

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УДК 669.2.02/09**

**Исследование и совершенствование технологии производства обожженных  
анодов на АО «КЭЗ»**

# **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание академической степени магистра техники и технологии по  
специальности 6М070900 - Metallургия**

**Павлодар, 2014**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Допущен к защите:**

**Зав. кафедрой Химии и металлургии**

**К.х.н. \_\_\_\_\_ А.Н. Жакупова**  
(подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

## **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**На тему:** Исследование и совершенствование технологии производства обожженных анодов на АО «КЭЗ»

**по специальности** 6М070900 – «Металлургия»

**Магистрант \_\_\_\_\_ А.Б. Тасимов**  
(подпись)

**Д.т.н., профессор \_\_\_\_\_ И.К. Ибраев**  
(подпись)

**Павлодар, 2014**

## Содержание

	Введение	4
1	Современное состояние технологии обжига углеграфитовых изделий	5
1.1	Конструкция современной кольцевой печи открытого типа	5
1.2	Физико-химические процессы, обусловленные тепловой обработкой	24
1.3	Альтернативные подходы к обжигу анодов	26
1.4	Краткие выводы	26
2	Исследование механизма и кинетики процесса обжига	28
2.1	Теоретические основы формирования структуры углеграфитовой заготовки в процессе обжига	28
2.2	Влияние режимов обжига «зеленых» анодов на качество анодов	32
2.3	Миграция связующего при обжиге электродов	35
2.3.1	Влияние гравитации на перемещение связующего	36
2.3.2	Влияние скорости нагревания на перемещения связующего	37
2.3.3	Влияние градиента температур	38
2.4	Выводы по главе	41
3	Разработка математической модели процесса обжига	43
3.1	Решение задачи теплообмена между дымовыми газами и муфельным каналом печи	43
3.2	Решение задачи теплопроводности в теле заготовки	49
3.3	Математическое описание процесса удаления продуктов термического разложения органической массы	52
3.4	Моделирование изменения плотности заготовки при обжиге	54
3.5	Выводы по главе	54
4	Типичные дефекты обожженных анодных блоков	56
4.1	Основные виды трещин в теле анода	56
4.1.1	Угловые трещины	57
4.1.2	Вертикальные и горизонтальные трещины	57
4.1.3	Влияние теплового удара	59
4.2	Расчет растягивающего напряжения вокруг ниппельных гнезд	59
4.3	Выводы и рекомендации	62
5	Перспективы анодного производства	65
5.1	Применение инструментов вычислительной гидрогазодинамики	65
5.2	Замена термопар оптическими пирометрами	66
5.3	Четыре или шесть систем огня на печь вместо стандартных трех	67
5.4	Автоматизация крановых работ	68
5.5	Предотвращение налипания пересыпочногo материала на аноды	69
5.6	Усовершенствование конструкций	71
5.7	Установка рекуперативного воздухонагревателя в магистрали отходящих газов	71
5.8	Усовершенствования систем технологического контроля	72
5.9	Выводы и рекомендации	74
	Заключение	76
	Список использованной литературы	78

## Введение

Диссертация магистра металлургии по теме Исследование и совершенствование технологии производства обожженных анодов на АО «КЭЗ» содержит 83 страницы, 61 рисунок, 98 литературных источника.

**Общая характеристика работы.** Производство качественного алюминия методом электролиза напрямую связано с анодным производством. Значительную часть себестоимости выплавки алюминия занимает производство анодов. По существующим технологиям с использованием предварительно обожженных анодных блоков в электролизерах, расходуется 0,4-0,5т анода на тонну алюминия. Данное производство нуждается в качественных анодах, от которых зависит чистота и себестоимость выплавляемого металла. Задачи по совершенствованию и оптимизации производства анодов остаются актуальными уже много лет.

**Актуальность исследования.** Применение углеграфитовой продукции в черной и цветной металлургии определяет эффективность пирометаллургических процессов в целом [1,2].

Одним из важнейших переделов производства углеграфитовой продукции, определяющим качественные и экономические показатели, является обжиг в многокамерных печах открытого типа.

**Цель работы:** Повышение эффективности технологии обжига углеграфитовых изделий. Исследование и совершенствование технологии обжига в многокамерных печах обжига открытого типа.

**Задачи исследования:** Изучить влияние параметров процесса производства на свойства обжигаемых электродных изделий. Решение проблемы связанной со стабилизацией процесса обжига.

**Объектом исследования является:** Кольцевая многокамерная печь обжига анодов открытого типа Riedhammer в цехе обжига завода производства обожженных анодов на АО «КЭЗ»

**Научная новизна исследования:** Разработка математической модели процесса обжига в многокамерной печи обжига. Внедрение прогрессивных решений в области теплового баланса печи и оптимизации технологического процесса.

**Практическая значимость исследования:** Усовершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных обжиговых печах открытого типа. Предложено использование тепла отходящих газов для подогрева рабочего воздуха горелочного оборудования.

**Апробация работы.** Положения диссертационной работы доложены автором и обсуждены на научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» г. Екатеринбург, Россия.

**Публикации:** по основным результатам диссертационной работы опубликована статья в научном журнале «Магистрант» г. Краснодар, Россия.

## **1 Современное состояние технологии обжига углеграфитовых изделий**

В начале данного раздела приводятся основные конструкции современной кольцевой печи открытого типа. После этого объясняются физико-химические процессы, вызванные тепловой обработкой.

### **1.1 Конструкция современной кольцевой печи открытого типа**

В настоящее время кольцевая печь открытого типа (Рисунок 1) считается последним словