количественное	5...10 (1...2)	×	-	-	Определяется заводской лабораторией. Автоматическое определение не применяется. Возможны варианты навески цепных завес, когда влажность материала после них отсутствует
Растекаемость шлама	$P$	Количественное	45...70	×	-	-	Определяется заводской лабораторией.
Тонкость помола шлама, %	$R_{02}$	Количественное	1...5	-	×	×	Определяется заводской лабораторией.

Название параметра	Условное обозначение	Вид значения	Допустимые значения параметров	Характеризуемая часть печи			Примечание
				холодная	зона декарбонизации	горячая	
Положение зоны критической вязкости шлама, м	$L_{зв}$	Количественное	16...26	×	–	–	Определяется на слух в месте перехода от глухого к звонкому шуму цепей. Точное определение значения возможно по температуре корпуса в холодной части печи.
Температура в зоне подогрева, °С	$t_{зп}$	Количественное	гранулы: 90...110 пыль: 250...510	×	–	–	Определяется термопарой, установленной в зоне подогрева. При значении 120 - 250 °С печи работают с "тихими ходами" и образуются кольца [6].
Влажность шлама, %	$W_{шл}$	Количественное	30...46	×	–	–	Определяется заводской лабораторией. Уменьшение влажности на 1% снижает удельный расход топлива на 28...35 ккал/кг кл. Оптимальное значение определяется с учётом физических свойств шлама
Нагрузка на дымосос	$N_d$	Количественное		×	×	×	Косвенно показывает количество отходящих газов из печи.
Температура отходящих газов, °С	$t_{ог}$	Количественное	160...350	×	–	–	Определяется термопарой, установленной на обрезе холодного конца печи, в потоке газа. Снижение значения параметра на 10 °С снижает удельный расход топлива приблизительно на 1%
Разрежение в пыльной камере, мм. вод. ст.	$P_{пк}$	Количественное	60-200	×	×	×	Самопроизвольное увеличение значения параметра говорит о появлении кольца или замазывании цепной завесы.

Таблица 2.12

## Регулирующие параметры цементной вращающейся печи

Название параметра	Условное обозначение	Рекомендуемые значения	Примечания
Положение форсунки (горелки)	$X_f$	0,05...0,1 диаметра печи в сторону материала и вниз под углом 0...3%	Влияет на форму факела и режим горения топлива.
Расход топлива (давление перед горелкой)	$G_t$	Для больших печей мокрого способа производства 190...240 кут/ т кл. Для печей сухого способа производства 100...140 кут/ т кл.	Определяет тепловой режим печи и количество теплоты, поступающей в печь.
Открытие шиберы дымососа	$S_d$	30...100% (зависит от характеристик дымососа)	Определяет газодинамику печи. Осуществляет перераспределение теплоты между зонами.
Разрежение в пыльной камере	$P_{пк}$	60...200 кгс/м <sup>2</sup>	Может использоваться для определения количества воздуха, поступающего в печь. Является определяющим для регулирования работы дымососов. Изменение этого параметра устанавливается открытием шиберы дымососа.
Положение лопаток (завихрителя) горелки	$R_x$	–	Улучшает смешение топлива и воздуха. При использовании завихрителя факел укорачивается, поэтому теплота концентрируется на более коротком участке зоны спекания.
Дроссель горелки	$D_R$	–	Определяет угол раскрытия факела, скорость вылета топлива. Влияет на зону горения факела (средняя и дальняя зоны горения).

Название параметра	Условное обозначение	Рекомендуемые значения	Примечания
Скорость движения горячей решётки холодильника (для печей с колосниковым холодильником)	$n_I$	5.5...6.5 ходов в минуту	Регулирует скорость движения клинкера по решётке холодильника в первой камере, определяет высоту слоя клинкера и время его охлаждения.
Скорость движения холодной решётки холодильника (для печей с колосниковым холодильником)	$n_{II}$	9...12 ходов в минуту	Регулирует скорость движения клинкера по решётке холодильника во второй камере.
Открытие шиберов вентилятора общего дутья (для печей с колосниковым холодильником)	$S_{об}$	Зависит от характеристик вентилятора	Задаёт количество воздуха поступающего под решётки колосникового холодильника. Возможно наличие нескольких вентиляторов.
Открытие шиберов вентилятора острого дутья (для печей с колосниковым холодильником)	$S_{ост}$	Зависит от характеристик вентилятора	Определяет количество воздуха поступающего под колосники острого дутья для равномерного распределения клинкера по ширине холодильника.
Открытие шиберов дымососа избыточного воздуха (для печей с колосниковым холодильником)	$S_{изб}$	Зависит от характеристик вентилятора	Регулирует количество избыточного воздуха выводимого из холодильника в атмосферу.

Чем большее количество регулируемых параметров учитывается, тем имеется более полная картина о процессах во вращающейся печи. Отметим, что машинисты вращающихся печей, как правило, постоянно используют в управление лишь 2 – 3 основных регулируемых параметра (но такое упрощение вызвано не столько достаточностью этого количества параметров для управления, сколько невозможностью на профессиональном уровне машиниста оценить все процессы, происходящие в печи, и учитывать весь имеющийся комплекс информации).

Так же некоторые из регулируемых параметров могут дублировать друг друга (например, нагрузка на главный привод и скорость вращения печи). Таким образом, существует минимальный набор параметров, дающий достаточную информацию о работе печного агрегата.

Увеличение числа регулирующих параметров позволяет более полно и плавно регулировать режим обжига клинкера. Для регулирующих параметров также существует минимальный набор, дающий минимум управляющих возможностей (расход топлива и работа дымососов).

Использование в информационных системах минимальных наборов выходных и входных параметров позволяет ускорить процесс принятия решения, но увеличивает вероятность неточности и не позволяет использовать все возможности печного агрегата. С другой стороны, при нечётком выводе увеличения размерности модели приводит к росту массива правил и усложнению расчётов. Поэтому можно говорить об оптимальном наборе, сочетающем необходимую точность вывода и достаточно полную характеристику печи.

Одним из важных регулируемых параметров является питание вращающейся печи. Необходимо обеспечивать постоянное значение данного параметра для сырья с одинаковыми свойствами. Питание печи мокрого способа производства рассчитывается по времени наполнения контрольного бачка  $\tau$  [55]:

$$\tau = \frac{3600 \cdot V \cdot g_k}{G_n},$$

где  $V$  – объем контрольного бачка, с;  $G_n$  – заданная производительность печи, т/ч;  $g_k$  – выход клинкера из  $1\text{ м}^3$  шлама, т.

Как видно из выражения, данный параметр чётко определён, поэтому нет смысла вводить питание печи в качестве входного параметра нечёткой модели, а необходимо рассчитывать непосредственно. При переводе печи на тихий ход питание снижается пропорционально уменьшению скорости вращения печи, для обеспечения постоянного слоя материала.

Вышеизложенное определяет следующие особенности информационных систем в цементной технологии: а) выбор наборов выходных или входных параметров для использования в информационных системах



должен зависеть от их наличия на данной печи и целесообразности учёта в сложившихся условиях; б) количество выходных и входных параметров, используемых для принятия решения, не должно быть строго фиксированным. Как эти положения реализуются, показано в разделе 3.

## 2.5. ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПРОЦЕСС ОБЖИГА

### Формат описания параметров

С учётом структуры рассматриваемой экспертной системы предлагается следующий формат описания параметров, характеризующих процесс обжига. Они представлены в виде объектов, сходных по виду с лингвистическими переменными из теории нечётких множеств [119]. Каждый из объектов включает следующие элементы:

- название параметра;
- *заданное значение параметра* – значение, к которому следует стремиться для работы в наилучшем режиме, оно индивидуально для каждой печи;
- *множество значений параметра  $U$*  – конечный набор возможных значений параметра или отклонений параметра от наилучшего значения (от 5 до 30 значений в множестве), интервал между значениями выбирается с учётом цены деления контролирующих приборов;
- *множество термов  $T$*  – лингвистические значения параметров (состояние параметра в словесном виде), количеством от 3 до 9, каждому из этих нечётких термов соответствует ряд численных значений множества  $U$ ;
- *функция принадлежности  $\mu(x)$*  – связывает элементы множества термов  $T$  и множество значений параметра  $U$ ;
- *интервалы соответствия численных значений и термов* – интервалы значений соответствующих, по мнению эксперта, названиям термов.

Описание параметров для печи  $5 \times 185$  м АО «Осколцемент» в соответствии с предлагаемой структурой приведено в табл. 2.13. Данные, представленные в табл., были получены по результатам двухмесячной работы непосредственно на цементном заводе.

### Функция принадлежности нечёткого описания параметров

Нечёткое множество, являющиеся основным элементом одноимённой теории, характеризуются функцией принадлежности, которая определяет степень принадлежности значения определённому интервалу (терму). Л. Заде предложил оценивать степень принадлежности числами из интервала  $[0, 1]$ . Фиксирование значений в этом случае носит субъективный характер.

Функция принадлежности, связывающая лингвистические термины  $T$  и множество численных значений  $U$ , во многом определяет точность при нечётком выводе. Но основным затруднением при применении теории нечётких множеств на практике является то, что функции принадлежности задаются вне самой теории и их адекватность не может быть проверена непосредственно в её рамках [121]. Всё это породило большое количество методов построения функций принадлежности со своими требованиями к выбору именно этого метода.

При определении функции принадлежности  $\mu(x)$  был выбран прямой метод построения для одного эксперта [121, 123]. В данном методе непосредственно задаются значения функции  $\mu(x)$ . Кривая функции является эмпирической и определяется особенностями задания интервалов полного соответствия численных значений.

Первоначально использовались две функции принадлежности, удовлетворяющие принятым условиям [174, 175], но они оказались неприемлемыми. В работе [174] функция построена без учёта свойств параметров технологического процесса, а функция принадлежности, описанная в работе [175], требует доработки, так как не обеспечивает определённости на всем непрерывном универсуме  $U$ , к тому же максимум функции всегда находится на середине заданного интервала, что не обязательно верно.

Таблица 2.13

**Общее описание параметров обжига  
(печь 5×185 м ОАО «Осколцемент»)**

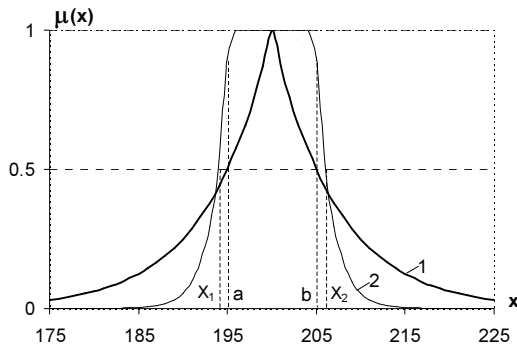
Название параметра	Множество термов	Интервалы соответствия численных значений и термов	Заданное значение	Множество значений
<b>Регулируемые параметры</b>				
Температура отходящих газов ( $T_{ог}$ )	Много ниже нормы Ниже нормы Несколько ниже нормы В норме Несколько выше нормы Выше нормы Много выше нормы	-30,0...-20,0 -20,0...-10,0 -11,0...-5,0 -5,0...5,0 5,0...11,0 10,0...20,0 20,0...40,0	200 °С	-35; -30; -25; -20; -15; -10; -8; -5; -3; 0; 3; 5; 8; 10; 15; 17; 20; 23; 25; 30; 35; 40; 45 (отклонения от заданного значения; °С)
Температура в зоне подогрева ( $T_{зп}$ )	Много ниже нормы Ниже нормы В норме Выше нормы Много выше нормы	-50,0...-30,0 -30,0...-10,0 -10,0...10,0 10,0...30,0 30,0...50,0	480 °С	-50; -40; -30; -20; -15; -10; -5; 0; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50 (отклонения от заданного значения; °С)

Продолжение табл. 2.13

Название параметра	Множество термов	Интервалы соответствия численных значений и термов	Заданное значение	Множество значений
Нагрузка на главный привод ( $A_{гп}$ )	Много ниже нормы Ниже нормы В норме Выше нормы Много выше нормы	-1,8... -1,0 -1,0... -0,4 -0,4... 0,4 0,4... 1,0 1,0... 1,8	17,0 А	-2,2; -2,0; -1,8; -1,6; -1,4; -1,2; -1,0; -0,9; -0,7; -0,5; -0,3; 0; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2 (отклонения от заданного значения; А)
Преобладающий размер гранул клинкера ( $D_{кл}$ )	Много пыли Мелкие Нормальные Много крупных Крупные	-10,0...-8,0 -8,0...-5,0 -5,0...10,0 10,0...15,0 15,0...25,0	15,0 мм	-10; -9; -8; -7; -6; -5; -3; -1; -2; 0; 3; 5; 10; 15; 20; 22; 25; 30; 35; 40; 45 (отклонения от заданного значения; мм)
Видимость в головке печи ( $E_k$ )	Плохая, темно Удовлетворительная, сильная дымка Нормальная, слабая дымка Хорошая, светло Очень хорошая, ярко	-	-	Численных значений не имеет
Регулирующие параметры				
Расход топлива ( $G_t$ )	Значительно убавить Убавить Немного убавить В пределах нормы Немного увеличить Увеличить Значительно увеличить	-0,7... -0,5 -0,5... -0,3 -0,3... -0,1 -0,1... 0,1 0,1... 0,3 0,3... 0,5 0,5... 0,7	12,4 тыс. м <sup>3</sup> /ч	-1,0; -0,6; -0,5; -0,4; -0,1; 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0 (отклонения от заданного значения; тыс. м <sup>3</sup> /ч)
Разрежение в пыльной камере ( $P_{пк}$ )	Сильно снизить Снизить Немного снизить В пределах нормы Немного увеличить Увеличить Сильно увеличить	-20...-10 -15...-5 0...-10 0... 0 0... 10 5... 15 10... 20	150 мм. вод. ст.	-35; -30; -25; -20; -15; -10; -5; -3; 0; 3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 (отклонения от заданного значения; мм, вод. ст.)

Название параметра	Множество термов	Интервалы соответствия численных значений и термов	Заданное значение	Множество значений
Положение дросселя горелки ( $D_R$ )	Сильно введен Введен Нормальное положение Выведен Сильно выведен	10... 14 14... 16 18... 18 20... 22 22... 26	18 витков	12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25 (абсолютные значения; количество витков оставшейся резьбы)
Положение лопаток завихрителя горелки ( $R_x$ )	Не введены Среднее положение Максимально введены	0 1 2	0	0; 1; 2

С учётом выявленных недостатков на основе этих функций были получены два вида функции принадлежности, представленные на рис. 2.12.



**Рис. 2.12. Функции принадлежности:**

1 – функция принадлежности вида I; 2 – функция принадлежности вида II;  $a, b$  – границы интервала полного соответствия численных значений

#### Функция принадлежности I вида

За основу взята функция экспоненциального типа. Данный вид кривой наиболее соответствует данным экспертных опросов машинистов печи, проводившихся К.Н. Смысловым в 1988 году на АО "Осколцемент". Этот же тип кривой применялся рядом авторов [174–176] для управления многостадийными технологическими системами.

Функция I вида строится по трём значениям параметра: интуитивно максимально близкому к терму значению  $c_0$ , степень принадлежности которого равна 1 (идентификатор нечёткого множества), и двум значениям  $a$  и  $b$ , являющимися границами заданного интервала. Если значение  $c_0$  указать затруднительно, оно определяется как центр заданного интервала:

$$c_0 = \frac{a + b}{2}, \quad (2.1)$$

где  $a, b$  – границы заданного интервала.

Функция принадлежности определяется уравнением:

$$\mu(x) = \begin{cases} e^{\frac{2}{x_1 - x_2} \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) / x - c_0 /} & , \text{ если } x \leq c_0 \\ e^{\frac{2}{x_3 - x_4} \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) / x - c_0 /} & , \text{ если } x > c_0 \end{cases}, \quad (2.2)$$

где  $x$  – значение параметра из множества  $U$ ;  $x_1, x_4$  – значение на множестве  $U$ , соответствующие степени принадлежности 0.5;  $x_2, x_3$  – значения, соответственно симметричные  $x_1$  и  $x_4$  относительно  $a$  и  $b$ .

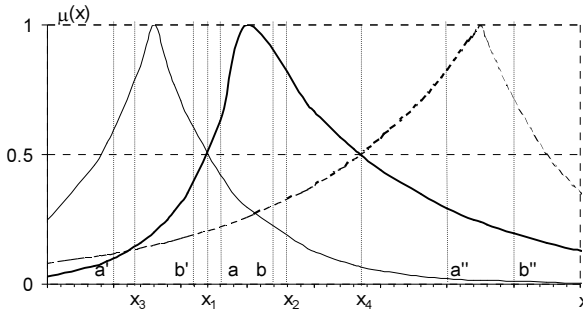
Часто эксперту трудно задать интервалы полного соответствия значений, охватывающих все множество. Поэтому значения параметра  $x_1, x_2, x_3, x_4$  обеспечивают определённость на всём непрерывном универсуме  $U$ . Это значит, что для каждого элемента множества  $U$  имеется хотя бы один из термов, для которого функция принадлежности  $\mu(x) \geq 0.5$ , то есть

$$\forall x \in U \mid \exists \mu(x) \geq 0.5$$

Значения  $x_1, x_2, x_3, x_4$  определяются следующим образом:

$$x_1 = \begin{cases} a - k'(a - b'), \text{ если } b' \leq a; & x_2 = a + b - x_1; \\ a, \text{ если } b' > a; & x_3 = a + b - x_4; \end{cases} \quad x_4 = \begin{cases} b + k''(a'' - b), \text{ если } b \geq a''; \\ b, \text{ если } b > a'', \end{cases}$$

где  $a'', b''$  – начало и конец правого соседнего интервала, заданного экспертом на универсуме  $U$ ;  $a', b'$  – значение начала и конца левого соседнего интервала на универсуме  $U$ ;  $k', k''$  – коэффициенты значимости (рис. 2.13).

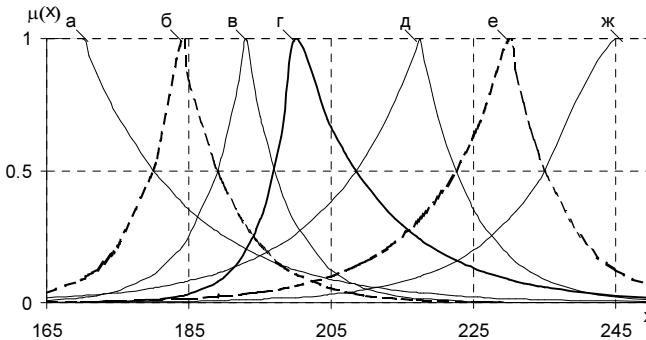


**Рис. 2.13. Построение функции принадлежности I вида**

Если предполагается одинаковая достоверность задаваемых экспертом интервалов, то  $k' = k'' = 0,5$ . Иначе  $k'$  и  $k''$  определяется пропорционально длинам интервалов, так, чтобы меньшему интервалу соответствовало меньшее значение коэффициента:

$$k' = \frac{b - a}{2(b' - a')}; \quad k'' = \frac{b - a}{2(b'' - a'')}.$$

Функции принадлежности I вида для параметра, описанного семью термами, представлены на рис. 2.14.



**Рис. 2.14. Функции принадлежности I вида для семи термов температуры отходящих газов:**

а – много ниже нормы; б – ниже нормы; в – несколько ниже нормы; г – в норме; д – несколько выше нормы; е – выше нормы; ж – много выше нормы.

#### *Функция принадлежности II вида*

Функция строится на основе предположения, что более узкий интервал абсолютных значений соответствует более высокой степени достоверности. Она имеет следующий вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} e^{\frac{1}{2c} \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) / x - x_1 /} & , \text{ если } x < x_1 \\ 1, & \text{ если } x_1 \leq x \leq x_2 \\ e^{\frac{1}{2c} \cdot \ln\left(\frac{1}{2}\right) / x - x_2 /} & , \text{ если } x > x_2. \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $a, b$  – границы заданного интервала значений;  $x_1, x_2$  – границы интервала, в котором функция принимает значение 1, определяются следующим образом:

$$x_1 = a + \left(\frac{b-a}{k}\right)^2; \quad x_2 = b - \left(\frac{b-a}{k}\right)^2,$$

где  $k$  – коэффициент, принимается отдельно для каждого параметра, исходя из значений интервалов.

Применение функций принадлежности I или II вида зависит от конкретных условий и способов определения интервалов абсолютных значений.

## 2.6. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. С технологической точки зрения все причины выхода печи из нормального режима работы при кондиционном составе сырья сводятся к трём основным, вытекающим из анализа теплового состояния печного агрегата: нехватке теплоты в целом по печи или в отдельных зонах; повышенному теплonaпряжению (избытку теплоты) в печи или в отдельных зонах; неправильному распределению теплоты, когда в одной из зон печи имеется повышенное теплonaпряжение, а в другой – недостача теплоты.

2. Предложена схема определения необходимого режима работы цементной вращающейся печи, которую можно использовать в информационных системах, предназначенных для интенсификации процесса обжига. Она основана на системном анализе технологической и теплотехнической работы печи, включающем анализ и управление отдельными зонами печи. Схема содержит четыре основных положения:

- исключение причинности процесса (независимость текущего состояния и способов выхода из него от причины отклонения);
- декомпозиция объекта (позонная оценка состояния печи и управление путём перераспределения теплоты между зонами);

- разделение воздействий для компенсации возмущения и воздействий для перехода в новый режим работы;
- постоянство теплового режима печи.

3. Показано, что щелочные соединения оказывают значительное влияние на режим обжига клинкера, изменяя распределение теплопотребности по технологическим зонам печного агрегата. Основную роль в этом играет способность щелочных соединений накапливаться в печи и ускорять процессы образования силикатов, смещая зону экзотермических реакций в сторону холодного обреза печи. Выбирая правильный режим обжига, можно частично нейтрализовать влияние щелочей и вывести их из циркуляции. Нерациональный режим обжига: чрезмерно короткий напряжённый факел, концентрирующий температуру на коротком участке зоны спекания, а так же чрезмерно длинный с частичным недожогом топлива может являться причиной накопления щелочей в материале печи.

4. Наилучшие значения параметров, характеризующих работу печного агрегата, имея общий характер, индивидуальны для различных печей. Таким образом, поддерживаемый технологический режим должен устанавливаться отдельно для каждой печи, а в универсальных методах управления необходимо использовать отклонения от заданного режима. Ряд технологических параметров не имеют численного представления, или их точное и оперативное измерение затруднено. Это доказывает необходимость представления параметров в нечётком виде. К таким параметрам относятся, например, уровень подъёма материала в зоне спекания, видимость в головке печи, преобладающий размер гранул клинкера на обресе печи, микроструктура клинкера, состояния технологических зон, фракционный состав материала после цепной завесы. Параметры необходимо разделить на группы, характеризующие какую-либо технологическую часть печи, что делает возможным применить положение декомпозиции для описания режима работы печи.

5. Предложен формат описания технологических параметров, включающий следующие элементы: название параметра, заданное значение параметра, множество значений параметра, множество термов, функция принадлежности, интервалы соответствия численных значений и термов. По представленному формату определены значения ряда параметров печи № 3 ОАО «Осколцемент»: температура отходящих газов, температура в зоне подогрева, нагрузка на главный привод печи, преобладающий размер гранул клинкера, видимость в головке печи, расход топлива, разряжение в пыльной камере, положение дросселя горелки, положение лопаток завихрителя горелки. Значения параметров были получены по результатам непрерывного анализа работы печи в течение двух месяцев. Были определены два вида функции принадлежности, наиболее точно учитывающие особенности параметров обжига.



### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА, ВЫРАЖЕННЫЕ В НЕЧЁТКОМ ВИДЕ

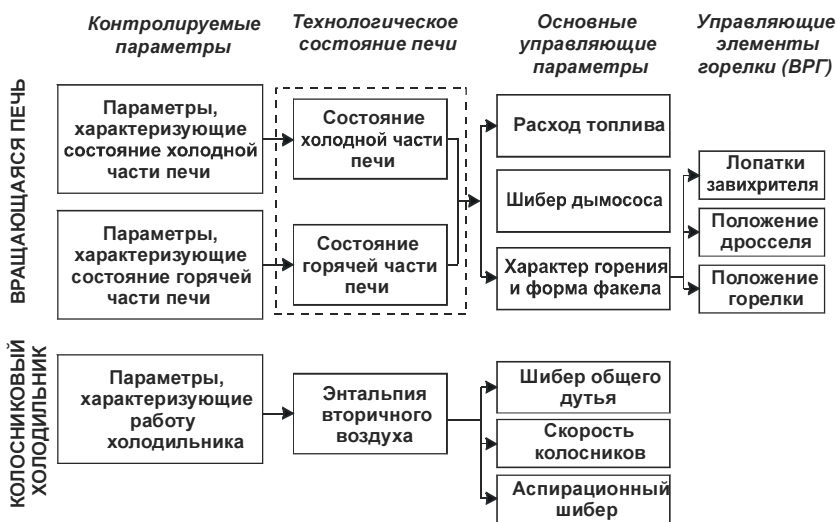
#### 3.1. СТРУКТУРА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА

На основе предложенных положений управления и рассмотренной структуры системы контроля разработана нечёткая модель цементной вращающейся печи. Основные особенности предлагаемой модели следующие.

В соответствии с положением декомпозиции печной агрегат разбивается на 2... 4 части:

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

Состояние каждой части характеризуется лингвистическими терминами и определяется по входным параметрам, имеющимся на печи. Исходя из установленного состояния, управляющими воздействиями производится перераспределение теплоты между ними или изменяется количество теплоты, подаваемой в печь (рис. 3.1).



**Рис. 3.1. Управление цементной вращающейся печью**

Параметры и состояние элементов печи описываются семью терминами, обозначения которых приведены в табл. 3.1. В дальнейшем для отдельных параметров (например, видимости в головке печи, лопаток завихрителя) применяются другие словесные обозначения терминов, более отвечающие данному параметру.

Таблица 3.1

### Описание параметров

Обозначение	Лингвистическая характеристика:	
	параметра	состояния частей печи
↓↓↓	Много ниже нормы	Сильно остыла
↓↓	Ниже нормы	Остыла
↓	Несколько ниже нормы	Несколько остыла
×	В норме	В норме
↑	Несколько выше нормы	Несколько перегрета
↑↑	Выше нормы	Перегрета
↑↑↑	Много выше нормы	Сильно перегрета

Оценка технологического состояния частей печи производится по значению параметров характеризующих объект управления. Так как печь обладает инерционностью и запаздыванием результатов воздействий, изменение параметров могут не соответствовать текущему состоянию зоны, поэтому в модели рассматривается скорее потенциальное состояние зон, а не фактическое.

Оценка состояния элементов и определение управляющих воздействий происходит с использованием нечёткой логики, согласно разработанным наборам продукционных правил (лингвистическим моделям). Данные множества правил являются, по сути, нечёткими технологическими зависимостями между параметрами, характеризующими процесс обжига. Преимущества нечёткой логики, кроме использования качественных параметров, заключаются также в том, что правила в лингвистических моделях не должны охватывать все возможные варианты, так как возможности теории нечётких множеств позволяют производить вывод в неизвестных ситуациях, основываясь на заданных правилах. Правила лингвистических моделей разрабатывались по результатам промышленных испытаний, анализа литературных данных, а так же исходя из практического опыта автора.

Были отдельно выделены множества значений входных параметров, определяющих невозможные состояния технологических частей печи. Появление таких множеств связано с неверной работой измерительных приборов. При получении невозможного состояния технологической зоны происходит оповещение и запрос нового набора данных.

Различные технологические линии могут иметь отличающиеся системы контроля. Возможные комбинации параметров, характеризующих ту или иную технологическую часть печи, обозначаются в тексте номерами наборов.

### 3.2. ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ХОЛОДНОЙ ЧАСТИ ПЕЧИ

Состояние холодной части печи может характеризоваться следующими наборами параметров (табл. 3.2). В табл. 3.2 точками обозначается присутствие параметра в рассматриваемом наборе.

Таблица 3.2

#### Наборы регулируемых параметров для холодной части печи

Регулируемые параметры	Номер набора				
	1	2	3	4	5
Температура отходящих газов, $t_{ог}$	•	•	•	•	•
Температура материала в зоне подогрева, $t_{зп}$	-	•	-	-	•
Количества гранул материала после цепной завесы, $D_m$	-	-	-	•	-
Влажность материала после цепей, $W_m$	-	-	•	-	•

Для каждого из представленных наборов параметров разработаны правила оценки состояния холодной части печи. При разработке правил учитывались известные зависимости между параметрами и режимом обжига.

Рассмотрим технологические зависимости для показанных наборов параметров и представим их в нечётком виде с помощью лингвистических правил.

#### Зависимость между температурой отходящих газов и состоянием холодной части печи (набор №1)

Правила, определяющие нечёткую зависимость между  $t_{ог}$  и состоянием холодной части печи, представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

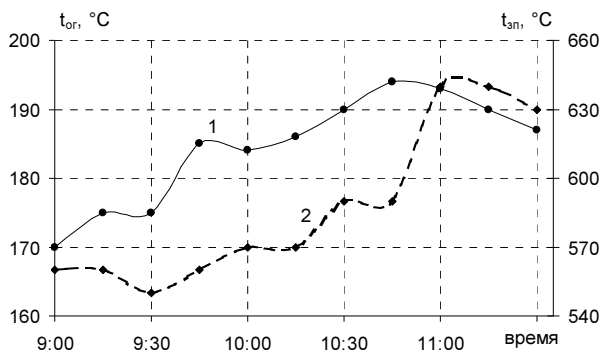
#### Оценка состояния холодной части печи по набору № 1

№ правила	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
1	↓	↓
2	↓↓	↓↓
3	↓↓↓	↓↓↓
4	×	×
5	↑	↑
6	↑↑	↑↑
7	↑↑↑	↑↑↑

Температура отходящих газов ( $t_{ог}$ ) показывает количество теплоты, поступающей в холодную часть печи. Этот параметр реагирует на внешние возмущения раньше остальных. Хотя увеличение или уменьшение температуры отходящих газов не всегда соответствует изменению теплового состояния холодной части печи, но она свидетельствует о потенциальной возможности такого изменения. Таким образом, между температурой отходящих газов и состоянием холодной части печи имеется прямая зависимость, то есть  $\Delta Q_{хч} \sim \Delta t_{ог}$ .

### **Зависимость между температурой отходящих газов, температурой в зоне подогрева и состоянием холодной части печи (набор №2)**

Температура материала в зоне подогрева ( $t_{зп}$ ) по сравнению с  $t_{ог}$  более инерционный параметр, его изменение свидетельствует о длительности происходящих процессов. Динамика изменения  $t_{зп}$  и  $t_{ог}$  представлена на рис. 3.2. Из представленного рис. видно, что существует прямая зависимость между этими параметрами. Но так как  $t_{зп}$  более инерционна она реагирует на изменение технологического состояния печи несколько позднее.



**Рис. 3.2. Изменение температуры материала в зоне подогрева  $t_{зп}$  (2) и температуры отходящих газов  $t_{ог}$  (1) по времени**

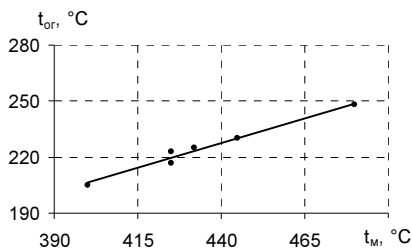
Приблизительно зависимость между температурой материала в зоне подогрева и  $t_{ог}$  для печи №2 размером 5×185 м ОАО "Осколцемент" показана на рис. 3.3. Температура материала измерялась термометром после отбора проб непосредственно из печи,  $t_{ог}$  фиксировалась по показанию термопары на головки печи.

Таким образом, между  $t_{ог}$ ,  $t_{зп}$  и состоянием холодной части печи существует следующие зависимости:

$$Q_{хч} = f(t_{ог}, t_{зп});$$

$$\Delta Q_{хч} \sim \Delta t_{ог};$$

$$\Delta Q_{хч} \sim \Delta t_{зп}.$$



**Рис. 3.3. Зависимость между температурой материала  $t_m$  в зоне подогрева и температурой отходящих газов  $t_{or}$**

Представление рассмотренных зависимостей в виде лингвистических правил показано в табл. 3.4.

*Таблица 3.4*

**Оценка состояния холодной части печи по набору № 2**

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{or}$	Температура материала в зоне подогрева $t_{зп}$	
1	↓	×	↓
2	↓↓	×	↓↓
3	↓	↓	↓↓
4	↓↓	↓	↓↓
5	↓↓	↓↓	↓↓↓
6	×	↓	×
7	×	↓↓	↓
8	↓	↓↓	↓↓
9	↓↓↓	↓↓	↓↓↓
10	↓↓↓	↓	↓↓↓
11	×	×	×
12	↑	×	↑
13	↑	↑	↑↑
14	↓	↑	×
15	↑↑	↑	↑↑
16	↑↑	↑↑	↑↑↑
17	×	↑↑	↑
18	×	↑	×
19	↑↑↑	↑	↑↑↑
20	↑↑↑	↑↑	↑↑↑
21	↑	↑↑	↑↑

### Зависимость между температурой отходящих газов, влажностью материала после цепей и состоянием холодной части печи (набор №3)

В общем виде зависимость влажности материала после цепей  $W_M$  от  $t_{ог}$  показана на рис. 3.4. Эта зависимость верна лишь для конкретной печи и не может быть перенесена на другие агрегаты. В то же время характер зависимости общий для всех печей. Влажность  $W_M$  по запаздыванию аналогична температуре материала в зоне подогрева и имеет ту же динамику изменения.

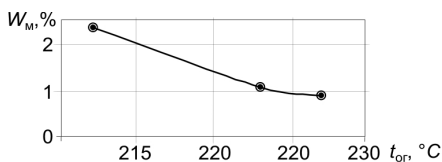


Рис. 3.4. Зависимость влажности материала после цепей  $W_M$  от температуры отходящих газов  $t_{ог}$  (АО «Воскресенскцемент», печь 3.6/4×118 м)

Между температурой отходящих газов, влажностью материала после цепей и состоянием холодной части печи имеет место следующая зависимость:

$$Q_{хч} = f(t_{ог}, W);$$

$$\Delta Q_{хч} \sim \Delta t_{ог};$$

$$\Delta Q_{хч} \sim -\Delta W.$$

Зависимости в виде лингвистических правил показана в табл. 3.5.

Таблица 3.5

#### Оценка состояния холодной части печи по набору № 3

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Влажность материала после цепей $W_M$	
1	↓	×	↓
2	↓↓	×	↓↓
3	↓	↑	↓↓
4	↓↓	↑	↓↓
5	↓↓	↑↑	↓↓↓
6	×	↑	×
7	↓	↑↑	↓↓
8	↓↓↓	↑↑	↓↓↓
9	↓↓↓	↑	↓↓↓
10	×	×	×
11	↑	×	↑
12	↑	↓	↑↑

Окончание табл. 3.5

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Влажность материала после цепей $W_m$	
13	↓	↓	×
14	↑↑	↓	↑↑
15	↑↑	↓↓	↑↑↑
16	×	↓↓	↑
17	×	↓	×
18	↑↑↑	↓	↑↑↑
19	↑↑↑	↓↓	↑↑↑
20	↑	↓↓	↑↑

### Оценка состояния холодной части печи с учётом грануляции материала и растекаемости сырьевого шлама (наборы № 4, 5)

Растекаемость определяет пластичные свойства шлама. При изменении этого параметра необходимо заблаговременно отрегулировать тягодутьевой режим, так как изменение растекаемости вызовет изменение теплового состояния зоны.

Грануляция после цепей ( $D_m$ ) является инерционным параметром, изменение грануляции происходит при длительном возмущении.

Зависимости в виде лингвистических правил для наборов параметров представлены в табл. 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6

### Оценка состояния холодной части печи по набору № 4

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Грануляция материала после цепей $D_m$	
1	↓	×	↓
2	↓↓	×	↓↓
3	↓	↑	↓
4	↓↓	×	↓↓
5	↓↓	↑	↓↓↓
6	×	↑	×
7	↓↓↓	×	↓↓↓
8	↓↓↓	↑	↓↓↓
9	×	×	×
10	↑	×	↑
11	↑	↓	↑↑
12	↓	↓	×
13	↑↑	↓	↑↑
14	↑↑	↓↓	↑↑↑

Окончание табл. 3.6

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Грануляция материала после цепей $D_m$	
15	✘	↓↓	↑
16	✘	↓	✘
17	↑↑↑	↓	↑↑↑
18	↑↑↑	↓↓	↑↑↑
19	↑	↓↓	↑↑

Таблица 3.7

**Оценка состояния холодной части печи по набору № 5**

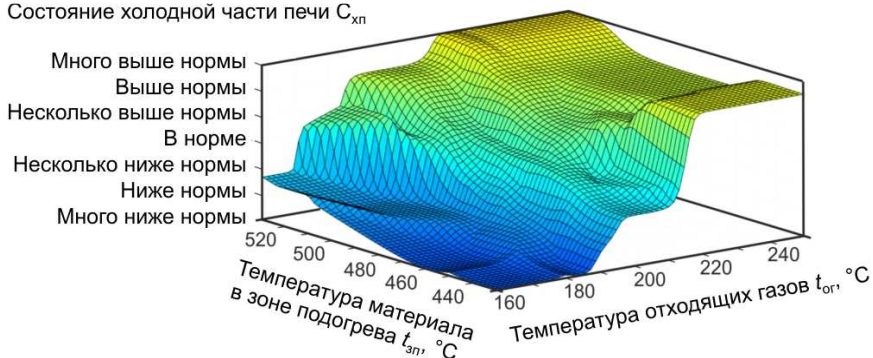
№ правила	Регулируемые параметры			Состояние холодной части печи $Q_{хч}$
	Температура отходящих газов $t_{ог}$	Температура материала в зоне подогрева $t_{зп}$	Влажность материала после цепей $W_m$	
1	↓	✘	✘	↓
2	↓↓	✘	✘	↓↓
3	↓	↓	↑	↓↓
4	↓↓	↓	↑	↓↓
5	↓↓	↓↓	↑	↓↓↓
6	↓	↓↓	↑↑	↓↓
7	↓↓↓	↓	↑	↓↓↓
8	↓↓↓	↓↓	↑↑	↓↓↓
9	✘	✘	✘	✘
10	↑	✘	✘	↑
11	↑	↑	↓	↑↑
12	↓	↑	↓	✘
13	↑↑	↑	↓	↑↑
14	↑↑	↑↑	↓↓	↑↑↑
15	✘	↑↑	↓	↑
16	✘	↑	↓	✘
17	↑↑↑	↑	↓	↑↑↑
18	↑↑↑	↑↑	↓↓	↑↑↑
19	↑	↑↑	↓	↑↑
Невозможные состояния технологической зоны				
20	↑↑	↑↑	↑↑	-
21	↓↓	↓↓	↓↓	-
22	↓↓↓	↓↓	↓↓	-
23	↑↑↑	↑↑	↑↑	-

Полученные правила подтверждаются данными промышленных испытаний вращающихся печей.



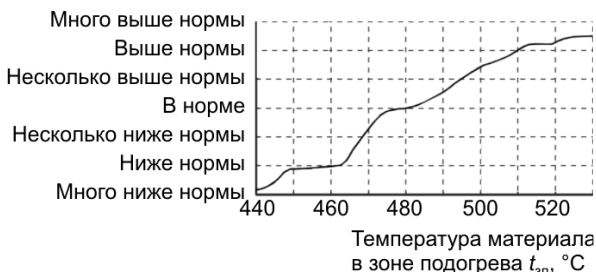
Для анализа разработанной нечёткой модели приведём визуализацию соответствующей поверхности нечёткого вывода в пространстве трёх измерений (рис. 3.5). Данная поверхность нечёткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений отдельных входных переменных нечёткой модели (рис. 3.6 и 3.7).

Состояние холодной части печи  $C_{хп}$



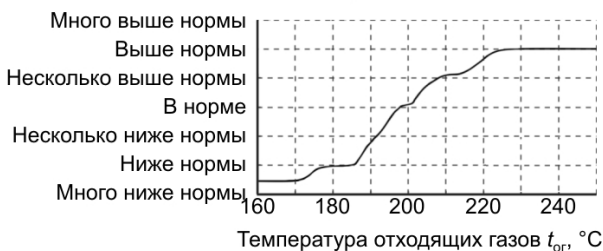
**Рис. 3.5. Поверхность вывода для нечеткой модели оценки состояния холодной части печи**

Состояние холодной части печи  $C_{хч}$



**Рис. 3.6. Зависимость выходной переменной (состояние холодной части печи) от входной переменной (температура в зоне подогрева)**

Состояние холодной части печи  $C_{хч}$



**Рис. 3.7. Зависимость выходной переменной (состояние холодной части печи) от входной переменной (температура отходящих газов)**

Если сравнить зависимости, полученные с помощью нечеткого вывода (рис. 3.5 - 3.7), с приведёнными выше детерминированными зависимостями (рис. 3.2, 3.3), можно сделать вывод, что нечёткие правила достаточно корректно описывают сложные взаимосвязи между параметрами объекта управления.

### 3.3. ОЦЕНКА ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ

Наборы параметров характеризующих состояние зоны декарбонизации, представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

#### Наборы регулируемых параметров для оценки зоны декарбонизации

Параметры	Наборы параметров		
	1	2	3
Температура в зоне декарбонизации, $t_{эд}$	•	-	•
Содержание технологического $CO_2$ в отходящих газах, $CO_2^p$	-	•	•

Получим нечёткое представление технологических зависимостей для показанных наборов параметров в виде лингвистических правил.

#### Зависимость состояния зоны декарбонизации от температуры материала в зоне (набор №1)

Температура в зоне декарбонизации характеризует степень подготовки материала и зависит от количества теплоты, поступающей в зону. Следовательно, между  $t_{эд}$  и состоянием зоны декарбонизации существует зависимость:

$$\Delta Q_{дек} \sim \Delta t_{эд}.$$

Данная зависимость с помощью лингвистических правил показана в табл. 3.9.

Таблица 3.9

#### Оценка состояния зоны декарбонизации по набору № 1

№ правила	Температура в зоне декарбонизации $t_{эд}$	Состояние зоны декарбонизации $Q_{дек}$
1	↓	↓
2	↓↓	↓↓
3	✘	✘
4	↑	↑
5	↑↑	↑↑

### Зависимость состояния зоны декарбонизации от содержания $\text{CO}_2$ в отходящих газах (набор №2)

Расчётный состав содержания углекислоты в отходящих газах  $\text{CO}_2^p$ , включающий газ, выделившийся из сырья, является наиболее точным показателем, характеризующим состояние зоны декарбонизации. По сравнению с  $t_{\text{эд}}$  этот параметр значительно раньше предоставляет информацию о состоянии в зоне. В общем виде зависимость между  $\text{CO}_2^p$  и  $Q_{\text{дек}}$  можно представить в виде:

$$\Delta Q_{\text{дек}} \sim - \Delta \text{CO}_2^p.$$

Лингвистические правила, соответствующие зависимости, приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

#### Оценка состояния зоны декарбонизации по набору № 2

№ правила	Содержание $\text{CO}_2$ в отходящих газах $\text{CO}_2^p$	Состояние зоны декарбонизации $Q_{\text{дек}}$
1	↓	↑
2	↓↓	↑↑
3	×	×
4	↑	↓
5	↑↑	↓↓

### Зависимость между температурой в зоне декарбонизации, содержанием $\text{CO}_2^p$ и состоянием в зоны декарбонизации (набор №3)

При определении зависимости для набора № 3 учитывались следующие особенности:

1.  $\text{CO}_2^p$  является наиболее точным параметром. В тоже время изменение  $\text{CO}_2^p$  может происходить по ряду причин, не связанных с общим состоянием зоны декарбонизации. Так, при увеличении расхода топлива в течение некоторого времени (3-7 мин.) резко увеличивается  $\text{CO}_2^p$  вследствие большего поступления теплоты в зону, но такое же повышение происходит при увеличении слоя материала и понижении температуры в зоне декарбонизации. Такой скачок  $\text{CO}_2^p$  показан на рис. 3.8.

2. Температура в зоне декарбонизации медленнее реагирует на изменение состояния зоны по сравнению с  $\text{CO}_2^p$ . Карман термопары, регистрирующей  $t_{\text{дек}}$ , может кратковременно забиваться материалом, что делает показания прибора не всегда достоверными.

Динамика изменения  $\text{CO}_2^p$  и  $t_{\text{эд}}$  показана на рис. 3.8.

В общем виде состояние зоны декарбонизации определяется в виде:

$$Q_{\text{дек}} = f(\text{CO}_2^{\text{p}}, t_{\text{зд}})$$

Лингвистические правила, показывающие зависимость, приведены в табл. 3.11.

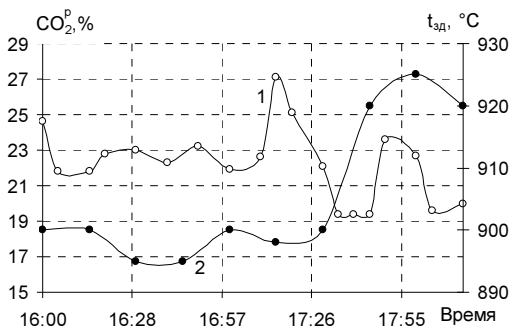


Рис. 3.8. Изменение CO<sub>2</sub><sup>p</sup> (1) и t<sub>зд</sub> (2) по времени

Таблица 3.11

Оценки состояния зоны декарбонизации по набору № 3

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние зоны декарбонизации Q <sub>дек</sub>
	Температура в зоне декарбонизации t <sub>зд</sub>	Содержание CO <sub>2</sub> в отходящих газах CO <sub>2</sub> <sup>p</sup>	
1	↓	×	×
2	↓↓	×	↓
3	↓	↑	↓
4	↓↓	↑↑	↓↓
5	×	↑↑	×
6	×	↑	↓
7	↓	↑↑	↓↓
8	×	×	×
9	↑	×	×
10	↑	↓	↑
11	↓	↓	×
12	↑↑	↓	↑
13	×	↓↓	↑
14	×	↓	↑
15	↑↑	↓↓	↑↑
16	↑	↓↓	↑↑

Все представленные правила, характеризующие зависимости между состоянием зоны декарбонизации и параметрами, подтверждаются теплотехническими испытаниями печей.

### 3.4. ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИ ПЕЧИ

Возможные наборы параметров, характеризующих состояние горячей части печи, представлены в табл. 3.12. Приведены наборы, наиболее характерные для печей отечественных заводов.

Таблица 3.12

#### Наборы регулируемых параметров для горячей части печи

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 подъёма материала, $H_m$	-	-	-	-	-	•	•

Рассмотрим зависимости и правила для представленных наборов параметров.

#### Зависимость состояния горячей части печи от видимости в головке печи и нагрузки на главный привод электродвигателя печи (набор №1)

Увеличение температуры материала в зоне спекания приводит к возрастанию силы сцепления материала с огнеупором, что в свою очередь ведёт к увеличению нагрузки на главный привод вращающейся печи  $A_{гп}$ . Таким образом,  $A_{гп}$  косвенно характеризует температурный режим в зоне спекания. Зависимость силы сцепления от температуры приводится на рис. 3.9 [114].

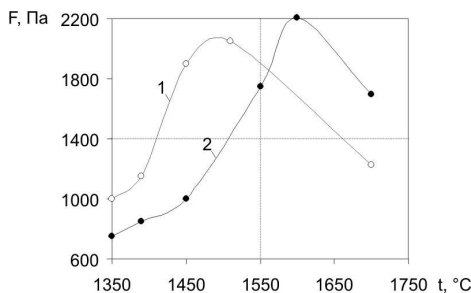


Рис. 3.9. Изменение удельной силы сцепления клинкеров разного состава с огнеупором  $F$  в зависимости от температуры:

1 – шлам Старооскольского цементного завода; 2 – шлам Белгородского цементного завода

Видимость в головке печи  $E_k$  – субъективный параметр, оцениваемый машинистом печи из личного опыта. Он определяется визуально на горячем обресе печи, поэтому этот параметр меняет своё значение позже  $A_{гп}$  и свидетельствует о длительности возмущения.

Между  $A_{гп}$ ,  $E_k$  и состоянием горячей части печи имеет место следующая зависимость:

$$Q_{гч} = f(A_{гп}, E_k); \Delta Q_{гч} \sim \Delta A_{гп}; \Delta Q_{гч} \leftrightarrow \Delta E_k,$$

где « $\leftrightarrow$ » обозначает зависимость между параметрами, которая не может быть выражена числоно.

Лингвистические правила показывающие эту зависимость представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

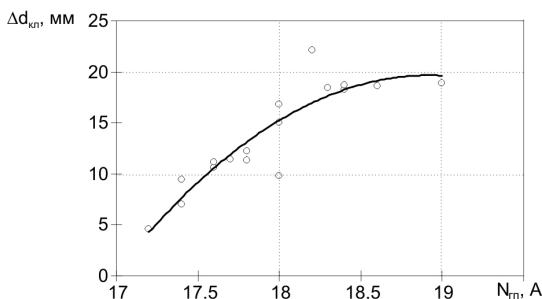
**Оценка состояния горячей части печи по набору № 1**

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Нагрузка на главный привод $A_{гп}$	Видимость в головке печи $E_k$	
1	↓	×	↓
2	↓		↓
3	↓↓		↓↓
4	↓	↓↓	↓↓
5	↓↓	×	↓
6	×	↓↓	↓↓
7	↓↓	↓↓	↓↓↓
8	×	×	×
9	↑	×	↑
10	↑	↑	↑
11	↑↑	↑	↑↑↑
12	↑	↑↑	↑↑
13	×	↑↑	↑↑
14	↑↑	↑↑	↑↑↑
15	↑↑	×	↑
Невозможные состояния технологической зоны			
16	↓↓	↑↑	-
17	↑↑	↓↓	-

**Зависимость состояния горячей части печи от нагрузки на главный привод и преобладающего размера гранул клинкера (набор №2)**

Размер клинкерных гранул прямо зависит от температурного режима в зоне спекания, что подтверждается рядом исследователей [1, 6, 81, 110]. В этих работах была выявлена зависимость между расчётной температурой в зоне спекания и гранулометрическим составом клинкера. Зависимость представляет собой кривую с ярко выраженным макси-

мумом, то есть при значительном увеличении теплопередачи в горячей части печи происходит клинкерное пыление. На рис. 3.10 представлена взаимосвязь между размерами гранул клинкера и нагрузкой на привод электродвигателя для печи № 3 АО «Осколцемент».



**Рис. 3.10. Взаимосвязь среднего размера гранул клинкера  $\delta D_{кл}$  и нагрузки на главный привод электродвигателя  $A_{гп}$**

В настоящее время не существует достаточно надёжного экспресс метода определения среднего гранулометрического состава клинкера, поэтому в лингвистической модели определяется преимущественный размер гранул клинкера по визуальной оценке. Анализируемую зависимость можно представить в следующем виде:

$$Q_{гч} = f(A_{гп}, D_{кл}).$$

Для низких и средних значений  $Q_{гч}$ , справедливо отношение  $\Delta Q_{гч} \sim -\Delta D_{кл}$ , а для для максимальных значений  $Q_{гч}$   $\Delta Q_{гч} \sim (-\Delta D_{кл})$ .

Зависимость в виде лингвистических правил показана в табл. 3.14.

Таблица 3.14

**Оценка состояния горячей части печи по набору № 2**

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Нагрузка на главный привод $A_{гп}$	Преобладающий размер гранул клинкера $D_{кл}$	
1	↓	×	↓
2	↓	↓	↓
3	×	↓	×
4	×	↓↓	↓↓
5	↓↓	×	↓↓
6	↓↓	↓	↓↓
7	↓↓	↓↓	↓↓↓
8	↓	↓↓	↓↓
9	×	×	×

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Нагрузка на главный привод $A_{гп}$	Преобладающий размер гранул клинкера $D_{кл}$	
10	↑	✗	↑
11	↑	↑	↑
12	✗	↑	✗
13	↑↑	✗	↑↑
14	↑↑	↑	↑↑
15	↑↑	↓↓	↑↑↑
16	↑↑	↑↑	↑↑↑
17	↑	↑↑	↑↑

### Зависимость состояния горячей части печи от нагрузки на главный привод печи и температуры в зоне декарбонизации (набор № 3)

Температура материала в зоне декарбонизации  $t_{зд}$  печи позволяет оценивать степень подготовки материала перед зоной спекания. Изменение  $t_{зд}$  и  $A_{гп}$  в ситуации, когда горячая часть печи постепенно выходит из нормального режима работы, показано на рис. 3.11.

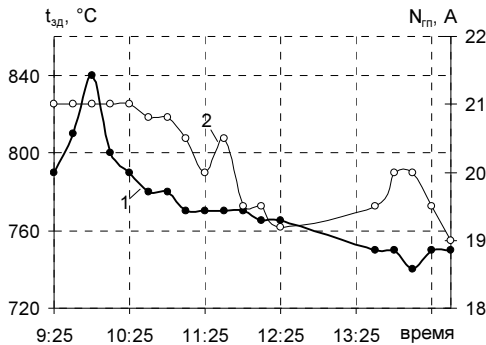


Рис. 3.11. Динамика изменения  $t_{зд}$  (1) и  $A_{гп}$  (2) на печи №5 ОАО «Осколцемент»

Приблизительная зависимость между  $t_{зд}$  и  $A_{гп}$  для печи №5 Старооскольского цементного завода показана на рис. 3.12. Она может быть выражена в следующем виде:

$$Q_{гч} = f(A_{гп}, t_{зд}),$$

где  $\Delta Q_{гч} \sim \Delta t_{зд}$ .

Зависимость описывается множеством лингвистических правил, представленных в табл. 3.15.



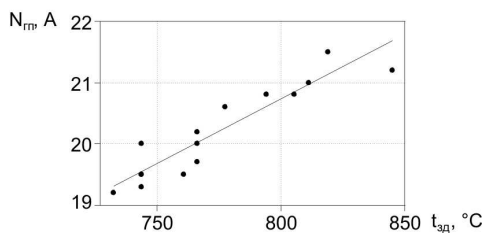


Рис. 3.12. Зависимость между  $t_{зд}$  и  $A_{гр}$  для печи ОАО «Осколцемент»

Таблица 3.15

Оценка состояния горячей части печи по набору № 3

№ правила	Регулируемые параметры		Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Нагрузка на главный привод $A_{гр}$	Температура в зоне декарбонизации $t_{зд}$	
1	↓	×	↓
2	↓	↓	↓↓
3	↓↓	↓	↓↓↓
4	↓	↑	↑
5	↓↓	↓	↓↓↓
6	↓↓	↓↓	↓↓↓
7	×	↓	↓
8	↓↓	×	↓↓
9	↓	↓↓	↓↓
10	×	×	×
11	↑	×	↑
12	↑	↑	↑↑
13	↑↑	↑	↑↑↑
14	↑	↓	↓
15	↑↑	↑↑	↑↑↑
16	×	↑	↑
17	↑↑	×	↑↑
18	↑	↑↑	↑↑

Зависимость между состоянием горячей части печи и параметрами из наборов № 4 – 7

Данные наборы дают более полную картину технологической ситуации в горячей части печи. Виды зависимостей параметров аналогичны показанным выше. Они могут быть представлены в виде:

$$Q_{гч} = f(N_n),$$

где  $N_n$  – заданный набор параметров.

Лингвистические правила для наборов приведены в табл. 3.16-3.19.

Таблица 3.16

## Оценка состояния горячей части печи по набору № 4

№ пра- вила	Регулируемые параметры			Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Преобладающий размер гранул клинкера $D_{кл}$	Нагрузка на главный при- вод $A_{гп}$	Температура в зоне декарбо- низации $t_{зд}$	
1	✗	↓	↓	↓
2	↓	↓	✗	↓
3	↓	↓	↓↓	↓↓
4	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓↓
5	✗	✗	✗	✗
6	✗	↑	↑	↑
7	↑	↑	✗	↑
8	↑	↑	↑	↑↑
9	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
10	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
11	↓	↑↑	↑↑	↑↑↑

Таблица 3.17

## Оценка состояния горячей части печи по набору № 5

№ пра- вила	Регулируемые параметры			Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Преобладающий размер гранул клинкера $D_{кл}$	Уровень подъёма ма- териала $H_m$	Температура в зоне декарбо- низации $t_{зд}$	
1	✗	↓	↓	↓
2	↓	↓	✗	↓
3	↓	↓	↓↓	↓↓
4	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓↓
5	✗	✗	✗	✗
6	✗	↑	↑	↑
7	↑	↑	✗	↑
8	↑	↑	↑	↑↑
9	↑↑	↑	↑↑	↑↑
10	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
11	↓	↑↑	↑↑	↑↑↑

Таблица 3.18

## Оценка состояния горячей части печи по набору № 6

№ пра- вила	Регулируемые параметры			Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Видимость в головке печи $E_k$	Уровень подъёма ма- териала $H_m$	Температура в зоне декарбони- зации $t_{зд}$	
1	✗	↓	↓	↓
2	↓	↓	✗	↓

Окончание табл. 3.18

№ пра- вила	Регулируемые параметры			Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Видимость в головке печи $E_k$	Уровень подъёма ма- териала $H_m$	Температура в зоне декарбони- зации $t_{эд}$	
3	↓	↓	↓↓	↓↓
4	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓↓
5	✗	✗	✗	✗
6	✗	↑	↑	↑
7	↑	↑	✗	↑
8	↑	↑	↑	↑↑
9	↑↑	↑	↑↑	↑↑
10	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
11	↓	↑↑	↑↑	↑↑↑

Таблица 3.19

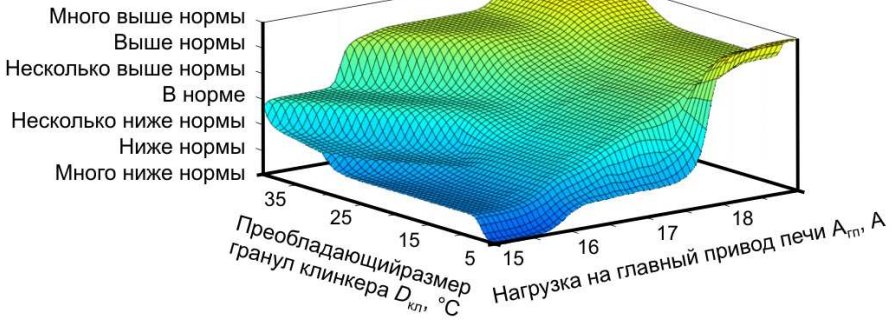
**Оценка состояния горячей части печи по набору № 7**

№ пра- вила	Регулируемые параметры			Состояние горячей части печи $Q_{гч}$
	Видимость в головке печи $E_k$	Уровень подъёма ма- териала $H_m$	Преобладающий размер гранул клинкера $D_{кл}$	
1	✗	↓	↓	↓
2	↓	↓	✗	↓
3	↓	↓	↓↓	↓↓
4	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓↓
5	✗	✗	✗	✗
6	✗	↑	↑	↑
7	↑	↑	✗	↑
8	↑	↑	↑	↑↑
9	↑↑	↑	↑↑	↑↑
10	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
11	↓	↑↑	↑↑	↑↑↑

Для оценки достоверности приведённых положений рассмотрим нечёткую модель, где входными параметрами являются нагрузка на главный привод печи и средний размер гранул клинкера. Визуализация поверхности нечеткого вывода для этой модели приводится на рис. 3.13.

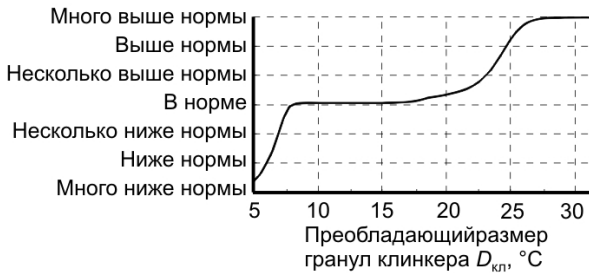
Зависимость значений выходной переменной от значений отдельных входных переменных нечёткой модели представлена на рис. 3.14 и 3.15.

Состояние горячей части печи  $C_{гч}$



**Рис. 3.13. Поверхность вывода для нечёткой модели оценки состояния горячей части печи**

Состояние горячей части печи  $C_{гч}$



**Рис. 3.14. Зависимость выходной переменной (состояние горячей части печи) от входной переменной (нагрузка на главный привод печи)**

Состояние горячей части печи  $C_{гч}$



**Рис. 3.15. Зависимость выходной переменной (состояние горячей части печи) от входной переменной (средний размер гранул клинкера)**

Сопоставление графиков, характеризующих реальное поведение параметров (рис. 3.11, 3.12) и графиков зависимостей полученных с помощью нечёткого вывода (рис. 3.13 - 3.15) показывает, что нечёткие правила достаточно корректно описывают процессы протекающие в печи.

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДЛЯ ТЕКУЩЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИТУАЦИИ

Согласно предложенному положению декомпозиции, управление печью состоит в перераспределении теплоты между её частями (зонами). Это осуществляется изменением скорости движения газов в печи, что приводит к изменению теплопередачи между газами и материалом, и изменением режима горения топлива, который определяет количество подаваемой в печь теплоты и долю передаваемой материалу теплоты в горячей части печи.

Возможные наборы регулирующих параметров, характерные для отечественных заводов, представлены в табл. 3.20.

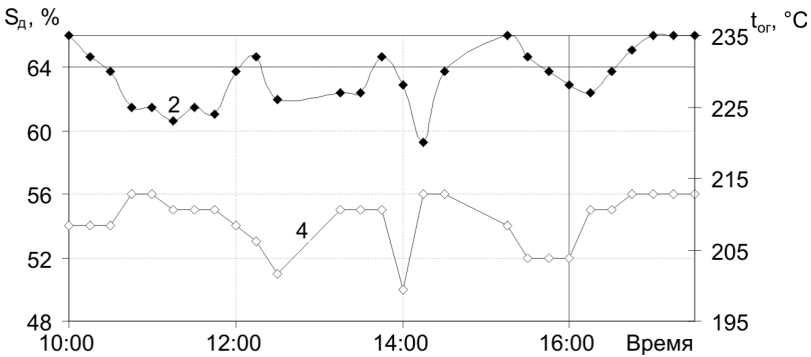
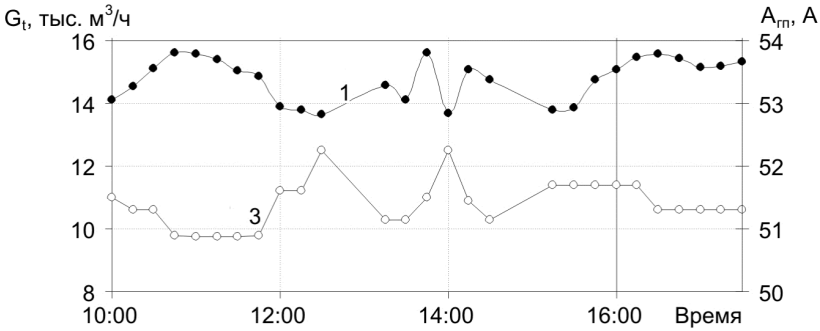
Таблица 3.20

#### Наборы регулирующих параметров

Параметры	Наборы параметров	
	1	2
Расход топлива, $G_t$	•	•
Разряжение в пыльной камере, $P_{пк}$ / Шиббер дымососа, $S_d$	•	•
Характер горения и профиль факела, $X_f$	–	•

Значение регулирующих параметров определяются по вектору состояний печи, представленному в нечётком виде. Параметр *характер горения и профиль факела* не имеет численного представления, его значения определяются возможностями управляющих элементов форсунки (положением дросселя и завихрителя, положением форсунки относительно материала и другие имеющиеся управляющие элементы). Такой подход позволяет не зависеть от вида используемой на печи форсунки. Подробнее расчёт положений управляющих элементов форсунки будет рассмотрен в гл. 3.8.

На рис. 3.16 представлено изменение регулируемых параметров в зависимости от значений регулирующих для печи № 2 АО «Осколцемент». Проведём анализ зависимостей, показанных на рис. 3.16. Будем считать, что температура отходящих газов характеризует состояние холодной части печи, а нагрузка на главный привод – состояние горячей части печи. Тогда можно сделать вывод: процент открытия шибера дымососа наибольшее влияние имеет на  $Q_{хч}$ , а расход топлива – на  $Q_{гч}$ .



**Рис. 3.16. Изменение нагрузки на главный привод  $A_{гп}$  (1) и температуры отходящих газов  $t_{ог}$  (2) в зависимости от значений расхода топлива  $G_t$  (3) и процента открытия шиберы дымососа  $S_d$  (4)**

Значительное возмущение в любой части печи компенсируется расходом топлива и возможно, дополнительно, открытием шиберы дымососа. Таким образом, между состояниями технологических частей печи и значениями регулирующих параметров имеются следующие зависимости:

$$B = f(Q_{хч}, Q_{гч}),$$

где  $B$  – значение регулирующего параметра, причём  $\Delta B \sim \Delta Q_{хч}$  и  $\Delta B \sim \Delta Q_{гч}$ .

Полные множества лингвистических правил, описывающие показанные зависимости для каждого из наборов регулируемых параметров представлены в табл. 3.21 – 3.22.

Представленные лингвистические правила полностью подтверждаются на практике.

Таблица 3.21

## Множество лингвистических правил для набора №1

Группы ситуаций	№ правила	Состояние печи		Необходимые действия	
		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$	Состояние горячей части печи $Q_{гч}$	Расход топлива $G_t$	Процент открытия шиберы дымохода $S_d$ / Разрежение в пыльной камере $P_{пк}$
↓/↓	1	↓	↓	↑↑	✗
	2	↓	↓↓	↑↑↑	↑
	3	↓	↓↓↓	Режим "тихого хода"	
	4	↓↓	↓	↑↑	↑
	5	↓↓	↓↓	↑↑↑	↑↑
	6	↓↓	↓↓↓	Режим "тихого хода"	
	7	↓↓↓	↓	↑↑	↑↑
	8	↓↓↓	↓↓	Режим "тихого хода"	
	9	↓↓↓	↓↓↓	Режим "тихого хода"	
↓/↑	10	↓	↑	✗	↑
	11	↓↓	↑	✗	↑↑
	12	↓↓↓	↑	↑	↑↑↑
	13	↓	↑↑	↓	↑
	14	↓↓	↑↑	↓	↑↑
	15	↓↓↓	↑↑	✗	↑↑↑
	16	↓	↑↑↑	↓↓	↑
	17	↓↓	↑↑↑	↓↓	↑↑
	18	↓↓↓	↑↑↑	↓	↑↑↑
✗/↓	19	✗	↓	↑	✗
	20	✗	↓↓	↑↑	✗
	21	✗	↓↓↓	↑↑↑	✗
✗/✗	22	✗	✗	✗	✗
✗/↑	23	✗	↑	↓	✗
	24	✗	↑↑	↓↓	✗
	25	✗	↑↑↑	↓↓↓	✗
↑/↓	26	↑	↓	✗	↓
	27	↑↑	↓	✗	↓↓
	28	↑↑↑	↓	↓	↓↓↓
	29	↑	↓↓	↑	↓
	30	↑↑	↓↓	↑	↓↓
	31	↑↑↑	↓↓	✗	↓↓↓
	32	↑	↓↓↓	↑↑↑	↓
	33	↑↑	↓↓↓	↑↑	↓↓
	34	↑↑↑	↓↓↓	↑↑	↓↓↓

Окончание табл. 3.21

Группы ситуаций	№ правила	Состояние печи		Необходимые действия		
		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$	Состояние горячей части печи $Q_{гч}$	Расход топлива $G_t$	Процент открытия шиберы дымососа $S_d$ / Разрежение в пыльной камере $P_{пк}$	
↓/×	35	↓	×	×	↑	
	36	↓↓	×	↑	↑↑	
	37	↓↓↓	×	↑↑	↑↑↑	
↑/×	38	↑	×	×	↓	
	39	↑↑	×	×	↓↓	
	40	↑↑↑	×	↓	↓↓↓	
↑/↑	41	↑	↑	↓	×	
	42	↑	↑↑	↓↓	×	
	43	↑	↑↑↑	↓↓↓	×	
	44	↑↑	↑	↓↓	↓↓	
	45	↑↑	↑↑	↓↓↓	↓↓	
	46	↑↑	↑↑↑	Режим "тихого хода"		
	47	↑↑↑	↑	↓↓	↓↓↓	
	48	↑↑↑	↑↑	Режим "тихого хода"		
	49	↑↑↑	↑↑↑	Режим "тихого хода"		

Таблица 3.22

**Множество лингвистических правил для набора №2**

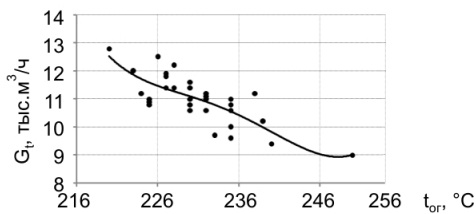
Группы ситуаций	№ правила	Состояние печи		Необходимые действия		
		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$	Состояние горячей части печи $Q_{гч}$	Расход топлива $G_t$	Характер горения и профиль факела $X_f$	Процент открытия шиберы дымососа / Разрежение в пыльной камере
↓/↓	1	↓	↓	↑	↑	↑
	2	↓	↓↓	↑	↑↑	↑
	3	↓	↓↓↓	↑↑	↑↑	↑
	4	↓↓	↓	↑	↑	↑↑
	5	↓↓	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑↑
	6	↓↓	↓↓↓	Режим "тихого хода"		
	7	↓↓↓	↓	↑↑	×	↑↑
	8	↓↓↓	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑
	9	↓↓↓	↓↓↓	Режим "тихого хода"		



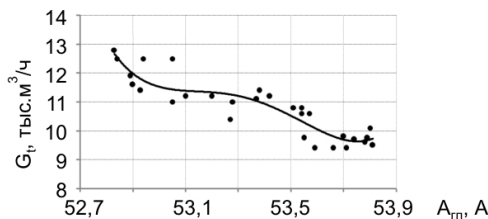
Окончание табл. 3.22

Группы ситуаций	№ правила	Состояние печи		Необходимые действия		
		Состояние холодной части печи $Q_{хч}$	Состояние горячей части печи $Q_{гч}$	Расход топлива $G_t$	Характер горения и профиль факела $X_f$	Процент открытия шиберы дымохода / Разрежение в пыльной камере
↓/↑	10	↓	↑	×	×	↑
	11	↓↓	↑	×	↓	↑↑
	12	↓↓↓	↑	↑	↓	↑↑
	13	↓	↑↑	↓	↓	↑
	14	↓↓	↑↑	↓	↓	↑↑
	15	↓↓↓	↑↑	×	↓↓	↑↑
	16	↓	↑↑↑	↓↓	↓↓	↑
	17	↓↓	↑↑↑	↓↓	↓↓	↑↑
	18	↓↓↓	↑↑↑	↓	↓	↑↑↑
×/↓	19	×	↓	×	↑	×
	20	×	↓↓	↑	↑↑	×
	21	×	↓↓↓	↑↑	↑↑	×
×/×	22	×	×	×	×	×
×/↑	23	×	↑	↓	×	×
	24	×	↑↑	↓	↓	×
	25	×	↑↑↑	↓↓	↓↓	×
↑/↓	26	↑	↓	×	×	↓
	27	↑↑	↓	×	×	↓↓
	28	↑↑↑	↓	↓	↑	↓↓↓
	29	↑	↓↓	↑	↑	↓
	30	↑↑	↓↓	×	↑↑	↓↓
	31	↑↑↑	↓↓	×	↑↑	↓↓↓
	32	↑	↓↓↓	↑↑	↑↑	↓
	33	↑↑	↓↓↓	↑↑	↑↑	↓↓
	34	↑↑↑	↓↓↓	↑↑	↑↑	↓↓↓
↓/×	35	↓	×	×	×	↑
	36	↓↓	×	×	↑	↑↑
	37	↓↓↓	×	↑	↑↑	↑↑↑
↑/×	38	↑	×	×	×	↓
	39	↑↑	×	×	↓	↓↓
	40	↑↑↑	×	↓	↓↓	↓↓↓
↑/↑	41	↑	↑	↓	×	×
	42	↑	↑↑	↓	↓	↓
	43	↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	×
	44	↑↑	↑	↓	↓	↓↓
	45	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓
	46	↑↑	↑↑↑	Режим "тихого хода"		
	47	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓
	48	↑↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓↓
	49	↑↑↑	↑↑↑	Режим "тихого хода"		

Для анализа адекватности предложенную нечёткую модель можно представить с помощью визуализации поверхности нечёткого вывода. С помощью зависимостей, представленных на рис. 3.16, построены детерминированные зависимости для расхода топлива (рис. 3.17 и 3.18 ).

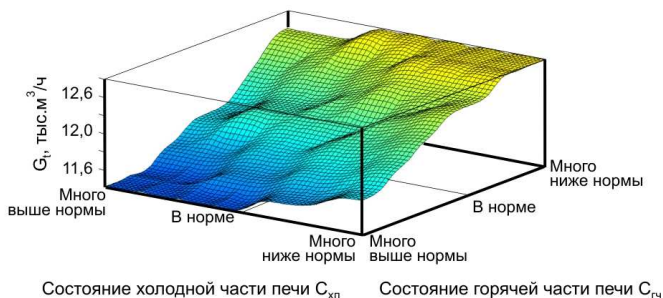


**Рис. 3.17. Зависимость расхода топлива  $G_t$  от температуры отходящих газов  $t_{or}$**

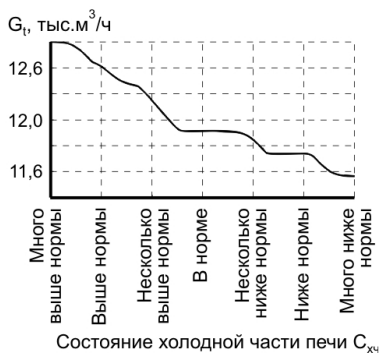


**Рис. 3.18. Зависимость расхода топлива  $G_t$  от изменения нагрузки на главный привод  $A_{гп}$**

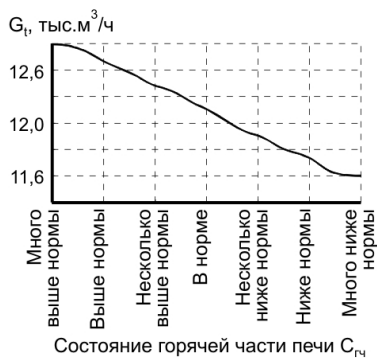
Нечёткую модель зависимости расхода топлива от тепловых состояний частей печи можно представить с помощью визуализации поверхности нечёткого вывода, которая приводится на рис. 3.19, а зависимость разряжения в пыльной камере от состояния частей печи – на рис. 3.22. Для поверхности нечёткого вывода можно получить двумерные зависимости между тепловыми состояниями технологических частей печи и регулирующими параметрами (рис. 3.20, 3.21, 3.23, 3.24).



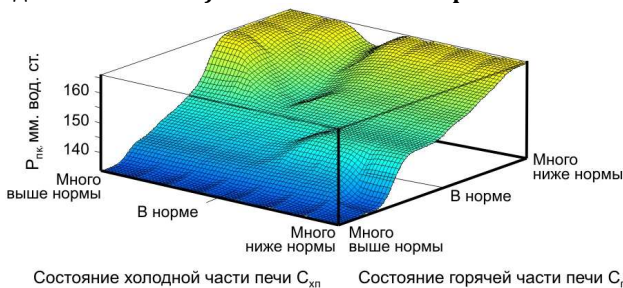
**Рис. 3.19. Поверхность вывода для нечеткой модели определения расхода топлива по тепловому состоянию частей печи**



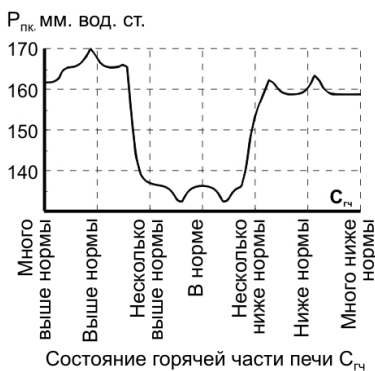
**Рис. 3.20. Зависимость выходной переменной (расход топлива) от входной переменной (состояние холодной части печи)**



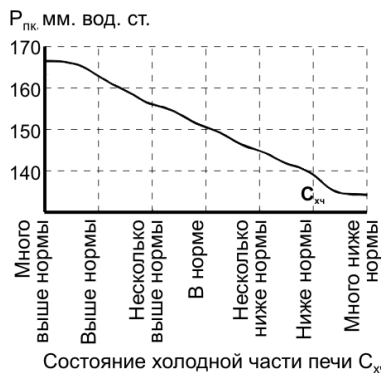
**Рис. 3.21. Зависимость выходной переменной (расход топлива) от входной переменной (состояние горячей части печи)**



**Рис. 3.22. Поверхность вывода для нечеткой модели определения необходимого разреза в пыльной камере по тепловому состоянию частей печи**



**Рис. 3.23. Зависимость выходной переменной (разрежения в пыльной камере) от входной переменной (состояние горячей части печи)**



**Рис. 3.24. Зависимость выходной переменной (разрежения в пыльной камере) от входной переменной (состояние холодной части печи)**

На примере расхода топлива видно, что у графиков на рис. 3.17 и 3.20, а так же у графиков на рис. 3.18 и 3.21 имеется одинаковый характер зависимостей. Таким образом показано, что нечёткая модель соответствует реальному объекту управления.

### 3.6. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Получены зависимости между технологическими параметрами режима обжига, выраженные в нечётком виде – множестве лингвистических правил. Нечёткие зависимости лишены недостатков, свойственных их детерминированным аналогам и могут быть использованы для определения необходимого режима обжига.

Между состоянием холодной части печи и параметрами, характеризующими её существуют зависимости следующего вида: температура отходящих газов – прямая; температура в зоне подогрева – прямая; влажность материала после цепей – обратная; количество гранул материала после цепной завесы – прямая.

Вид зависимостей для состояния зоны декарбонизации и характеризующих параметров следующий: температура в зоне декарбонизации – прямая; содержание технологического  $\text{CO}_2$  в отходящих газах – обратная.

Между состоянием горячей части печи и регулируемыми 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 подъёма материала в печи – прямая.

2. Значение технологического режима обжига регулируется четырьмя параметрами: расход топлива, процент открытия шиберы дымохода (разряжение в пыльной камере), характер горения топлива и профиль факела и теплота вторичного воздуха.

3. Получена структура модели управления процессом обжига, состоящая из двух этапов: определение технологического состояния частей (зон) печи и нахождение управляющих воздействий по вектору состояний этих частей. Структура определения необходимых значений регулирующих параметров построена на основе положения декомпозиции, то есть перераспределения теплоты между технологическими частями печного агрегата.

4. Определены возможные наборы параметров, множество лингвистических правил составлены для каждого из наборов. Все полученные нечёткие зависимости подтверждены результатами промышленных испытаний и лабораторных опытов.

## 4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

### 4.1. СИСТЕМА НЕЧЁТКОГО ВЫВОДА С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРЕДЛАГАЕМОГО АЛГОРИТМА

Ранее была рассмотрена методика дуального нечёткого управления теплотехнологическим режимом работы вращающейся печи, состоящая из двух этапов: оценка вектора состояния технологических зон печи и нахождение требуемых воздействий по состоянию этих зон с помощью алгоритма нечёткого вывода

Для реализации нечёткого вывода, были применены алгоритм Мамдани и алгоритм Ларсена, позволяющие использовать предложенную базу продукционных правил. Алгоритмы Цукомото, Сугено и упрощённый алгоритм нечёткого вывода не могут быть применены в данных условиях, потому что на этапе активизации или на этапе построения продукционной системы в них используется чёткое значение переменной. Вычисление такого чёткого значения при нахождение вектора теплового состояния технологических частей печи не возможно, так как эти переменные не имеют численного представления. Характерным достоинством нечётких модели типа Мамдани и Ларсена является их понятность и интерпретируемость [177–179].

Алгоритм нечёткого вывода производится по процедуре «фазификация - агрегирование – активизация – аккумуляция - дефазификация» [126, 180].

Даная процедура была реализована с помощью следующих последовательных операций:

1. Фазификация [85] – перевод детерминированного значения входных параметров в нечёткий вид  $X_1, X_2$ , и т. д.

2. Агрегирование – определение степени истинности условий по каждому из правил продукционной системы:

$$T(A \cap B) = \min \{T(A) ; T(B)\},$$

где  $A$  и  $B$  - элементарные высказывания правил нечёткой продукции.

3. Активизация – нахождение степени истинности каждого из логических высказываний (подзаключений).

Алгоритм Мамдани реализует активизацию с помощью следующего метода нечёткой композиции:

$$\mu_i(y) = \min \{c_i ; \mu_i(x)\},$$

где  $\mu_i(y)$  – активизированная функция принадлежности;  $c_i$  – степень истинности  $i$ -го нечёткого высказывания;  $\mu_i(x)$  – функция принадлежности термина лингвистической переменной.

Для алгоритма Ларсена активизация производится по следующей формуле:

$$\mu_i(y) = c_i \cdot \mu_i(x).$$

4. Аккумуляция – нахождение функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных.

Результат аккумуляции объединение функций принадлежности всех подзаключений:

$$\forall x \in X \mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x); \mu_B(x) \},$$

где  $\mu_A(x); \mu_B(x)$  – функции принадлежности нечётких множеств А и В.

5. Дефаззификация – переход к детерминированному значению.

Интерпретация полученной функции принадлежности выходного параметра производится методом определения "центра тяжести" [124] по формуле:

$$y' = \frac{\int_{X_{\min}}^{X_{\max}} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{X_{\min}}^{X_{\max}} \mu(x) dx},$$

где  $y'$  – численное значение выходного параметра ;  $[x_{\min}; x_{\max}]$  – носитель нечёткого множества выходной лингвистической переменной.

Выходные параметры определяются по представленной схеме, а затем происходит контроль полученных значений и дополнение нечёткой модели детерминированными зависимостями.

Для нечёткого вывода выбраны алгоритмы Мамдани и Ларсена так как решается задача извлечения знаний из данных (в виде лингвистических правил). Другими словами, выбор вывода определяется структурой используемой базы продукционных правил, так как результат вывода теплового состояния технологической части печи не имеет численного выражения.

Пример нечёткого вывода приводится на рис. 4.1.

В примере рассмотрен упрощённый вариант, когда печь разделяется на 2 технологические части. Каждую из частей печи характеризует по 2 управляемых параметра.

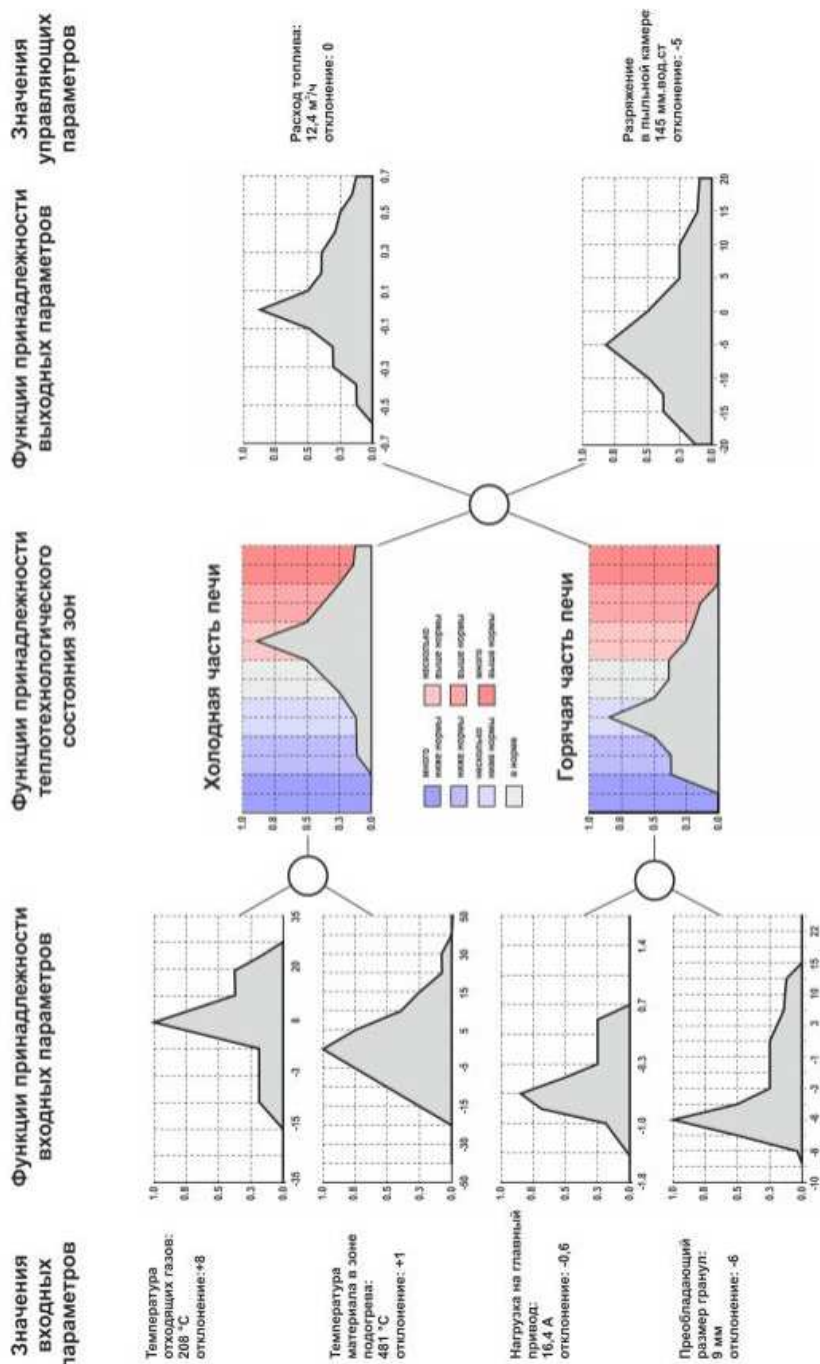


Рис. 4.1. Пример нечёткого вывода

## 4.2. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕОБХОДИМЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

При управлении цементными печами, являющимися динамическими объектами с большой инерционностью, необходимо учитывать интенсивность изменения параметров. Несвоевременная подача необходимого количества теплоты в технологическую часть печи приводит к продолжению действия возмущения и более сильному выходу печи из режима, чем то, для которого управляющее воздействие определялось. В результате запаздывание управляющего воздействия является одной из причин выхода печи из нормального режима работы и её переводу в режим "тихого хода". Поэтому при большой скорости изменения параметров необходимо применять управляющие воздействия с некоторым запасом, учитывая также и потенциальное возмущение, которое будет происходить в течении управляющего воздействия. Но, как говорилось выше, резкие управляющие воздействия на печи недопустимы, поэтому определение длительности и интенсивности управляющего воздействия и величины запаса является важной задачей.

Одним из решений проблемы учёта характера изменения параметров является составление лингвистических правил для разной скорости изменения регулируемых параметров. Но это приводит к значительному возрастанию объёма массива правил, что сильно снижает скорость расчётов. Предложенный в [176] метод составления отдельных массивов для каждого значения скорости изменения параметров снижает трудоёмкость составления правил, но этот метод позволяет учитывать небольшое количество параметров, что для цементной печи неприменимо.

Для разработки метода учёта скорости изменения параметров был проведён анализ работы машинистов печей АО «Осколцемент». По результатам анализа построены графики зависимости изменения расхода топлива и разрежения в пыльной камере, которые устанавливали машинисты, от скорости изменения параметров  $\omega_n$  (примеры на рис. 4.2 и 4.3).

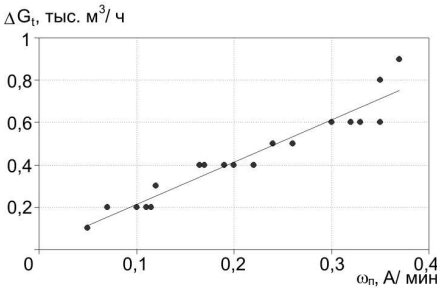
Полученная зависимость на графиках представляет собой прямую. Некоторая дискретность изменения регулирующих параметров объясняется ценой деления приборов управления. Угол наклона прямой зависит от степени влияния данного регулируемого на регулирующий параметр. Таким образом, управляющие воздействия зависят от скорости изменения параметров.

Было принято следующие предположения: *величина возмущения пропорциональна скорости изменения состояния технологической части печи.* Другими словами, скорость изменения регулируемых параметров пропорциональна интенсивности возмущения.

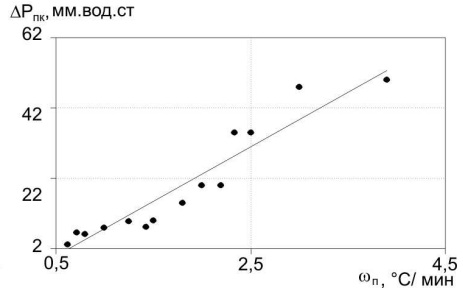
Введём понятие «потенциальное изменение параметра», под которым будем понимать величину отклонения параметра, которое будет,



если тепловая зона перейдет в рассматриваемое состояние под действием возмущения стандартной величины. Таким образом, величина возмущения показывает не текущее изменение параметров, а их *потенциальное изменение*, вычисляемое с учётом скорости изменения. Отсюда следует, что *величина потенциального изменения параметра пропорциональна скорости изменения этого значения*.



**Рис. 4.2. Зависимость изменения расхода топлива  $\Delta G_t$  от скорости изменения нагрузки на главный привод печи  $\omega_n$**



**Рис. 4.3. Зависимость изменения разрежения в пыльной камере  $\Delta P_{пк}$  от скорости изменения температуры отходящих газов  $\omega_n$**

Следовательно в качестве входных параметров в нечёткой модели необходимо использовать потенциальное значение параметра  $x_{пот}$ , вычисляемое по формуле:

$$x_{пот} = x_1 + \frac{\omega}{\omega_n} \cdot (x_2 - x_1) \cdot \xi_k,$$

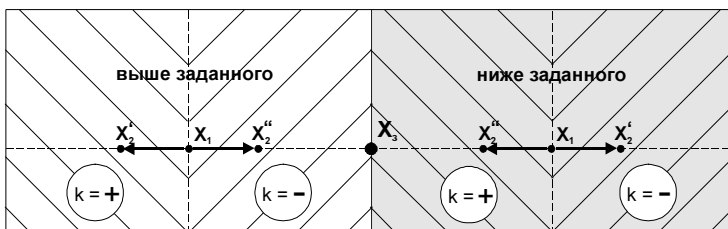
где  $x_1, x_2$  – начальное значение параметра и значение параметра на текущий момент времени;  $\omega, \omega_n$  – текущая скорость изменения и номинальная (заданная) скорость изменения параметра, относительно которой составлялись лингвистические правила;  $\xi_k$  – коэффициент учёта потенциального изменения параметра.

Коэффициент

$$\xi_k \in \left[ \frac{\omega_n}{\omega}; 1 \right],$$

т. е. при  $\xi_k = 1$  полностью учитывается потенциальное изменение, при  $\xi_k = \frac{\omega_n}{\omega}$  потенциальное изменение не учитывается.

Введём коэффициент  $k$  равный  $sign(x_2 - x_1)$  и определяющий направление изменения параметра. Области значений  $k$  представлены на рис. 4.4.



**Рис. 4.4. Области значений коэффициента  $k$ :**

$X_3$  – заданное значение регулируемого параметра;  
 $x_1, x_2$  – начальное и конечное значение параметра.

Скорость изменения параметра часто является величиной с нечётким значением. Для использования  $\omega_{\text{п}}$  в нечётком виде в качестве словесного представления величины скорости изменения вводится понятие *характер изменения параметра*. Терм-множество переменной «характер изменения параметра» состоит из трёх значений:

$$\{T_i\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{"не значительное изменение"} \\ \text{"плавное изменение"} \\ \text{"резкое изменение"} \end{array} \right\}, i = 1, 2, 3.$$

Множество правил строится для термина "плавное изменение". Нечёткое представление  $\omega_{\text{п}}$  для нагрузки на главный привод и температуры отходящих газов показано в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Нечёткое представление характера изменения параметров**

Наименование параметра	Множество термов	Границы области абсолютных значений термов	Множество значений
Характер изменения значения нагрузки на главный привод (численное представление в А/мин)	незначительное изменение	0..0,07	0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,07; 0,08; 0,1; 0,12;
	плавное изменение	0,07..0,16	0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,22;
	резкое изменение	0,16..0,26	0,24; 0,26; 0,27; 0,28

Наименование параметра	Множество термов	Границы области абсолютных значений термов	Множество значений
Характер изменения значения температуры отходящих газов (численное представление в °С/мин)	незначительное изменение	0..0,6	0; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,3; 2,5; 2,7; 2,9; 3,1; 3,3; 3,5; 3,7; 3,9
	плавное изменение	0,6.. 1,4	
	резкое изменение	1,4..3,9	

Представленный способ учёта характера изменения параметров при определении управляющего воздействия прост в реализации, и в то же время обеспечивает высокую степень достоверности. В табл. 4.2 приведено сравнение рассчитанного и установленного машинистом печи расхода топлива  $G_t$ .

Таблица 4.2

**Величина расхода топлива  $G_t$  в зависимости от  $A_{гп}$   
(печь №2 АО «Осколцемент»)**

$A_{гп}$	$\omega_{п}$	Расход топлива $G_t$		
		Установленный машинистом	Рассчитанный	
			с учётом скорости изменения параметра	без учёта скорости изменения параметра
16,8	0,19	12,6	12,6	12,4
17,2	0,14	12,4	12,4	12,4
18,6	0,27	11,8	11,8	12,0
17,4	0,23	12,6	12,4	12,2
19,2	0,20	11,8	12,0	12,4

В качестве параметра, показывающего состояние горячей части печи, в таблице приводится нагрузка на главный привод печи  $A_{гп}$ . Состояние холодной части печи во всех примерах имеет значение «в норме». Скорость изменения параметра и расход топлива определялся одновременно по показаниям соответствующих приборов.

В качестве альтернативного способа учёта скорости и характера изменения значений параметра можно предложить следующий метод.

Итоговая функция принадлежности состояния технологической части печи определяется как пересечение выходных нечётких множеств (рис. 4.5). Каждому отдельному параметру ставится в соответствие состояние технологической части печи, позже определяется итоговая

функция принадлежности. Данный алгоритм не зависит от конкретного набора параметров. Чем параметров больше, тем точнее будет функция принадлежности выходного множества. В тоже время, выход из строя одного из датчиков или установка нового не будет влиять на производственные правила, ведь они составляются индивидуально для каждого параметра.

Рассмотрим этот алгоритм на 2 примерах (рис. 4.5):

*Пример 1.* Один из параметров реагирует на изменения состояния зоны раньше другого (содержание CO<sub>2</sub> в отходящих газах реагирует на изменение теплового режима раньше относительно нагрузки на привод печи). Итоговая функция будет это учитывать, смещаясь в сторону более чувствительного параметра. Так как нагрузка на главный привод печи ещё не отреагировала, то состояние ещё не плохое, но уже не нормальное.

*Пример 2.* Неоднозначный вывод одного из параметров. Уменьшение размера гранул (пыление) наблюдается как при перегреве печи, так и при падении температуры в зоне спекания. Но при учёте вывода на основании значения нагрузки на главный привод у нас получается однозначный результат.

Скорость и направление изменения параметра (в рамках этого алгоритма) учитываются в производственных правилах как один из параметров. Пример учёта оценки скорости изменения параметра в производственных правилах приведён ниже:

Значение параметра	Оценка характера изменения параметра	Состояние зоны
В норме	Резкое увеличение	Несколько перегрета
В норме	Плавное изменение	В норме
В норме	Резкое уменьшение	Несколько остыла
Ниже нормы	Резкое падение	Сильно остыла
Ниже нормы	Плавное изменение	Остыла
Ниже нормы	Резкое увеличение	Несколько остыла

Таким образом, в зависимости от скорости и направления изменения параметра изменяется состояние технологической зоны печи. Приведённые производственные правила полностью описывают состояние объекта управления, а так же хорошо структурированы что позволяет избежать противоречивости и избыточности нечёткой производственной системы.

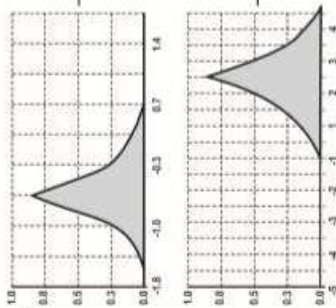
В то же время, если нет необходимости учитывать характер изменения параметра, производственная система легко приводится к обычному виду (без учёта характера изменения).

значения  
входных  
параметров

функции принадлежности  
входных параметров

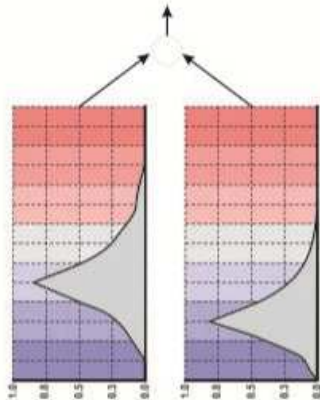
функции принадлежности  
теплотехнологического  
состояния зоны

итоговая функция  
принадлежности  
(пересечение выходных  
нечетких множеств)

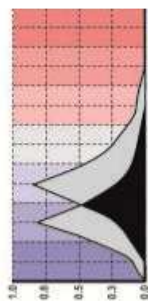


Нагрузка на главный  
привод:  
16,4 А  
отклонение: -0,6

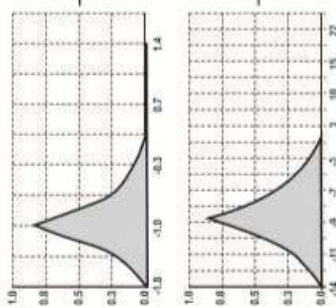
Содержание CO<sub>2</sub>:  
23,5 %  
отклонение: 2,5



много высевок  
мало высевок  
ниже нормы  
выше нормы  
исключено  
в норме

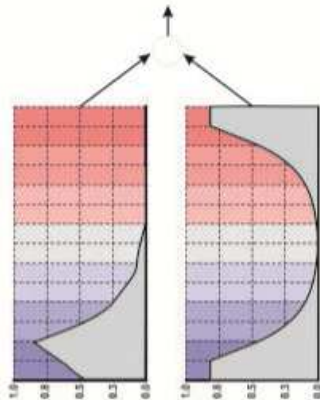


1

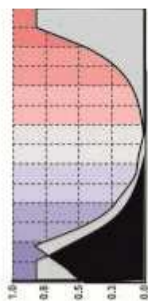


Нагрузка на главный  
привод:  
16,4 А  
отклонение: -0,6

Преобладающий  
размер гранул:  
3 мм  
отклонение: -9



много высевок  
мало высевок  
ниже нормы  
выше нормы  
исключено  
в норме



2

Рис. 4.5. Примеры нечёткого вывода (итоговая функция принадлежности определяется как пересечение выходных нечётких множеств)

### 4.3. УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ В КРИТИЧЕСКИХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Во время работы печи происходят различные ситуации, связанные с приостановкой или полным прекращением работы какого-либо оборудования. Такие ситуации отнесены к аварийным. Аварийные ситуации требуют стандартных действий, а некоторые – предварительной оценки теплового состояния печи. К критическим относятся ситуации, связанные с невозможностью работы печи в заданном режиме по технологическим причинам (сильный перегрев печи, невозможность дальнейшей работы без выпуска брака).

Действия при аварийных и критических ситуациях, как правило, сопровождаются переводом печи в режим "тихого хода". Этот режим характеризуется снижением скорости вращения и, пропорционально этому снижению, уменьшением питания печи. Данный режим определяется характеристикой привода печи. Обычно частота вращения печи в этом режиме составляет 30-50% полного хода.

В зависимости от причины приостановки печи можно выделить три режима «тихого хода»:

- для разогрева печи;
- промежуточный для пуска или остановки печи;
- для частичной остановки печи, когда печь переводится на вспомогательный привод.

Для ситуации когда печь сильно перегрета необходимо кратковременно (на 2...4 оборота печи) снижать расход топлива на 70-80% [6]. Все эти типы режимов являются стандартными, и регулирующие параметры для них имеют заданные значения. Значения регулирующих параметров при различных режимах для печи № 3 АО «Осколцемент» представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

#### Значения регулирующих параметров в различных режимах

№ режима	Режим работы печи	Питание, с	$G_b$ , тыс. м <sup>3</sup> /ч	$P_{пк}$ , мм.вод.ст.	$R_x$ , положение
1	Рабочий режим	16	12,8	145	0 (нейтральное положение)
2	"Тихий ход". Разогрев печи	30	12,2	90	3 (максимально введены)
3	"Тихий ход". Пуск – Остановка	30	9,0	80	0
4	Резкое кратковременное охлаждение при перегреве	16	3,0 – 4,0	145	0
5	Перевод на вспомогательный привод	0 (периодически)	3,0	15	0

Разрежение в головке печи (при наличие колосниковых холодильников) во время перехода из одного режима в другой необходимо установить в 2...3 мм. вод. ст.

Для представления аварийных ситуаций в экспертной системе введены критические параметры. Было выделено два критических параметра: перебой со шламом и авария оборудования. Возможные значения критических параметров представлены в табл. 4.4. При необходимости список критических параметров может дополняться.

Таким образом, изменение режима работы печи производится в следующих случаях:

- при принадлежности набора состояний технологических частей множеству состояний, соответствующих критическим ситуациям, при которых необходим перевод печи в режим "тихого хода" (режимы № 2 и 3 из табл. 4.4);

- при активном состоянии хотя бы одного из критических параметров (режимы № 3 и 4 из табл. 4.4).

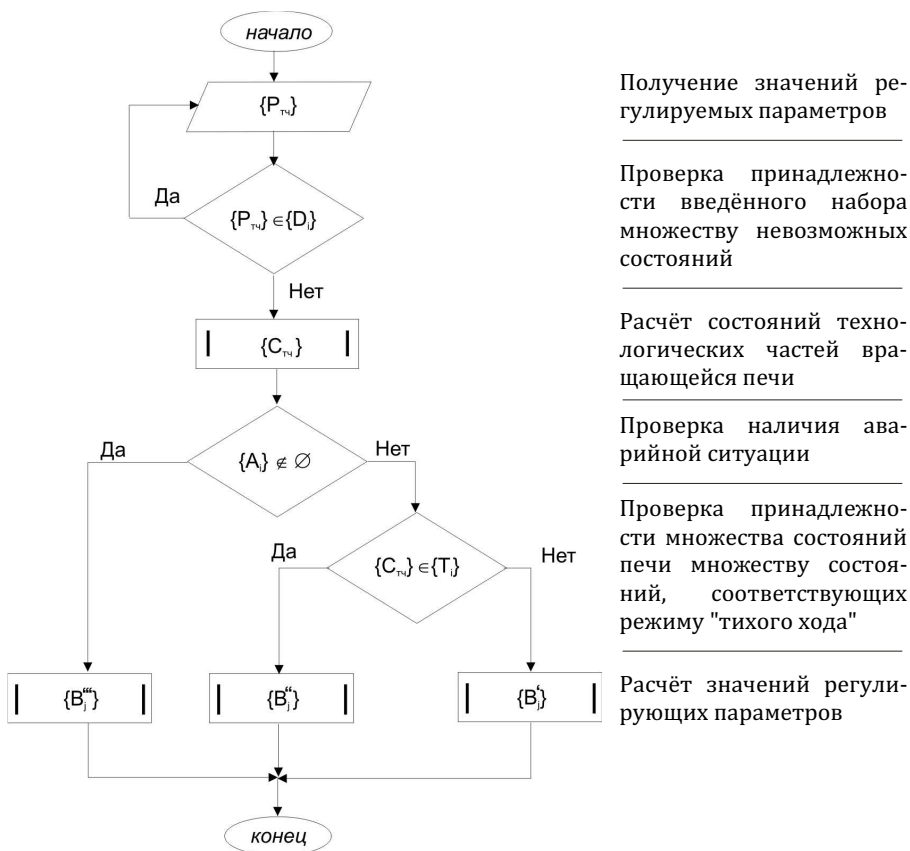
Таблица 4.4

### Критические параметры

Название критического параметра	Значения критического параметра	Необходимые действия
Перебой со шламом	Не было	-
	1 - 4 минуты	В зависимости от состояния холодной части печи: уменьшение разрежения в пыльной камере; уменьшить разрежение в пыльной камере и расход топлива; режим № 2
	5-11 минут	Режим № 3 (табл. 4.3)
	Более 11 минут	Режим № 3, а затем № 4 с последующей остановкой на разогрев
Авария оборудования	Не было	-
	Остановка дымососов	Режим № 4
	Остановка главного привода	Режим № 3, затем сразу № 4
	Отсечка газа	Режим № 3, затем сразу № 4 (питание печи прекращается полностью)
	Обрыв регулирующей расход топлива заслонки	Сразу отсечка газа, затем как при отсечке газа
	Остановка решётки холодильника	Режим № 3, а затем № 4, вентиляторы холодильника выключают после охлаждения клинкера на решётках
	Остановка вентилятора общего дутья.	Режим № 3, а затем № 4, остановка решётки, потом скребков
	Обрыв скребков	Как при остановке решётки холодильника

Одним из вариантов набора регулируемых параметров являются невозможные состояния технологических частей печи, связанные с ошибочными или сомнительными значениями параметров, обычно возникающими из-за аварии измерительной аппаратуры. В случае возникновения невозможного состояния необходимо изменить набор параметров, то есть исключить неверный параметр.

На рис. 4.6 представлен общий алгоритм расчёта значений регулирующих параметров с проверкой наличия критических и аварийных режимов и невозможных состояний.



**Рис. 4.6. Схема расчётов с проверкой критических и аварийных режимов**

В начале расчётов происходит проверка на принадлежность введённых множеств значений регулируемых параметров множеству невозможных состояний технологических частей печи. К невозможным состояниям относятся состояния регулируемых параметров, появление



которых не возможно по технологическим причинам (например, правила № 16 и 17 из табл. 3.13), а также ситуации, в которых значения параметров выходят за диапазон возможных значений. При получении невозможного состояния технологической зоны происходит оповещение пользователя и запрос новых данных. Следующим этапом происходит оценка технологического состояния частей печи по нечёткой модели. В дальнейшем осуществляется проверка наличия активного состояния критических параметров, характеризующих аварийные ситуации. Если наличие аварийной ситуации не подтверждено, производится проверка на принадлежность набора состояний технологических частей печи множеству состояний, соответствующих ситуациям, при которых необходим перевод печи в режим "тихого хода". В зависимости от результата выполнения всех проверок производится расчёт регулирующих параметров. Сходство текущего состояния с невозможными и ситуациями, когда необходим перевод печи в режим "тихого хода" определяется мерой нечёткой возможности [181].

#### **4.4. УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ ОДНОГО РЕЖИМА ОБЖИГА В ДРУГОЙ**

В настоящее время на одних и тех же цементных заводах России выпускаются разнообразные виды цементов, сырьё для которых часто имеет различный химический состав и, следовательно, требует различных режимов обжига. Часто из-за ограниченности запасов сырья на заводах для выпуска одного и того же цемента используются различные сырьевые материалы, значительно отличающиеся по составу и свойствам, что тоже требует изменения режима работы печи.

Так, в АО «Осколцемент» используются несколько видов глин различного качества, требующие приготовления сырьевых смесей с влажностью, отличающейся на 3...4%, а также, в связи с различным кристаллическим состоянием кремнезёма, характеризующиеся разным количеством теплоты на обжиг. Поэтому необходим алгоритм плавного перехода из одного режима в другой, при котором осуществлялся бы нормальный обжиг цементного клинкера без перевода печи в режим "тихого хода".

Для решения этой задачи предлагается разработка базы данных, которая для различных видов цемента и условий обжига содержит значения регулируемых параметров, обеспечивающих наилучший режим обжига. Значения параметров из базы данных устанавливаются, исходя из опыта работы на данной печи.

Для плавного перехода из одного режима обжига в другой составляется *карта переходного процесса*. Карта представляет собой значения регулируемых параметров в зависимости от времени продвижения ма-

териала в печи. Значения регулируемых параметров для нового режима обжига являются конечными, а текущие – начальными.

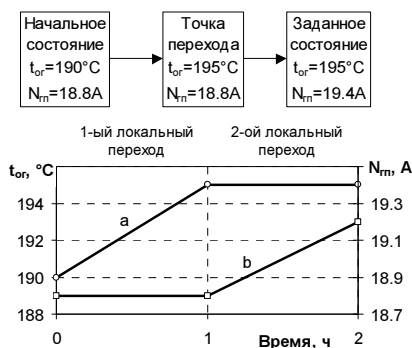
*Карта переходного процесса* составляется следующим образом. Задаётся временной интервал, в течение которого необходимо завершить переход к новому режиму работы – как правило, это время движения материала по печи. Для печей размером  $5 \times 185$  м интервал равен 1,5-3 часа [6]. Временной интервал разбивается на 2 - 4 части в зависимости от отличия начальных и конечных значений. Каждому промежутку (локальному переходному процессу) ставится в соответствие набор заданных значений. Эти наборы могут быть вычислены автоматически, а затем откорректированы пользователем. При расчёте локальных переходных процессов используются следующие положения:

1. Значения регулируемых параметров, характеризующих состояние холодной части печи, должны быть равны конечным через 1...1,5 часа, то есть когда материал с новыми свойствами пройдёт зону подогрева. Набор регулируемых параметров, характеризующих состояние горячей части печи, остаётся в это время равным начальным значениям.

2. Изменение параметров осуществляется пропорционально изменению времени переходного процесса.

Переход к следующему локальному переходному процессу происходит при выполнении двух условий: 1) закончилось время предыдущего локального переходного процесса; 2) достигнуты текущие заданные значения (то есть состояние всех технологических частей печи в норме).

Примерная схема изменения регулируемых параметров для температуры отходящих газов  $t_{ог}$  и нагрузки на главный привод  $N_{гп}$  представлена на рис. 4.7. Текущие значения регулирующих параметров во время переходного процесса определяются по нечётким правилам.



**Рис. 4.7. Схема изменения регулируемых параметров во время переходного процесса:**

*a* – температура отходящих газов; *b* – нагрузка на главный привод.

Контроль пуска и розжига печи производится по той же схеме. Но так как при этом необходимы резкие изменения производительности и скорости вращения печи, вместе с регулируемыми параметрами задаются значения регулирующих параметров. При достижении регулируемых параметрами заданных значений регулирующие изменяются вместе с ними. Для контроля пуска и розжига время локального перехода может не задаваться. В интервале локального перехода значения управляющих воздействий определяются по нечёткой модели.

#### 4.5. СПОСОБЫ РАСЧЁТА РЕГУЛИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

Регулирующие параметры, определяемые по нечёткой модели, могут быть заданы в виде абсолютных или относительных значений, то есть в последнем случае представлять отклонения от заданного режима. В первом случае результатом расчёта является значение параметра, во втором – величина изменения параметра. В большинстве случаев при составлении правил и проведении расчётов необходимо использование относительных значений. Это позволяет создавать универсальные правила для разных печей, имеющих индивидуальные режимы обжига.

Но в ряде случаев значения регулируемых параметров жёстко заданы, и тогда необходимо определять абсолютное значение параметра. Это относится к положениям форсунки относительно материала, форсуночного дросселя и завихрителя. Представление этих параметров в виде абсолютных значений позволяет осуществить возврат зоны горения факела в наилучшую позицию после ликвидации возмущения.

По способу учёта свойств шлама выделено два способа расчёта регулирующих параметров: *с учётом и без учёта свойств шлама*. Учёт свойств шлама осуществляется по разности тепловых балансов двух режимов работы. При этом используется положение разделения компенсации возмущения и перехода в новый режим работы.

Оба способа расчёта имеют некоторые недостатки. Так, при учёте свойств шлама не возможно учесть все факторы (например, изменение пластичных свойств шлама, увеличение запесоченности шлама, увеличение потерь через корпус печи и т. д.) и поэтому управляющие воздействия могут быть определены с некоторой погрешностью. При управлении без учёта свойств шлама необходимое управляющие воздействие может несколько запаздывать, так как его значение меняется только для зарегистрированного изменения теплового состояния печи, без учёта инерционности процесса. Последний метод наиболее близок к управлению, осуществляемому оператором (машинистом) печи. 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). В разработанной информационной системе имеется возможность использовать оба способа одновременно, когда выбор значения регулирующего параметра производится оператором печи.

Нечёткая модель, несмотря на свои достоинства, не обеспечивает решение задач управления обжигом цементного клинкера, поэтому она ограничивается и дополняется детерминированными зависимостями.

#### 4.6. РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОГО РАСХОДА ТОПЛИВА

С топливом приходит основное количество теплоты, поступающей во вращающуюся печь. Расход топлива является наиболее сильным управляющим воздействием. Изменение расхода топлива в результате выхода печи из нормального режима работы  $\Delta G_C$  определяется с помощью модели, построенной на основе нечёткой логики по приведённым в гл. 3 правилам. Затем производится учёт изменения свойств шлама, определяется абсолютное значение регулирующего параметра и проверяется теплонапряжение на принадлежность к допустимому интервалу изменения этой величины. Если для рассчитанного расхода топлива теплонапряжение не входит в допустимый интервал, расход топлива принимает значение, равное наиболее возможному теплонапряжению в текущих условиях. Это позволяет снизить вредное влияние переходных процессов на работу вращающейся печи (положение *постоянства теплового режима печи*). В этом случае рассчитывается производительность печи, соответствующая установленному расходу топлива.

Рассмотрим *расчёт расхода топлива с учётом свойств шлама*. При изменении химических или физических свойств шлама количество теплоты, необходимое для обжига клинкера, также меняется. Расход топлива, соответствующий этому изменению, можно определить на основании теплового баланса:

$$\Delta G_{\text{бал}} = G'' - G',$$

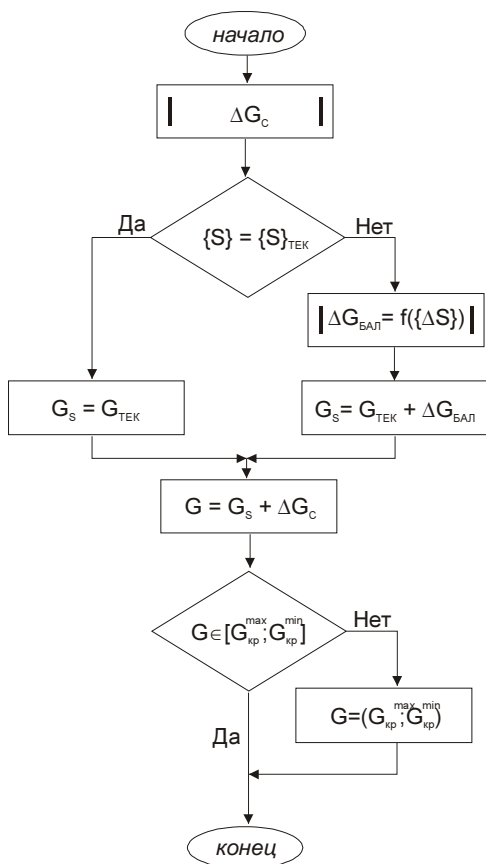
где  $G''$ ,  $G'$  - соответственно количество топлива, определённое по тепловому балансу для заданных свойствах шлама и при свойствах шлама текущего анализа.

Общее изменение расхода топлива вычисляется по положению разделения компенсации возмущения и перехода в новый режим работы:

$$\Delta G = \Delta G_{\text{бал}} + \Delta G_C,$$

где  $\Delta G_C$  - изменение расхода топлива для компенсации текущего возмущения и возврата в нормальный режим, определённое по нечёткой модели с учётом характера динамики изменения параметров.

Алгоритм расчёта расхода топлива с учётом свойств шлама приведён на рис. 4.8, а без учёта свойств шлама – на рис. 4.9.



Определение необходимого расхода топлива по нечёткой модели для компенсации возмущения

Проверка изменения свойств сырьевого шлама

Изменение расхода топлива при изменении свойств шлама

Расход топлива при нормальном режиме работы с текущими свойствами шлама

Общее количество топлива, необходимого на текущий момент работы

Проверка принадлежности расхода топлива интервалу допустимых значений.

Если полученное значение выходит за интервал, вычисление возможного расхода топлива и производительности печи для данных условий

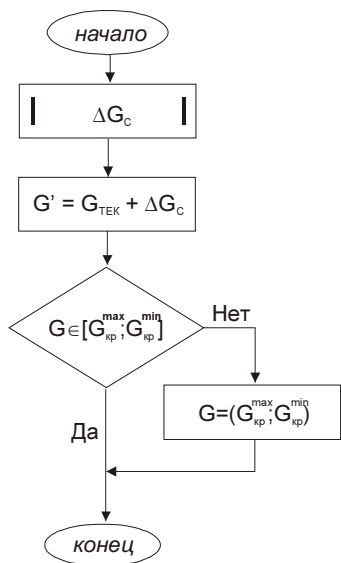
**Рис. 4.8. Алгоритм расчёта расхода топлива с учётом свойств шлама**

Оба алгоритма могут выполняться параллельно друг другу. В этом случае результат одного из расчётов приводится в качестве дополнительной информации.

#### **4.1. РАСЧЁТ ОТКРЫТИЯ ШИБЕРА ДЫМОСОСА И РАЗРЕЖЕНИЯ В ПЫЛЬНОЙ КАМЕРЕ**

Определение необходимого объёма воздуха, подаваемого в печь

Количества подаваемого воздуха должно хватать на полное горение топлива, и в то же время необходимо не допустить переизбытка воздуха, так как это приводит к ряду негативных последствий (прожогу футеровки, перерасходу топлива, повышению пылеуноса и др.). С другой стороны, с горячими газами поступает основное количество теплоты в холодный конец печи.



Определение необходимого расхода топлива по нечёткой модели для компенсации возмущения

Общее количество топлива, необходимого на текущий момент работы

Проверка принадлежности расхода топлива интервалу допустимых значений.

Если полученное значение выходит за интервал, вычисление возможного расхода топлива и производительности печи для данных условий

Рис. 4.9. Алгоритм расчёта расхода топлива без учёта свойств шлама

Оба алгоритма могут выполняться параллельно друг другу. В этом случае результат одного из расчётов приводится в качестве дополнительной информации.

## 4.2. РАСЧЁТ ОТКРЫТИЯ ШИБЕРА ДЫМОСОСА И РАЗРЕЖЕНИЯ В ПЫЛЬНОЙ КАМЕРЕ

### Определение необходимого объёма воздуха, подаваемого в печь

Количества подаваемого воздуха должно хватать на полное горение топлива, и в то же время необходимо не допустить переизбытка воздуха, так как это приводит к ряду негативных последствий (прожогу футеровки, перерасходу топлива, повышению пылеуноса и др.). С другой стороны, с горячими газами поступает основное количество теплоты в холодный конец печи.

При нормальном режиме работы печи масса воздуха, подаваемого на горение, должна изменяться пропорционально изменению расхода топлива, с сохранением постоянного коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ .

В общем виде зависимость между расходом топлива  $G_T$  и поступающим количеством воздуха на горение  $V$  можно представить следующим образом:

$$V = L_0 \alpha G_T = L_d G_T, \quad (4.1)$$

где  $L_0$  и  $L_d$  – теоретический и действительный расход воздуха на горение, определяемые из расчёта горения топлива;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

Как правило,  $\alpha$  выбирается из интервала 1,06...1,17 и зависит от вида горелочного устройства. Максимальное и минимальное количество воздуха, подаваемое в печь, определяется верхним и нижним коэффициентом запаса ( $\alpha^{max}$ ,  $\alpha^{min}$ ), который равен минимально и максимально допустимому  $\alpha$  для рассматриваемого режима обжига. Коэффициенты запаса зависят от условий смешения топлива и воздуха, характеризующихся скоростью вылета топлива, положением горелки относительно оси печи и материала, положением горелочных устройств (дросселя и завихрителя), типом горелки. Их можно определить экспериментально во время промышленных испытаний печи. В целом для отечественных печей с горелкой ВРГ или ГРЦ  $\alpha^{max} = 1,25$ , а  $\alpha^{min} = 1,04$ .

Количество подаваемого воздуха может быть определено по принципу *разделения компенсации возмущения и перехода в новый режим работы*.

$$V = V_s + \Delta V_c \quad (4.2)$$

где  $V$  – необходимое количество воздуха;  $V_s$  – количество подаваемого воздуха при заданном  $\alpha$  для рассчитанного расхода топлива (с учётом свойств шлама, но без учёта компенсации текущего возмущения);  $\Delta V_c$  – изменение количества воздуха для компенсации текущего возмущения.  $\Delta V_c$  может быть найдено по определённому с помощью нечёткой модели разрежению в пыльной камере или проценту открытия шиберы дымососа.

### **Способы регулирования подачи воздуха**

Количество подаваемого в печь воздуха определяет степень открытия шиберы дымососа. Шиберам печного дымососа регулируется тягодутьевой режим печи и количество теплоты, поступающего в холодную часть печи. При этом необходимо учитывать, что между показаниями приборов, фиксирующих открытие регулирующего шиберы (в%) и производительностью дымососа (определяющего количество подаваемого в печь воздуха) нет линейной зависимости. Данная зависимость устанавливается экспериментально для каждой печи, что очень трудоёмко и не всегда возможно. С другой стороны, о количестве отсасываемых дымососом газов можно судить по разрежению в пыльной камере, что, как правило, осуществляется на практике. Поэтому предлагается регулировать расход воздуха путём установки необходимого разрежения в пыльной камере, установленной за печью. Кроме такого регулирования, метод расчёта расхода воздуха включает проверку допустимого значения коэффициента избытка воздуха при изменении степени открытия шиберы, не связанного с изменением расхода топлива.

## Взаимосвязь между расходом воздуха и разряжением в пыльной камере

Разряжение в пыльной камере, по существу, определяет газодинамическое сопротивление печи, так как разряжением на входе в неё (в головке печи) можно пренебречь в виду его небольшого значения (менее 10-30 Па), которое на несколько порядков ниже разряжения за печью. Сопротивление печи согласно уравнению Дарси-Вейсбаха складывается из местных сопротивлений теплообменных устройств и материальных колец внутри печи и сопротивления трения при движении газов

$$dp = \lambda \frac{v^2 \rho}{2} \frac{dl}{2r} + \xi \frac{v^2 \rho}{2} = \left( \lambda \frac{dl}{2r} + \xi \right) \frac{v^2 \rho}{2}.$$

Выразив скорость  $v$  через расход газов в печи при нормальных условиях  $V_{го}$  получаем

$$dp = \left( \lambda \frac{dl}{2r} + \xi \right) \frac{V_{го}^2}{2\rho \pi^2 r^4}. \quad (4.3)$$

Общее сопротивление печи определяется интегрированием по её длине  $L$

$$P = \int_L dp.$$

Практически все величины, входящие в уравнение (4.3), в качестве констант приняты быть не могут, так как изменяются по длине печи. Коэффициент трения  $\lambda$ , плотность газов  $\rho$  зависят от температуры в сечении печи, то есть от температурной кривой газов по длине печи. Внутренний эквивалентный радиус для прохода газов  $r$  определяется наличием материальных колец, степени заполнения сечения материалом, толщиной обмазки. Местные сопротивления, связанные с изменением сечения прохода газа, зависят от их температуры, наличия и расположения колец и обмазки. Сопротивление цепной завесы зависит также от температуры газов, степени высушивания в цепях материала и пластических свойств шлама.

Расход газов меняется по длине печи, в связи испарением физической влаги и выделением технологических газов из материала. Расход газов в сечении можно выразить через расход воздуха, поступающего в печь  $V$ , следующим образом:

$$V_{го} = k_B \cdot V,$$

где  $k_B$  – коэффициент, зависящий от коэффициента избытка воздуха и местоположения сечения.



Общее сопротивление печи таким образом можно связать с расходом воздуха следующим образом:

$$P = k_V \cdot V^2, \quad (4.4)$$

где  $k_V$  – коэффициент режима печи, учитывающий перечисленные выше зависимости. В основном коэффициент режима определяется температурной кривой газов и материала по длине печи, работой цепной завесы и наличием материальных колец. Для двух одинаковых режимов коэффициент  $k_V$  также будет одинаков и сопротивление печи, таким образом, будет зависеть только от квадрата расхода воздуха. Поэтому между количеством воздуха и разрежением в пыльной камере для технических расчётов при одинаковом режиме работы можно применить следующую зависимость [55]:

$$P''_{\text{пк}} \approx P'_{\text{пк}} \cdot \left( \frac{V''}{V'} \right)^2, \quad (4.5)$$

где  $P''_{\text{пк}}, P'_{\text{пк}}$  – искомое и известное разрежение в пыльной камере;  $V'', V'$  – количество выходящего из печи воздуха в первом и во втором случае;

В соответствии с (4.4) взаимосвязь между количеством воздуха и разрежением в пыльной камере в расчётах осуществляется следующим образом:

$$\Delta V_C = k_V \cdot \sqrt{\Delta P_C},$$

где  $\Delta P_C$  – необходимое изменение разрежения, посчитанное по нечёткой модели. Значение  $k_V$  на текущий момент времени определять по формуле:

$$k_V = \frac{V'}{\sqrt{P'_{\text{пк}}}},$$

где  $V'$  – объем газов из печи на текущий момент времени.

$V'$  можно определить следующим образом:

$$V' = V_{\text{CO}_2}^C + V_{\text{HO}_2}^C + V_{\text{пг}}^T,$$

где  $V_{\text{CO}_2}^C$  – объем  $\text{CO}_2$  выделившегося из сырья,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $V_{\text{HO}_2}^C$  – объем физической и гидратной влаги,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $V_{\text{пг}}^T$  – объем продуктов горения топлива определённый с помощью  $\alpha$ , который в свою очередь определяется по

химическому анализу отходящих газов или содержанию кислорода в отходящих газах (с использованием упрощённых методик расчёта или нечётких правил).

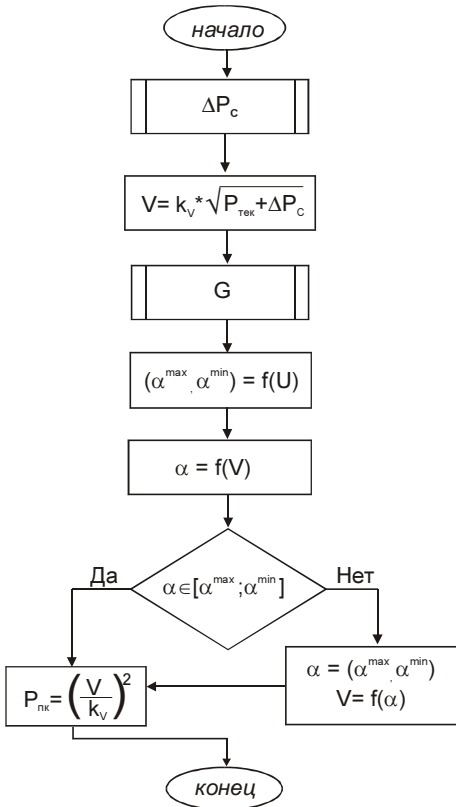
Если печь не снабжена приборами для автоматического определения химического состава отходящих газов, считается что  $k_V \approx const$ .

Искомое разрежение в пыльной камере  $P_{пк}$  равно:

$$P_{пк} = \left( \frac{V}{k_V} \right)^2,$$

где  $V$  – необходимый объём отходящих газов из печи.

Схема расчёта необходимого разрежения в пыльной камере без учёта свойств шлама представлена на рис. 4.10, с без учётом – на рис. 4.11.



Изменение разрежения в пыльной камере для компенсации текущего возмущения (по нечёткой модели)

Расход воздуха для текущего режима работы печи

Необходимый расход топлива для текущего теплового состояния

Определение коэффициента запаса по  $\alpha$  для предполагаемых условий горения топлива  $U$

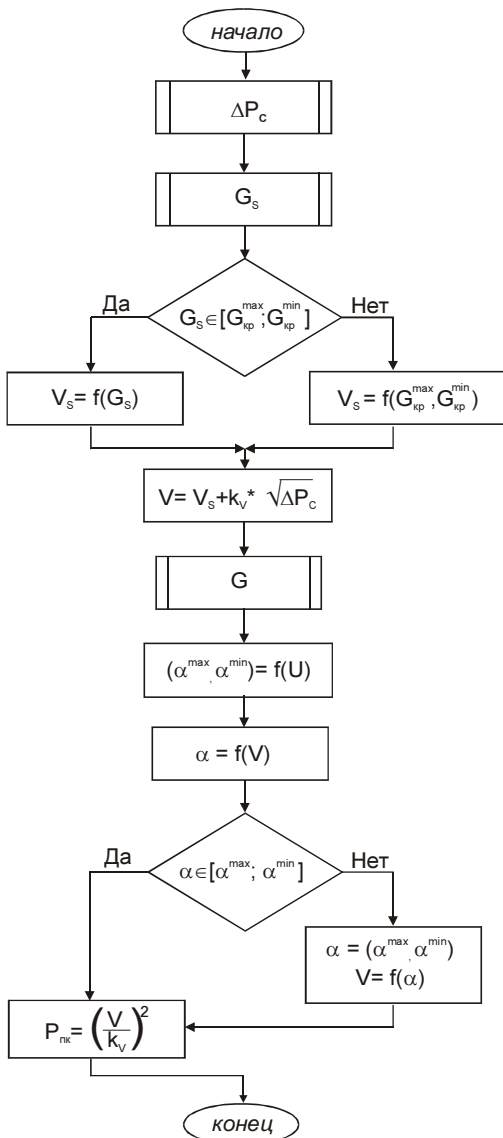
Вычисление коэффициента избытка воздуха для рассчитанных  $G$  и  $V$

Проверка допустимости рассчитанного расхода воздуха

Если расход воздуха выходит за интервал допустимых значений, пересчёт  $V$

Расчёт необходимого разрежения в пыльной камере по определённому количеству воздуха

**Рис. 4.10. Алгоритм расчёта разрежения в пыльной камере без учёта свойств шлама**



**Рис. 4.11. Алгоритм расчёта разрежения в пыльной камере с учётом свойств шлама**

Если на печи имеется автоматический анализатор состава отходящих газах (то есть определяется содержание  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ ), то параллельно расчёту можно осуществлять контроль полноты горения топлива и производить дополнительную корректировку управляющего воздействия.

Изменение разрежение в пыльной камере для компенсации текущего возмущения (по нечёткой модели)

Определение расхода топлива с учётом свойств шлама для нормального режима работы (без учёта компенсации возмущения)

Проверка принадлежности расхода топлива допустимому интервалу

Объём отходящих газов для текущего теплового режима работы печи

Общий расход воздуха с учётом текущего теплового состояния печи

Необходимый расход топлива для текущего теплового состояния

Определение коэффициента запаса по  $\alpha$  для предполагаемых условий горения топлива  $U$

Вычисление коэффициента избытка воздуха для рассчитанных  $G$  и  $V$

Проверка допустимости рассчитанного расхода воздуха

Если расход воздуха выходит за интервал допустимых значений, пересчёт  $V$

Расчёт необходимого разрежения в пыльной камере по найденному количеству газов из печи

### 4.3. РАСЧЁТ ПОЛОЖЕНИЯ ГОРЕЛКИ, ДРОССЕЛЯ И ЗАВИХРИТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАННОГО ХАРАКТЕРА ГОРЕНИЯ И ПРОФИЛЯ ФАКЕЛА

#### Особенности режима горения топлива в цементной печи

Параметр «характер горения и профиль факела  $X_f$ » определяет распределение температуры в зоне спекания, а также режим горения топлива. Предпочтительнее использовать в лингвистических правилах (глава 3.5) именно этот параметр, а не непосредственно параметры, определяющие значения управляющих элементов форсунки или горелки. Это объясняется тем, что с точки зрения технологии, задача управления элементами форсунки (горелки) состоит в обеспечении определённого режима горения топлива (интенсивности горения и профиля факела), необходимого в текущей ситуации. Несмотря на различную конструкцию горелок и форсунок, используемых на цементных заводах, все они, имея различные элементы управления, предназначены для обеспечения одной и той же технологической задачи. Предлагаемый способ позволил создать универсальные множества лингвистических правил для любых типов горелок, в том числе комбинированных.

Параметр «характер горения и профиль факела» имеет значения термов показанные в табл. 4.5.

Таблица 4.5

#### Множество термов параметра характер горения и профиль факела

Термы параметра «Характер горения и профиль факела»	Обозначение терма
Очень интенсивное горение, сильно сконцентрированный факел	↑↑
Интенсивное горение, сконцентрированный факел	↑
Нормальный режим горения, рациональный факел	×
Слабая интенсивность горения, растянутый факел	↓
Очень слабая интенсивность горения, сильно растянутый факел	↓↓

Наиболее полно характеризует режима горения топлива расстояние от обреза печи до максимальной температуры корпуса  $L_t^{max}$ . Этот параметр косвенно показывает форму факела и положение зоны горения топлива. По экспериментальным данным [6, 87] наилучшее значение  $L_t^{max}$  для печей длиной более 120 м находится в интервале 12-17 м. Выбор  $L_t^{max}$  в качестве определяющего параметра основан также на том что, этот параметр измеряется автоматически термосканами почти на всех отечественных заводах.

По положению относительно горячего обреза печи можно выделить три основные зоны горения факела:

- |                    |                         |                    |
|--------------------|-------------------------|--------------------|
| I. Дальняя зона    | II. Средняя зона        | III. Близкая зона  |
| $L_t^{max} > 17$ м | $12 < L_t^{max} < 17$ м | $L_t^{max} < 12$ м |

Близкая и дальняя зоны, как правило, характеризуются напряжённым ярким факелом с поздним воспламенением и приводят к повышению температуры на коротком участке печи, что может являться причиной прожога футеровки, а также образования клинкерных колец. В этих зонах происходит интенсивное горение топлива. Работа факела в зоне I приводит к клинкерному пылению, потере качества клинкера и увеличению удельного расхода топлива [6, 112].

В настоящее время на отечественных заводах в основном используют регулируемые газовые горелки трёх типов: ВРГ, ЮГЦ и ГРЦ.

Рассмотрим определение значений управляющих элементов для горелки ВРГ. Эта горелка обладает наиболее широкими пределами регулирования, а также позволяет обеспечить близкое воспламенение топлива и полное его сжигание при скорости вылета газа 180 – 220 м/с, что даёт возможность получить наиболее рациональный факел [6]. Горелка ВРГ имеет следующие параметры регулирования горения топлива: положение горелки относительно материала, положение дросселя и завихрителя. Изменение положение горелки относительно материала позволяет менять интенсивность горения топлива и длину факела. Близкая зона достигается путём завихрения струи газа лопатками завихрителя, а дальняя – в результате введения дросселя горелки. Взаимосвязь между  $X_{\phi}$  и управляющим элементом горелки, на примере положения дросселя горелки, показано в табл. 4.6.

Таблица 4.6

**Правила, описывающие взаимосвязь  $X_{\phi}$  и положения дросселя**

Характер горения и профиль факела $X_{\phi}$	Положение дросселя $D_R$	
	Обозначение	Название терма
↑↑	↑↑	Сильно введен
↑	↑	Введен
<b>×</b>	<b>×</b>	Нейтральное положение
↓	↓	Выведен
↓↓	↓↓	Сильно выведен

Перевод факела в зону I или в зону III может быть вызван технологической необходимостью, когда надо как можно быстрее разогреть материал, то есть сконцентрировать температуру на коротком участке печи. Длительность такой операции не должна превышать 30 минут, в противном случае необходимо перевести печь в режим "тихого хода". По этой причине значение положения форсунки, дросселя и завихрителя производится относительно какого-то заданного значения. Таким образом, параметры принимают заданные значения, когда состояние технологических частей печи в норме и требуется обеспечить нормальный режим горения топлива.

Несмотря на простоту, недостатком этого способа расчёта является то, что заданное значение может не являться оптимальным. В качестве альтернативного предлагается следующий способ расчёта этих регулирующих параметров.

### Расчёт по отклонению относительно текущего значения

При расчёте по отклонению относительно текущего значения величина параметра, при которой осуществляется наилучший режим горения топлива, жёстко не задана. Поэтому необходим контроль зоны горения топлива для перехода из зон I и III в зону II, если необходимость работы в этих зонах отпадает.

Критерием расчёта значения параметров при наилучшем состоянии технологических зон является  $L_t^{max}$ , которое представлено как лингвистическая переменная. Характеристика  $L_t^{max}$  для печи №3 АО «Осколцемент» показана в табл. 4.7.

Таблица 4.7

### Представление расстояния точки с максимальной температурой корпуса от обреза печи

Элемент множества термов	Границы области абсолютных значений терминов	Оптимальное значение параметра	Множество значений
Очень мало	-4...-3	14 м	-5,5; -5,0;
Несколько меньше оптимального	-3...-1		-4,0; -3,0;
Оптимальное	-1...2		-2,5; -2,0;
Несколько больше оптимального	2...4		-1,5; -1,0; -0,5; 0;
Очень велико	4...8		0,5; 1,0; 2,0; 2,5;
			3,0; 4,0; 5,0; 6,0;
			7,0; 8,0

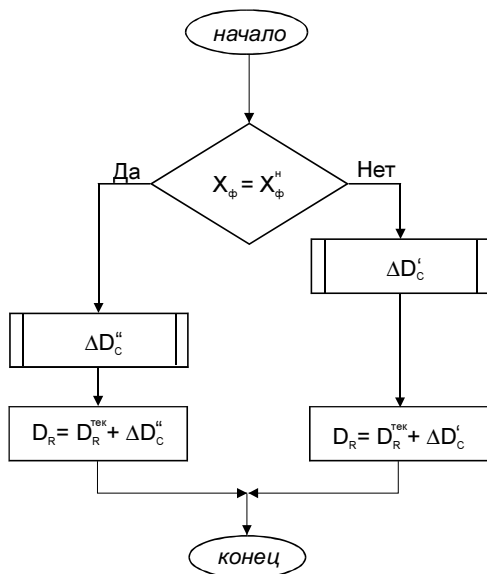
Рассмотрим метод расчёта на примере положения дросселя форсунки  $D_R$ . Лингвистические правила, описывающие взаимосвязь  $D_R$  и  $L_t^{max}$ , представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

### Набор правил описывающих взаимосвязь $D_R$ и $L_t^{max}$

$L_t^{max}$	$D_R$
↓	↑
↓↓	↑↑
×	×
↑	↓
↑↑	↓↓

Преимущество этого способа расчёта перед жёстким заданием наилучшего значения состоит в том, что в результате процессов происходящих в печи значение параметра, соответствующие наиболее рациональной зоне горения, может изменяться. Алгоритм расчёта положения дросселя методом управления относительно текущих значений представлен на рис. 4.12, а относительно заданных значений на рис. 4.13.



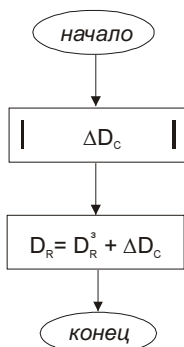
Проверка необходимости установки нормального (обычного) режима горения топлива

Изменение положения дросселя для оптимизации режима горения топлива (по нечёткой модели)

Изменение положения дросселя для компенсации текущего возмущения (по нечёткой модели)

Нахождение необходимого положения дросселя для текущей ситуации

**Рис. 4.13. Алгоритм расчёта положения дросселя относительно текущего значения**



Изменение положения дросселя для компенсации текущего возмущения (по нечёткой модели)

Нахождение необходимого положение дросселя для текущей ситуации относительно заданного значения  $D_R^з$

**Рис. 4.12. Алгоритм расчёта положения дросселя относительно заданного значения**

Значения положения форсунки (горелки) относительно материала и положения лопаток завихрителя определяются по аналогичным алгоритмам.

#### **4.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ**

1. Выделены четыре стандартных технологических режима работы печи в критических и аварийных ситуациях: тихий ход/ разогрев печи; тихий ход/ пуск –остановка; резкое кратковременное охлаждение при перегреве; перевод печи на вспомогательный привод. Получено описание этих режимов для печи Старооскольского цементного завода.

2. Предложен способ управления печью в переходных режимах, использующий нечёткую логику. Способ основан на составлении карт переходного процесса, связывающих изменения параметров в зависимости от движения материала в печи.

3. Показано, что скорость изменения параметров является важным фактором в управлении печью. Разработан способ расчёта управляющих воздействий с учётом скорости изменения регулируемых параметров.

4. Разработаны способы расчёта регулирующих параметров, учитывающие технологическую необходимость управляющего воздействия и заключающиеся в объединении нечёткого вывода и детерминированных зависимостей. Модель управления печью дополняется детерминированными зависимостями (учётom изменения свойств шлама) и ограничениями (по теплонапряжению, коэффициенту избытка воздуха и положения зоны горения факела).



## 5. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

### 5.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВЕТУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ

По результатам проведённой работы создана компьютерная программа «Expert» (рис. 5.1). Программа представляет собой советующую систему для машинистов вращающихся печей мокрого способа производства. Она является инструментом технолога цеха «Обжиг» и облегчает разработку и осуществление единообразной схемы управления режимом обжига цементного клинкера.

При стабильном отлаженном режиме работы печи вмешательство машиниста сводится к минимуму. В то же время, чем раньше будет отмечена начало изменения технологического состояния печи, тем более легко пройдёт процесс нейтрализации возмущения и возврата в заданный режим работы. Профессионализм машиниста печи определяет то, способен ли он в кратчайшие сроки реально оценить степень возмущения и адекватно отреагировать на него. Причём, и не достаточная оценка, и переоценка произошедшего возмущения проводит к негативным последствиям. В то же время, человеку тяжело в течение длительного времени сохранять повышенное внимание и анализировать весь спектр поступающей информации. В таких случаях он сосредотачивается лишь на 2-3 параметрах. Это часто является причиной запаздывания определения возмущения и принятия неверного решения. Поэтому можно рекомендовать применения данной советующей системы в составе АСУ и АРМ. Это позволит осуществлять постоянный контроль технологического состояния печи и при необходимости автоматически выдавать рекомендации при нарушении нормального режима работы агрегата.

Компьютерная программа «Expert» также может быть использована в процессе обучения производственного персонала.

Схема работы программы показана на рис. 5.2.

Работа программы состоит из двух этапов: режим настройки и режим работы. Первый этап заключается в задании режима работы печи, который необходимо поддерживать. Режим задаётся посредством ввода необходимых значений регулируемых параметров, описывающих работу печного агрегата (рис. 5.3).

В дальнейшем производиться ввод текущих значений регулируемых и регулирующих параметров, а также химического состава сырьевого шлама.





**Рис. 5.2. Схема работы программы *Expert***

Параметры работы печи	Оптимальные значения
Параметры состояния холодной части печи	
Темп. отходящих газов, °С	200.0
Темп. в зоне подогрева, °С	480.0
Параметры состояния горячей части печи	
Нагрузка на гл. привод, А	19.0
Видимость в печи, усл. ед.	0.0
Дополнительные параметры	
Коэф. избытка воздуха, (а)	1.1
Производительность печи, т/ч	70.0

**Рис. 5.3. Окно ввода заданных значений регулируемых параметров**

На втором этапе производится оценка состояния технологических частей печи и расчёт и выдача значений регулирующих параметров, необходимых для возврата в заданный режим работы печного агрегата.

Программа содержит ряд полезных инструментов: расчёт материальных и тепловых балансов печи и холодильника, аэродинамический расчёт колосникового холодильника, анализ свойств сырьевого шлама (оценка обжигаемости сырьевой смеси).

## 5.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОЦЕССА ОБЖИГА В СОВЕТУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

В качестве инструмента разработки советующей системы использован язык программирования *Object Pascal*, представляющий обширные возможности объектно-ориентированного программирования. Элементы программы реализовывались в виде объектов. Примеры структуры элементов показаны в табл. 5.1.

Таблица 5.1

### Представление элементов советующей системы

Вид объекта	Поля объекта	Пример значений полей объекта
Технологический параметр	Название	Температура отходящих газов
	Краткое имя	$T_{ог}$
	Вид параметра	Входной
	Характеризуемая технологическая часть печи (только у входных параметров)	Холодная часть печи
	Индикатор активности	Активен (учитывается при оценке технологического состояния печи)

Окончание табл. 5.1

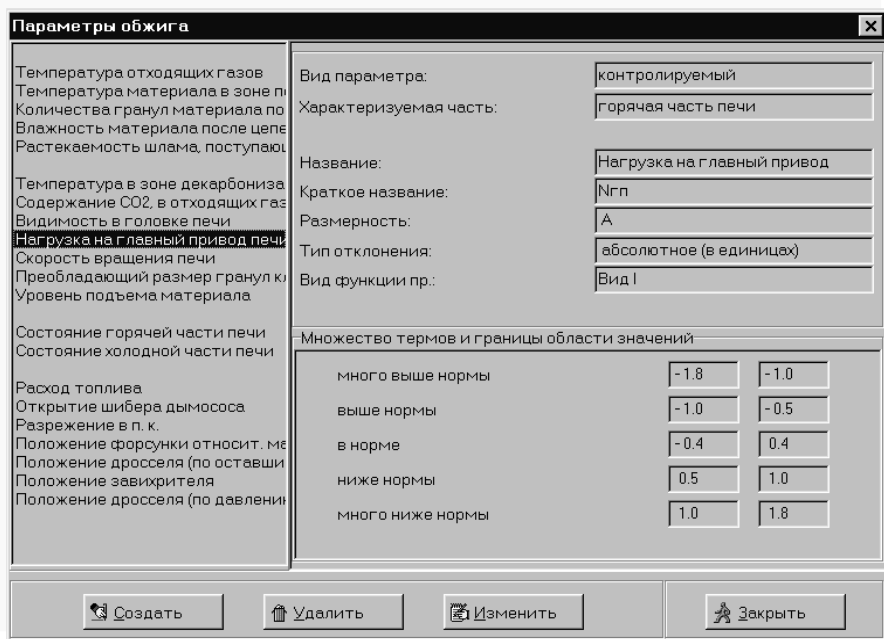
Вид объекта	Поля объекта	Пример значений полей объекта
	Множество термов	{много ниже нормы, ниже нормы, несколько ниже нормы, в норме, выше нормы, несколько выше нормы, много выше нормы}
	Границы области абсолютных значений термов	[30,0...-20,0], [-20,0...-10,0], [-11,0...-5,0], [-5,0... 5,0], [5,0...11,0], [10,0.. 20,0], [20,0... 40,0]
	Множество значений параметра	30, -25, -20, -15, -10, -8, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
	Тип отклонения	Абсолютное (в единицах)
	Размерность параметра	°С
	Заданное значение	200
	Текущее значение	203
	Функция принадлежности	Функция принадлежности вида I (см. раздел 3.3)
Критический параметр	Название критического параметра	Перебой со шламом
	Множество значений параметра	{не было, 1-4 мин., 5-11 мин., более 11 мин.}
	Активное значение	Не было
	Множество наборов значений регулирующих параметров	Набор 1, $G_t = -13,0\%$ ; $P_{нк} = 0\%$ Набор 2, $G_t = -17,0\%$ ; $P_{нк} = -4,6\%$ Набор 3, $G_t = -40,0\%$ ; $P_{нк} = -4,6\%$ Набор 4, $G_t = -40,0\%$ ; $P_{нк} = -27,0\%$ Набор 5, $G_t = -90,0\%$ ; $P_{нк} = -69,2\%$
Множество технологических ситуаций	Название множества ситуаций	$T_{ог} / Q_{хч}$
	Тип множества ситуаций	Ситуации, определяющие состояние холодной части печи
	Множество входных параметров	{Параметр 1 = температура отходящих газов}
	Множество выходных параметров	{Параметр 1 = состояние холодной части печи}
	Множество состояний входных параметров	Параметр 1 = {несколько ниже нормы, ниже нормы, много ниже нормы, в норме, несколько выше нормы, выше нормы, много выше нормы}
	Множество состояний выходных параметров (соответствующих состояниям входных)	Параметр 1 = {несколько остыла, остыла, сильно остыла, в норме, несколько перегрета, перегрета, сильно перегрета}

В программе возможно использование большого количества регулируемых и регулирующих параметров, представленных в табл. 5.2. В системе осуществлена возможность редактировать и создавать новые параметры. Окно этого режима представлено на рис. 5.4.

Таблица 5.2

**Параметры, используемые в советующей системе**

Регулирующие параметры	Регулируемые параметры
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Расход топлива</li> <li>• Открытие шиберы дымососа</li> <li>• Открытие шиберы дымососа (по разрежению в пыльной камере)</li> <li>• Положение дросселя (по количеству оставшихся витков)</li> <li>• Положение дросселя (по давлению перед форсункой)</li> <li>• Положение лопаток завихрителя</li> <li>• Положение горелки (форсунки) относительно материала</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Температура отходящих газов</li> <li>• Температура материала в зоне подогрева</li> <li>• Количество гранул материала после цепной завесы</li> <li>• Влажность материала после цепей</li> <li>• Растекаемость шлама, поступающего в печь</li> <li>• Температура в зоне декарбонизации</li> <li>• Содержание CO<sub>2</sub> в отходящих газах</li> <li>• Видимость в головке печи</li> <li>• Нагрузка на главный привод печи</li> <li>• Преобладающий размер гранул клинкера</li> <li>• Температура в зоне декарбонизации</li> <li>• Уровень подъема материала</li> </ul>



**Рис. 5.4. Окно просмотра и редактирования параметров**

Все регулируемые параметры разбиты на наборы, характеризующие технологическое состояние той или иной части печи. Пользователь может изменять содержание наборов. Значения регулируемых параметров могут иметь как численное, так и лингвистическое (словесное) значение (рис. 5.5). Это позволяет использовать параметры, не имеющие численного представления или численное значение которых трудно определить. Ряд таких параметров широко используется машинистами печей (например, видимость в головке печи, уровень подъема материала, преобладающий размер гранул клинкера). Значения отклонений технологических параметров представляются в абсолютном виде или в относительном (отклонения от заданного значения, выражено в процентах от числа).

**Рис. 5.5. Ввод значений регулируемых параметров**

В программе осуществлена обработка стандартных ситуаций, связанных с остановкой оборудования или его неверной работой. Такая обработка производится с помощью критических параметров, вводимых в виде словесного описания (рис. 5.6).

**Рис. 5.6. Ввод критических параметров**

При определении рекомендаций по управлению печью используются множества правил, которые можно создавать и редактировать (рис. 5.7). Имеется возможность сохранения индивидуальных схем управления, описываемых наборами правил.

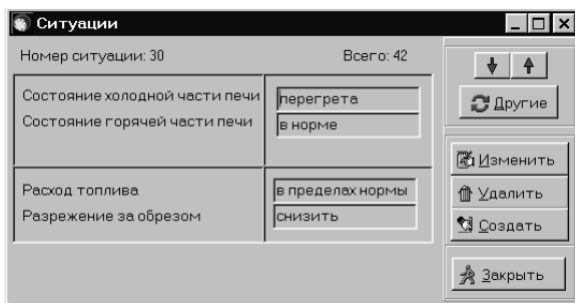


Рис. 5.7. Окно просмотра и редактирования правил

Советующая система определяет необходимое питание печи в зависимости от физических свойств шлама и заданной производительности печи. При переводе печи в режим "тихого хода" производится расчёт новой производительности и питания.

Программа осуществляет возможность учёта химического состава сырьевой смеси, проведение контроля для обеспечения допустимых значений теплонпряжения печи, коэффициента избытка воздуха и положения зоны горения факела. Кроме этого производится контроль разрежения в пыльной камере и вывод сообщения о возможности образования кольца или сброса материала с цепей. При анализе технологического состояния печи может учитываться скорость изменения параметров, которую возможно указывать в виде словесного описания.

Результаты расчётов выдаются программой в численной и словесной форме и содержат необходимые пояснения (рис. 5.8).

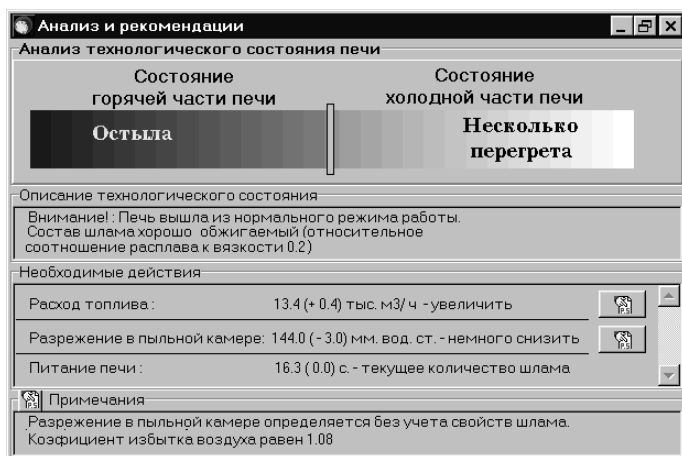


Рис. 5.8. Окно анализа технологического состояния печи и выдачи рекомендаций



По результатам оценки технологического состояния печного агрегата при необходимости выдаётся рекомендация о переводе вращающейся печи в режим "тихого хода".

Советующая система имеет инструмент создания базы оптимальных значений регулируемых параметров для различных видов сырьевых смесей и режимов обжига.

### 5.3. ПРИМЕНЕНИЕ СОВЕТУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ

В качестве примера применения советующей системы «Expert» рассмотрим реальную производственную ситуацию (печь № 3 ОАО «Осколцемент»).

На рис. 5.9 приводятся диаграммы показаний приборов, а на рис. 5.10 действия оператора и рекомендации программы. Как видно из графиков результат работы программы в целом совпадает с действиями оператора, а в приведённом случае несколько опережает его решения (рис. 5.10).

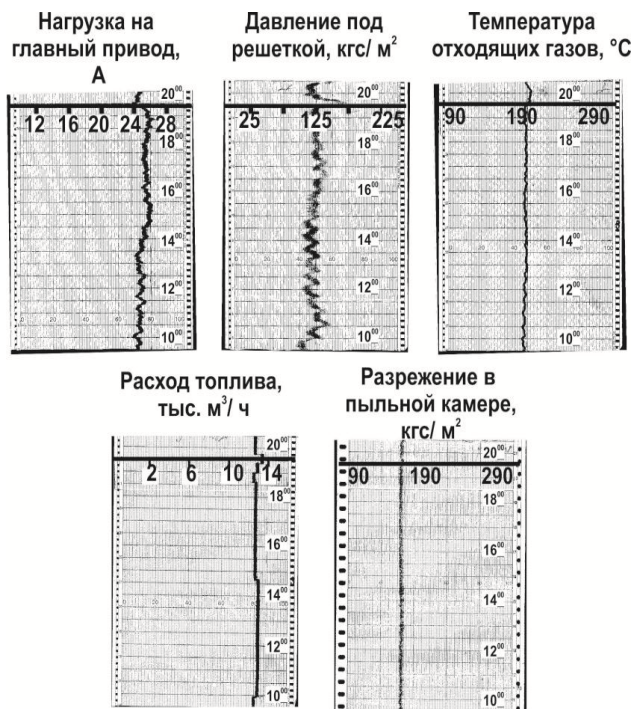
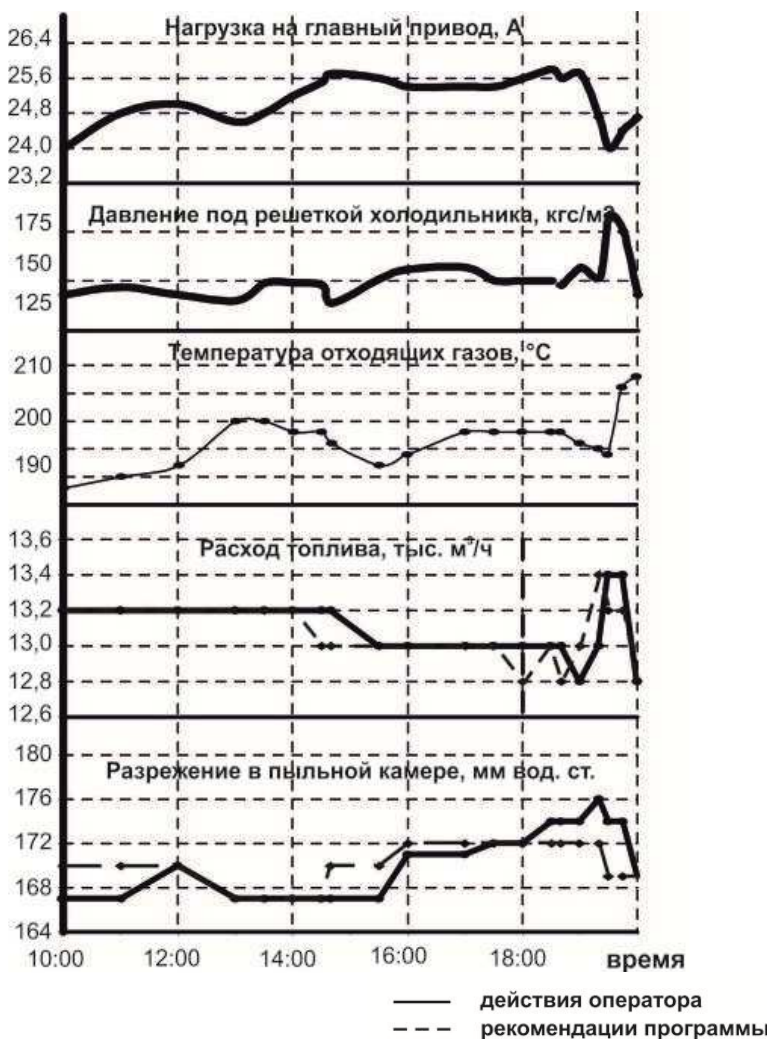


Рис. 5.9. Диаграммы показаний параметров печи №3 ОАО «Осколцемент»



**Рис. 5.10. Графики изменения параметров работы печи №3 ОАО «Осколцемент»**

Разберём производственные ситуации, в которых действия машинистов вызывают сомнения, и сравним их с рекомендуемыми управляющими воздействиями, определёнными программой (табл. 5.3).

Как видно из таблицы 5.3 применение разработанной программы во всех случаях позволило бы избежать осложнений либо свести их к минимуму.

## Примеры управления цементной вращающейся печью

Технологическая ситуация		Действия машиниста печи	Рекомендации советуемой системы	Комментарии эксперта (Коновалов В. М. канд. техн. наук, специалист по наладке печей)
Регулируемый параметр	Значение параметра			
7.09.2000 Печь №5 АО «Осколцемент»				
Температура в зоне подогрева	465°C (в норме)	<p><i>Действия:</i> Увеличен расход топлива с 11,6 до 12,6 тыс. м<sup>3</sup>/ч</p> <p><i>Последствия действий:</i> Появился недожог (СО = 0,2%, <math>\alpha = 1,05</math>).</p> <p>Состояние горячей части печи нормализовалось через 10 минут. Температура отходящих газов увеличилась до 260 °С.</p> <p>Через 30 минут подошёл большой слой пыли и расход топлива снова был увеличен.</p>	<p>Состояние холодной части печи: несколько перегрета</p> <p>Состояние горячей части печи: остыла</p> <p><i>Необходимые действия:</i> Расход топлива увеличить на 0,4 тыс. м<sup>3</sup>/ч (12,0 тыс. м<sup>3</sup>/ч); Разрежение в пыльной камере уменьшить на 5 мм. вод. ст. (120 мм. вод. ст.). Лопатки завихрителя ввести в среднее положение. Предполагаемый коэффициент избытка воздуха 1,08</p>	<p>В этой ситуации необходимо повысить расход топлива, но не более чем на 0.6 тыс. м<sup>3</sup>/ч и несколько снизить разрежение в пыльной камере, чтобы предотвратить перегрев холодной части печи и сконцентрировать теплоту в горячей части. Интенсифицировать горение топлива, используя дроссель или лопатки завихрителя.</p>
Температура отходящих газов	240°C (несколько выше нормы)			
Нагрузка на главный привод печи	17,3 А (ниже нормы)			
Температура в зоне декарбонизации	950 °С (ниже нормы)			

Технологическая ситуация		Действия машиниста печи	Рекомендации советуемой системы	Комментарии эксперта (Коновалов В. М. канд. техн. наук, специалист по наладке печей)
Регулируемый параметр	Значение параметра			
22.01.2000 Печь №3 АО «Осколцемент»				
Температура в зоне подогрева	480 °С (в норме)	<p><i>Действия:</i> Не предпринимались  <i>Последствия действий:</i> Через 10 минут нагрузка на главный привод понизилась до 16,0 А. Был увеличен расход топлива на 1,0 тыс. м<sup>3</sup>/ч, введён дроссель. Появилось пыление материала. Повышенный расход топлива был необходим более получаса.</p>	<p>Состояние холодной части печи: в норме  Состояние горячей части печи:  с учётом скорости изменения параметров – остыла без учёта скорости – несколько остыла  Необходимые действия:  с учётом скорости изменения - расход топлива увеличить на 0.4 тыс. м<sup>3</sup>/ч без учёта скорости -расход топлива увеличить на 0.2 тыс. м<sup>3</sup>/ч Разрежение в пыльной камере без изменений.  Лопатки завихрителя ввести в среднее положение.</p>	<p>Машинист печи упустил начало возмущения. В таких случаях хорошо помогает газовый анализ отходящих газов, но он редко определяется автоматически.</p>
Температура отходящих газов	225 °С (в норме)			
Нагрузка на главный привод печи	16.6 (несколько ниже нормы)			
Скорость изменения нагрузки (по диаграмме)	0,20 А/ мин.			
Видимость в головке печи	Удовлетворительная			

#### 5.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Разработана информационная система, позволяющая производить анализ технологического состояния вращающейся печи, выдачу рекомендаций по произведённому анализу и расчёт необходимых управляющих воздействий.

Схема работы информационной системы состоит из двух блоков: режим настройки, заключающийся в составление наборов регулируемых и регулирующих параметров и задание необходимого режима работы печи; рабочий режим, заключающийся в определение необходимого изменения регулирующих параметров в зависимости от сложившейся технологической ситуации.

2. Система производит расчёт значений регулирующих параметров на основе нечёткой логики, которая ограничивается и дополняется некоторыми детерминированными зависимостями. Параметры обжига представлены в программе как объекты со следующими полями: название параметра; краткое имя; тип параметра; характеризуемая технологическая часть печи; индикатор активности параметра; множество термов; границы области абсолютных значений термов; множество значений параметра; тип отклонения; размерность параметра; заданное значение; текущее значение; функция принадлежности. Критические параметры и множества технологических ситуаций также имеют вид объектов.

3. Разработанная система прежде всего является инструментом технолога цеха «Обжиг» и позволяет задавать необходимую стратегию обжига цементного клинкера. Производя анализ состояния печи, программа представляет информацию в более доступном и удобном виде.

По сравнению с субъективным управлением машиниста разработанная система имеет ряд достоинств: программа охватывает весь спектр имеющейся информации; при определении управляющего воздействия производятся теплотехнические расчёты дополняющие показания регулируемых параметров; производится постоянный контроль технологического состояния печного агрегата.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Стабилизация режима обжига заключается в правильном распределении подаваемой теплоты по длине печи. Для стабилизации и изменения технологического режима работы цементных вращающихся печей разработан метод управления, предназначенный для использования в информационных системах. Метод основан на системном анализе технологической и теплотехнической работы печи и содержит четыре основных положения: исключение причинности процесса; декомпозиция объекта; разделение воздействий для компенсации возмущения и воздействий для перехода в новый режим работы; постоянство теплового режима печи. Исходя из предложенных положений схема оценки и регулирования технологического режима работы вращающейся печи состоит из двух этапов: определение вектора теплового состояния технологических частей (зон) печи и определение управляющих воздействий по состоянию этих частей.

2. Щелочные соединения оказывают значительное влияние на режим обжига клинкера, изменяя необходимое распределение теплоты. Выбирая правильный режим обжига, можно частично нейтрализовать влияние щелочей и вывести их из циркуляции. Нерациональный режим обжига – чрезмерно короткий напряжённый факел, концентрирующий температуру на коротком участке зоны спекания, а также чрезмерно длинный с частичным недожогом топлива могут являться причиной накопления щелочей в материале печи. В работе произведён расчёт энтальпии возгонки щелочных примесей ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) для условий вращающейся печи. Учитывая изменения содержания щелочных соединений в пыли электрофильтров, можно корректировать работу печного агрегата, контролировать характер горения топлива.

3. Ряд технологических величин печи представляются в виде лингвистических переменных: температура отходящих газов, температура в зоне подогрева, нагрузка на главный привод печи, преобладающий размер гранул клинкера, видимость в головке печи, содержание  $\text{CO}_2$  в отходящих газах, температура вторичного воздуха, расход топлива, разрежение в пыльной камере, положение дросселя горелки, положение лопаток завихрителя горелки. Множества значения переменных были получены по результатам непрерывного анализа работы печи в течение двух месяцев (ОАО «Осколцемент»). Определены два вида функции принадлежности, наиболее точно учитывающие особенности процесса обжига.

4. Разработана база продукционных правил системы нечёткого вывода, позволяющая оценивать состояния зон печи в зависимости от значений входных величин, характеризующих эти зоны, а также нечёткая продукционная система, где антецедентами являются оценки теплового состояния агрегата, а консеквентами управляющие воздействия для

стабилизации теплотехнологического режима работы. Производственные правила получены на основе анализа работы промышленных печей, лабораторных экспериментов и литературных источников.

5. Разработан способ определения значений управляющих воздействий, необходимых для стабилизации режима обжига. В предлагаемой схеме модель стабилизации работы печи построенная на нечётких зависимостях между технологическими величинами дополняется детерминированными зависимостями (учёт изменения свойств шлама) и ограничениями (по теплonaпряжению, коэффициенту избытка воздуха, положения зоны горения факела и содержанию щелочных соединений в пыли электрофильтров).

6. Разработан способ управления печью в переходных режимах, использующий нечёткую логику. Способ основан на составлении карт переходного процесса, связывающих изменения технологических величин в зависимости от движения материала. Выделены и описаны стандартные технологические режимы работы печи в критических и аварийных ситуациях. Разработан алгоритм, учитывающий невыполнимые состояния технологических частей печи, наличие аварийных ситуаций и состояний соответствующих режиму «тихого хода».

7. Разработан способ расчёта воздействий на режим обжига с учётом характера и скорости изменения управляющих воздействий. В качестве значений управляющих воздействий в информационной системе используются "потенциальные" значения, вычисляемые с учётом скорости и направления изменения. Осуществлена возможность использования характера изменения управляющих воздействий в нечётком виде.

8. Разработана информационная советующая система, предназначенная для контроля и анализа технологического состояния цементной вращающейся печи и выдачи необходимых управляющих воздействий. Применение информационной системы позволит стабилизировать режим работы вращающейся печи и интенсифицировать процесс обжига цементного клинкера.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А.** Повышение эффективности работы вращающихся печей. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
2. Проектирование цементных заводов: Под ред. П.В. Зозули, Ю.В. Никифорова. – СПб.: Синтез, 1995. – 446 с.
3. **Лощинская А.В., Хохлов В.К.** Интенсификация процессов обжига цементного клинкера. – М.: Стройиздат, 1966. – 176 с.
4. **Дуда В.** Цемент: Пер. с нем. Е.Ш. Фельдмана: Под ред. Б.Э. Юдовича. – М.: Стройиздат, 1981. – 270 с.
5. **Тейлор Х.** Химия цемента: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
6. **Классен В.К.** Обжиг цементного клинкера. – Красноярск: Стройиздат, 1994. – 323 с.
7. Справочник по производству цемента: Под ред. И.И. Холина. – М.: Стройиздат, 1963. – 851 с.
8. **Сулименко Л.М.** Технология минеральных вяжущих и изделий на их основе. – М.: Высш. школа, 1976. – 278 с.
9. **Попова И.А.** Изучение процессов настыеобразования в печных агрегатах // Сб. док. Межд. конф. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1998. Ч. 2. – С. 271-275.
10. **Дуда В.** Цемент: Электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование: Справ. пособие/ Сокр. Пер. с англ. Р.Д. Айтмуратова; Под ред. Б.Э. Юдовича и И.А. Прозорова. – М.: Стройиздат, 1987. – 373 с.
11. **Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В.** Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высш. шк., 1980. – 472 с.
12. **Юнг В.Н.** Технология вяжущих веществ. – М.: Промстройиздат, 1974. – 340 с.
13. **Бутт Ю.М.** Практикум по технологии вяжущих материалов. – М.: Высш. шк., 1973. – 503 с.
14. **Seidel G., Huckauf H., Stark J.** Technologie der Bindebaustoffe. Band 3. Berlin. 1978. – S. 57 – 59
15. **Рябин В. А., Остроумов М.А., Свит Т.Ф.** Термодинамические свойства веществ: Справочник – М.: Химия, 1977. – 392 с.
16. **Schwiete H. E., Ziegler G.** Beitrag zur Thermochemie von Zementrohstoffen // Zement-Kalk-Gips. – 1956. – №9. – S. 257
17. **Zur Strassen H.** Der Theoretische Wirmebedarf des Zementbrandes // ZKG. – 1957 (10). – № 1. – S. 1-12.
18. **Коугия М.В., Судакас Л.Г.** Влияние минералогического состава сырья на его термообработку // Цемент. – 1977. – №10. – С. 5-6.



19. **Бойкова А.И.** Физико-химические свойства и кристаллохимические особенности фаз клинкера. Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Л., 1984. – 40 с.

20. **Судакас Л.Г.** Щелочи, микроструктура и активность промышленных клинкеров // Цемент. – 1978. – №12.

21. **Лугинина И.Г., Классен В.К., Классен А.Н.** Термический анализ проб материала, отобранных в печи, с определением их электропроводности // Цемент. – 1964. – № 11. – С. 19-21.

22. **Лугинина И.Г., Лугинин А.Н., Классен В.К.** Клинкeroобразование как проявление кислотно-основного взаимодействия в сырьевых смесях // Цемент. – 1970. – № 12. – С. 13-15.

23. Кислотно-основное взаимодействие при обжиге сырья / **И.Г. Лугинина, А.Н. Лугинин, В.К. Классен, А.Ф. Матвеев** // Цемент. – 1972. – № 2. – С. 9 – 10.

24. **Weber P.** Alkaliprobleme und Alkalibeseitigung in warmesparenden Trockendrehofen // Zement-Calk-Gips. – 1964. – № 8. – S. 335-344.

25. **Holmblad L.** Erfahrungen mit der automatischen Oferüberwachung durch einen Computer und Fuzzy Logic // Verfahrenstechnik der Zementerstellung: VDZ Kongres' 85. – Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1987. – S. 539-547.

26. Автоматизация управления цементным производством / **В.В. Кафаров, В.И. Сатарин, В.Б. Шифрин, Н.Ф. Дрепин.** – Киев: Будивельник, 1982. – 120 с.

27. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Марков Е.П.** Принцип описания химико-технологических процессов. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечётких множеств. – М.: Наука, 1986. – 390 с.

28. Передовой опыт работы Себряковского цементного завода: Обзорная информация / **П.И. Мордвинцев, В.Н. Шейкин, Н.В. Гонебник** и др. Под. ред. Ю.И. Дешко. – М.: ВНИИЭСМ, 1977. – 82 с.

29. **Гельфанд Я.Е.** Управление цементным производством с использованием вычислительной техники. – Л.: Стройиздат, 1973. – 178 с.

30. **Смыслов К.Н., Борщевая Р.М., Текучева Е.В.** Формализация качественной информации при исследовании процесса обжига клинкера в цементной вращающейся печи // Энергосберегающая технология строительных материалов. Сб. трудов БТИСМ. – Белгород: 1988. – С. 70-77.

31. **Классен В.К., Матвеев А.Ф., Беляева В.И.** и др. Совершенствование методов испытаний и оптимизации режима работы вращающихся печей // Труды НИИ Цемента №88. – М., 1985. – С.97-118.

32. **Кузнецов В.А.** Численное исследование диффузионного горения природного газа. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 150 с.

33. **Kuznetsov V.** Mathematic Simulating Processes in High-Temperature Plants. Result, Methods and Algorithms. – Saarbrücken: Scholars' Press, 2015. – 188 p.

34. **Кузнецов В.А.** Математическое моделирование тепловой работы цементной вращающейся печи. – Белгород, Изд. БелГТАСМ, 1994. – 80 с.

35. **Кузнецов В.А.** Основы математического моделирования тепло-технологических процессов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 95 с.

36. **Каипов В.Х., Селюгин А.А.** Об алгоритме классификации расплывчатых ситуаций. – В кн.: Методы принятия решений в условиях неопределённости. – Рига: РПИ, 1980. – С. 36-39.

37. **Перегудов В.Н.** Теплотехника и теплотехническое оборудование / В. Н. Перегудов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.

38. **Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.** Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1968. – 848 с.

39. **Китайцев В.А., Литвин А.М., Мазуров Д.Я.** Теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. Ч. I. Общая теплотехника. – М.: Стройиздат, 1966. – 200 с.

40. **Гнедина И.А., Григорьян С.С., Шапиро В.Я.** Расчёт выгорания газового факела в цементной вращающейся печи // Труды НИИЦемент. Вып. № 39. – М., 1977. – С. 19-35.

41. Влияние состава и дисперсности сырья на стойкость футеровки печей / Ю.В. Никифоров, Л.И. Скобло, Ю.А. Щупак, Б.Л. Казанович // Цемент. – 1982. – № 2. – С. 14-16.

42. **Сичкарева А.Ю.** Влияние магнитного модуля на активность портландцементного клинкера // Цемент. – 1991. – № 7-8. – С. 54-57.

43. **Фёдоров М.И.** Теория и расчёт процесса сушки во взвешенном состоянии. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 176 с.

44. **Федоренко Б.З., Борзенков А.В., Петрашев В.И.** Комплекс программ для расчёта теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей // Цемент и его применение. – 1993. – № 3. – С. 17-18

45. **Палатник Л.С., Ландау А.И.** Фазовые равновесия в многокомпонентных системах. – Харьков: Харьковский гос. университет, 1961. – 405 с.

46. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

47. **Миснар А.** Теплопроводность твёрдых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968.

48. **Коугия М.В., Гнедина И.А.** Действие начальной температуры на сырьевую смесь при обжиге // Цемент. – 1977. – № 8. – С. 14-15.

49. **Перельман Ф.М.** Изображение химических систем с любым числом компонентов. – М., Наука, 1965. – 100 с.

50. **Шестаков В.Л., Перминова Ю.И., Гальперина Т.Я.** Термодинамическая оценка реакций образования щелочных соединений при обжиге клинкера // Исследования по технологии цемента: Тр. СибНИИЦемент. – Красноярск, 1968. – Вып. 5. – С. 29-36.

51. **Перескок С.А., Миндолин С.Ф., Трубаев П.А.** Разработка алгоритма расчёта эффективности работы колосникового холодильника // Тез. докл. междунар. конф. – Белгород, 1993. – Ч. I. – С. 24-25.

52. **Ходоров Е.И.** Печи цементной промышленности. – М.: Стройиздат, 1951. – Ч. II. – 150 с.

53. Влияние химико-минералогического и зернового состава цементной сырьевой смеси на расход тепла при обжиге клинкера // Обзор. информ. ВНИИЭСМ. Пром-сть строит. материалов. Сер. 18, Цементная и асбестоцементная промышленность, вып. 12. – М., 1986. – С. 2-3.

54. **Плойтц Г.Л., Максигроссо А.Т.** Физические свойства редкоземельных элементов и некоторых их соединений // Поглощающие материалы для регулирования атомных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965.

55. **Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Огаркова Г.А.** Наладка и теплотехнические испытания вращающихся печей на цементных заводах. – М.: Стройиздат, 1962. – 244 с.

56. **Воробьёв Х.С., Мазуров Д.Я., Соколов А.А.** Теплотехнические процессы и аппараты силикатных производств. – М.: Высш. шк., 1962. – 420 с.

57. **Шаргут Я., Петела П.** Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 278 с.

58. **Хакен Г.** Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.

59. **Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В.** Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. – Белгород: Изд-во БГТУ; БИЭИ, 2008. – 230 с.

60. **Торгунаков В.Г.** Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск.: 2006. – 41 с.

61. **Торгунаков В.Г.** Применение 3D моделирования в ИК термографическом контроле вращающихся печей // Дефектоскопия. – 2006. – № 1. – С. 3-10.

62. **Пиров Ф.С.** Автоматизация и управление технологическими процессами обжига клинкера при производстве цемента: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: 2011. – 23 с.

63. **Хитрых Д.** Моделирование процессов горения в ANSYS CFX // САПР и графика. – 2006. – №1. – С. 8-9.

64. Пакет прикладных программ FLUENT для решения задач механики жидкости и газа, тепло- и массопереноса [Электронный ресурс] / Старченко А.В., Беликов Д.А., Гольдин В.Д., Нутерман Р.Б. – Томск: ТГУ, 2007. – 174 с.

65. Computer Simulation Instrumental in Development of Inward Burning Matrix Burner / Journal articles by FLUENT Software users [Электронный ресурс]. – Lebanon (USA): Fluent Inc, 1999. – 3 с. – Режим доступа: [www.fluent.com](http://www.fluent.com).

66. **Hobbs A.** Simulation Cuts Time to Develop Asphalt Plant Burner from 6-12 Months to 1 Month / Journal articles by FLUENT Software users [Электронный ресурс]. – Lebanon (USA): Fluent Inc, 2004. – 4 с. – Режим доступа: [www.fluent.com](http://www.fluent.com).

67. Coal Combustion in a Rotary Kiln / Journal articles by FLUENT Software users [Электронный ресурс]. – Lebanon (USA): Fluent Inc, 2000. – 2 с. – Режим доступа: [www.fluent.com](http://www.fluent.com).

68. **Шапгала В.В.** Применение демонстрационных версий газодинамических пакетов "FlowVision" и "Fluent" в учебном процессе / Межд. научно-метод. интернет-конф. «Информационные технологии в образовательной среде современного вуза». – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://conf.bstu.ru/conf/docs/0026/0419.doc>.

69. Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision / А.А. Аксёнов, В.В. Шмелев, М.Л. Смирнова и др // САПР и графика. – 2006. – № 4. – С.2-7.

70. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.3. Примеры решения типовых задач [Электронный ресурс]. – М.: ООО «Тесис», 2006. – 175 с. Режим доступа: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads..>

71. **Mujumdar K.** Modeling of rotary cement kiln: reaction engineering and CFD. – VDM erlag. Dr. Müller (USA), 2009. – 148 p.

72. **Immonen E.** Advanced Multiphase Simulation of Rotary Kilns: Coupling of ANSYS Fluent and a Third Party Solver // Lappeenranta, VI Liekkipäivä, 26.1.2012. ([http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva\\_2012/Sessio1B/Strandstrom.pdf](http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva_2012/Sessio1B/Strandstrom.pdf))

73. CFD modeling of a cement kiln with multi channel burner for optimization of flame profile / T. P. Bhad, S. Sarkar, A. Kaushik, S.V. Herwadkar // Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 9-11 December 2009. ([http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/048SAR.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/048SAR.pdf)).

74. **Iaccarino G.** Prediction of the turbulent flow in a diffuser with commercial CFD codes / Center for Turbulence Research. Annual Research Briefs 2000. – P. 271-278.

75. **Чернов А.** Решение задач теплообмена в ANSYS Workbench // САПР и графика. – 2006. – № 2. – С. 76-78.

76. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 3.0. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – М.: ООО «Тесис», 2006. Режим доступа: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads>.

77. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах: Пер. с англ. – М.: МЭИ, 2003. – 312 с.

78. **Хрущев В.Ф.** Интенсификация и управление технологическими процессами обжига: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – М., 1987. – 16 с.

79. Влияние технологических параметров процесса обжига клинкера на скорость движения материала во вращающейся печи/ Беседин П.В., Классен В.К., А.И. Литвинов и др. // Цемент, 1978. – № 10. – С.21-23.

80. **Черкасов А.В.** Факторы, влияющие на расход топлива при обжиге клинкера // Сб. док. Межд. конф. Ч. 2.- Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1998. – С. 303-305.

81. **Альбац Б.С.** Определение рациональных параметров режима обжига в мощных вращающихся печах // Доклад на Всесоюзном совещании. – Усть-Каменогорск, 1975. – С. 40-52.

82. **Альбац Б.С., Быховский М.Л.** Пути регулирования гранулометрического состава клинкера в мощных вращающихся печах // Труды НИИ Цемент. – 1975. – Вып. 29. – С. 115-124.

83. **Альбац Б.С., Шеин А.Л.** Температурно-временной фактор при спекании порландцементного клинкера // Цемент. – 1992. – № 4. – С. 48-55.

84. Влияние формы факела на процесс горения топлива и теплообмен во вращающейся клинкерообжигательной печи / Инф.НИИЦемент, Вып. № 626. – М., 1970. – 6 с. – Пер. ст.: Seidel G. из журн.: Cement-Warпо-Gips. – 1968. – № 12 – P. 333-339.

85. **Захаров В.Н.** Современная информационная технология управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2000. – №1. – С. 70-78.

86. **Классен В.К.** Влияние различных факторов на расход тепла при обжиге клинкера // Цемент. – 1980. – № 8. – С. 8-11.

87. Практические рекомендации по управлению процессом обжига клинкера во вращающихся печах с использованием величины содержания CO<sub>2</sub> в отходящих газах и характера теплоизлучения корпуса печи. – Белгород, 1990. – 19 с.

88. **Фриджоне Д., Марра С.** Влияние длительности обжига на свойства клинкера. Шестой международный конгресс по химии цемента. Том 1. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 192-197.

89. **Трубаев П.А.** Моделирование и оптимизация технологических процессов производства строительных материалов: Учеб. пособие. – Белгород, 1999. – 178 с.

90. **Виленский Т.В., Хзмалян Д.М.** Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 315 с.

91. **Классен В.К.** Уменьшение теплотерь в горячей части печи эффективно снижает расход топлива // Цемент. – 1978. – С. 18-19.

92. **Померанцев В.В.** Основы практической теории горения. – Л.: Энергия, 1973. – 263 с.

93. **Хзмалян Д.М., Каган Я.А.** Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.

94. **Гражданский С.А., Кинстлер К.М.** Каким должен быть коэффициент избытка воздуха на печах размером  $4 \times 150$  м // Цемент. – 1969. – № 5. – С. 8-9.

95. **Лурье Ю.М.** Портландцемент – М.: Госстройиздат, 1959.

96. Предложения по экономии топлива на Белгородском цементном заводе / А.Ф. Матвеев, А.В. Черкасов, Е.А. Сычева и др. // Энерго- и ресурсосбережение в производстве цемента и других вяжущих веществ: Сб. докл. межд. конф. «Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений». – Белгород: Изд. БелГТАСМ, «Крестьянское дело», 1997. – Ч. 1. – С.104-106.

97. **Федорякин Б.Ф., Гринер И.К.** Об оптимальных условиях теплоиспользования и сжигания топлива в мощных вращающихся печах // Доклад на Всесоюзном совещании. – Усть-Каменогорск, 1975. – С. 74-86.

98. **Кафаров В.В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.

99. Система автоматической стабилизации процесса обжига во вращающейся печи  $4,5 \times 170$  м / Г.М. Гофман, Н.В. Гонебник, Л.П. Полетаева, Н.М. Базылева // Автоматизация производства цемента: Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1971. – Вып. 19. – С. 62-73.

100. **Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.

101. **Кацман А.Д., Шидлович В.И.** Об автоматизации процесса обжига клинкера во вращающихся печах  $5 \times 185$  м // Доклад на Всесоюзном совещании. – Усть-Каменогорск, 1975. – С. 114-118.

102. **Беседин П.В.** Исследование и оптимизация процесса обжига во вращающихся печах большой единичной мощности на примере производства цементного клинкера: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1979. – 23 с.

103. Математическое описание процесса обжига во вращающейся печи  $4,5 \times 170$  м. // Г.М. Гофман, Г.К. Круг, А.А. Косякин и др. // Научные сообщения НИИЦемент. Вып. 25. – М.: Стройиздат, 1971. – С. 85-94.

104. **Аверкин А.Н., Нгуен Х.** Использование нечёткого отношения моделирования для экспертных систем. – М.: ВЦ АН СССР, 1988. – 24 с.
105. Оптимизация работы вращающейся печи / Г.М. Гофман, Ю.И. Дешко, Л.П. Полетаева и др. // Цемент. – 1970. – № 3 – С. 9-11.
106. **Берштейн Л.Г., Кичкина Е.С.** Оптимизация процесса обжига клинкера во вращающихся печах  $5 \times 185$  м // Доклад на Всесоюзном совещании. – Усть-Каменогорск, 1975. – С. 93-99.
107. Изучение процесса образования обмазки и агломерации материала во вращающейся печи/ И.Н. Борисов, В.К. Классен, В.Е. Мануйлов и др. // Цемент. – 1993. – №2. – С.18-20.
108. **Бутт Ю.М., Тимашев В.В.** Зависимость вяжущих свойств клинкерных минералов от температуры их обжига и кристаллической структуры // Цемент. 1961. – №2. – С.17-23
109. **Вальберг Г.С., Гринер И.К., Мефедовский В.П.** Интенсификация производства цемента. – М.: Стройиздат, 1971. – 145 с.
110. **Дмитриев А.М.** Анализ работы и основные пути достижения проектной мощности вращающихся печей размером  $5 \times 185$  м // Освоение проектной мощности вращающихся печей размерами  $5 \times 185$  м. Материалы производственного совещания работников цементной промышленности на Усть-Каменогорском цементном заводе 22-24 мая 1975 г. – М. – 1975. – С. 15 – 30.
111. **Кичкина Е.С., Фрайман Л.С.** Эффективность работы колосниковых холодильников // Цемент. – 1983. – №3. – С.7-8.
112. Влияние угла раскрытия газового факела на положение зон печи и клинкерообразования / И.Г. Лугинина, А.Н. Лугинин, М.А. Шапошников и др // Цемент. – 1973. – № 6. – С. 6-10.
113. Руководство для технолога-наладчика цементной промышленности. Том 1. Часть 2.
114. Энерго- и ресурсосбережение в производстве цемента / В.К. Классен, В.И. Беляева, И.Н. Борисов, С.А. Перескок // Известия вузов. Строительство. – 1996. – №10, – С. 46-51.
115. **Классен В.К.** Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печью // Цемент и его применение. – 2004. – № 2. – С. 39-42.
116. **Гофман Г.М., Кулакова Н.А., Люсов А.Н.** Выбор критерия оптимизации процесса обжига // Автоматизация производства цемента: Тр. НИИЦемента. Вып. 19. – М.: Стройиздат, 1971. – С. 62-73.
117. **Гофман Г.М., Базылева Н.М., Ю.И., Полетаева Л.П.** Оптимизация процесса обжига с помощью алгоритма // Цемент. – 1970. – № 12 – С. 4.
118. Основы технологии приготовления портландцементных сырьевых смесей / С.И. Данюшевский, Г.Б. Егоров, Л.В. Белов, Ю.В. Никифоров. – Л.: Стройиздат, 1971. – 183 с.

119. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 164 с.
120. **Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я.** Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
121. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта: Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
122. **Кофман А.** Введение в теорию нечётких множеств: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
123. **Блишун А.Ф.** Сравнительный анализ методов измерения нечёткости // Изв. АН СССР. – 1988. – № 5 – С. 152-175.
124. Методические основы аналитического конструирования регуляторов нечёткого управления / В.М. Лохин, И.М. Макаров, С.В. Манько, Н.П. Романов // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2000. – № 1. – С. 56-69.
125. **Ухоботов В.И.** Введение в теорию нечётких подмножеств и её приложения. – Челябинск.: УрСЭИ АТ и СО, 2005. – 133 с.
126. **Рубанов В.Г., Филатов А.Г.** Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечёткое управление в технических системах: Учеб. пос. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – 171 с.
127. **Johansen T. A., Babuska R.** On multi-objective identification of Takagi-Sugeno fuzzy model parameters // 15th IFAC World Congress. – 2002. – 6 p. ([http://www.researchgate.net/publication/228832690\\_On\\_multi-objective\\_identification\\_of\\_Takagi-Sugeno\\_fuzzy\\_model\\_parameters/](http://www.researchgate.net/publication/228832690_On_multi-objective_identification_of_Takagi-Sugeno_fuzzy_model_parameters/))
128. **Леоненков А.В.** Нечёткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
129. **Гостев В.И.** Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.
130. **Гостев В.И., Кунах Н.И., Величко В.А.** О полноте правил нечёткого управления для фаззи-систем автоматического регулирования // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2005. – №2 (14). – С. 124-126.
131. **Штовба С.Д.** Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
132. **Усков А.А., Круглов В.В.** Интеллектуальные системы управления на основе методов нечёткой логики. – Смоленск, 2003. – 177 с.
133. **Усков А.А., Кузьмин А.В.** Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2004. – 143 с.
134. **Ухоботов В.И.** Избранные главы теории нечётких множеств: Учеб. пос. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2011. – 245 с.



135. **Balduing J. F., Pilsworth B. W.** A model of fuzzy reasoning through multi-valued logic and set theory // *Int. J. Manmachine Stud.* – 1979. – № 11 (3). – P. 351-380.

136. **Tong R. M.** Synthesis of fuzzy models for industrial processes – some recent results // *Int. J. General systems.* – 1978. – № 4. – P. 143–162

137. **Алиев Р.А., Панохов А.А., Абилов Ю.А.** Оптимальное управление установкой первичной переработки нефти на основе её нечёткой модели // *Изв. вузов. Нефть и газ.* – 1983. – №6. – С.80-83.

138. **Кудинов Ю. И.** Нечёткое моделирование и идентификация технологических процессов // *Измерение, контроль, автоматизация,* 1988. – № 2. – С. 77-85.

139. **Кудинов Ю. И.** Нечёткие системы управления // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика,* 1990. – № 5. – С. 196-206.

140. Нечёткие множества и теория возможностей. Последние достижения: Под ред. Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 391 с.

141. **Зак Ю.А.** Принятие решений в условиях нечётких и размытых данных: Fuzzy-технологии. – М.:Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 352 с.

142. **Дорохов И.Н., Марков Е.П., Кафаров В.В.** Особенности методологии нечётких множеств для описания физико-химических систем // *ТОХТ.* – 1980. – № 6. – С. 908-919.

143. Прикладные нечёткие системы: Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

144. **Ломанн В.** Разработка нечётких алгоритмов оперативного управления качеством полиэтилена высокого давления в двухзонном трубчатом реакторе. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МХТИ им. Менделеева, 1984. – 156 с.

145. **Tong R. M.** The Construction and Evaluation of Fuzzy Models // *Advances in Fuzzy Set Theory and Application.* – Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1979. – p. 559-576.

146. **Kickert W. J. M., Van Nauta Lemke H. R.** Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant // *Automatica.* – 1976. – Vol. 12, Issue 4. – p. 301-308.

147. **Mamdani E. H.** Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dinamic Plant // *Proc. IEEE.* – 1974. – Vol. 121. Issue 12. – p. 1585-1588.

148. **Максименко А.А.** Советующая система с нечёткой логикой по управлению мельницей помола клинкера: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Белгород, 2000. – 21 с.

149. **Holmblad L.P., Østergaard J.-J.** The FLS application of fuzzy logic // *Fuzzy Sets and Systems.* – 1995. – Vol. 70, Issues 2–3. – p. 135–146.

150. **Weingarten K.-H., Boes K.-H.** LINKman® Graphic Version 3.1 – Expertsystem für die Zement- und Kalkindustrie // *Zement-Kalk-Gips.*– 1988. – № 7. – P. 370-374.

151. **Kalkert P.** Regein mit Fuzzy-Logic // ZKG International. – 1998. – № 4. – P. A37-A38.
152. Effektive Automatisierungslösungen für die Zementindustrie / D. Löbbbering, J. Petruschke, W. Clemens и др. // ZKG. – № 9. – 1999. – P. 467-472.
153. **Юдин Д.А.** Интеллектуальная система мониторинга и оперативного управления вращающимися печами обжига с применением технического зрения // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Ч.3. – Белгород, 2010. – С. 320-324.
154. О новых подходах к исследованию вращающихся печей обжига клинкера как объектов управления / В.З. Магергут, А.Г. Бажанов, П.П. Гаевой и др // Материалы II Международного Конгрессе производителей цемента. Специальный выпуск журнала “Цемент Известь Гипс”. – 2009. – №4. – С. 118-122.
155. **Бажанов А.Г., Магергут В.З.** Нечёткие диаграммы поведения узлов для создания автоматизированной системы управления печью обжига цементного клинкера // Инновационные материалы и технологии: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Ч.1. – Белгород, 2011. – С. 23-27.
156. **Ващенко Р.А., Бажанов А.Г.** Реализация и испытание модели работы вращающейся печи на основе нечётких диаграмм поведения // Сб. тр. молодых учёных и специалистов Белгородской области. – Белгород: Изд-во Константа, 2012. – С. 66-73.
157. **Синюк В.Г., Котельников А.П., Устимов А.А.** Генератор персональных советующих систем по управлению печью обжига на базе нечёткой логики // Сб. док. I международного (IX Всесоюзного) Совещания по химии и технологии цементов. – М.: 1996. – С. 76-77.
158. **Берштейн Л.С., Коровин С.Я., Мелихов А.Н.** Проектирование инструментальных средств экспертных систем с нечёткой логикой // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, 1989. – № 2. – С. 152-160.
159. Экспертные системы: состояние и перспективы: Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1989. – 150 с.
160. **Зайченко Ю.П.** Нечёткие модели и методы в интеллектуальных системах: Учеб. пособие. – К.: «Издательский Дом «Слово», 2008. – 344 с.
161. **Яхъяева Г.Э.** Нечёткие множества и нейронные сети: Учеб. пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.
162. **Потапов Д.К.** Неклассические логики: Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ, 2006. – 108 с.

163. **Сараев П.В.** Идентификация нейросетевых моделей: монография. – / Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2011. – 94 с.
164. **Пальчунов Д.Е., Яхьяева Г.Э.** Нечёткие алгебраические системы // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: математика, механика, информатика. – 2010. – Т. 10. – № 3. – С. 76-93.
165. **Батыршин И.З.** и др. Нечёткие гибридные системы. Теория и практика: Под ред. Н.Г. Ярушкиной // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 208 с.
166. **Классен В.К.** Технология и оптимизация производства цемента. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.
167. Правила технической эксплуатации цементных заводов. Ч. 2. – М.: "ГЛАВВОСТОКЦЕМЕНТ", "ОРГПРОЕКТЦЕМЕНТ", 1980. – 374 с.
168. **Бутт Ю.М., Тимашев В.В.** Портландцементный клинкер. – М.: Стройиздат, 1967. – 303 с.
169. **Кравченко И.В., Рязин В.П., Фридман И.А.** О влиянии щелочей и гипса на процессы клинкерообразования // Труды НИИЦемента. Вып. № 21. – М., 1966. – С. 60.
170. **Бутт Ю.М., Тимашев В.В., Осокин А.П.** Механизм процессов образования клинкера и модифицирование его структуры // VI Международный конгресс по химии цемента. – 1976. – Т. 1. – С. 132-138.
171. **Юнг В.Н.** Основы технологии вяжущих веществ. – М.: Промстройиздат, 1951. – 547 с.
172. **Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П.** Термодинамика силикатов. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
173. **Eigen H.** Untersuchung der beiden Warmesysteme des Drehofens fur Portlandzement // Tonindustrie-Zeitung. – 1953. – В. 77, № 1/2. – С. 2-8.
174. **Борисов А.Н., Крумберг О.А., Фёдоров И.П.** Принятие решений на основе нечётких моделей. – Рига: Радио и связь, 1990. – 420 с.
175. **Алиев Р. А., Эфендиев И. Р., Абилов Ю. А.** Нечёткие модели и алгоритмы управления многостадийными ХТС в условиях неполной информации // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т.20, № 1. – С. 120-124.
176. **Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А.** Управление производством при нечёткой исходной информации. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
177. **Ходашинский И.А.** Технология идентификации нечётких моделей типа Синглтон и Мамдани // Труды VII международной конференции «Идентификация систем и задачи управления, SICPRO. – М., 2008. – С. 137-163.
178. **Ходашинский И.А.** Оценивание величин: подход на основе мягких вычислений // Информационные технологии. – 2006. – №4. – С. 13-21.
179. **Espinosa J., Wertz V.** Fuzzy logic, identification and predictive control. – London: Springer-Verlag, 2005. – 263 p.

180. **Деменков Н.П.** Нечёткое управление в технических системах: Учеб. пос. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
181. **Алиев Р.А., Бабаев А.М.** Реляционный подход к машинному представлению лингвистических продукционных правил и выводу решений // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – №5. – С. 21-24.

Научное издание

**Нусс Максим Владимирович  
Трубаев Павел Алексеевич  
Класен Виктор Корнеевич  
Коновалов Владимир Михайлович**

**СОВЕТУЮЩАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА  
ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

Монография

Подписано в печать 25.11.15. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 9,9. Уч.-изд. л. 10,7.

Заказ      Тираж 100 экз.      Цена.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова

г. Белгород, ул. Костюкова, 46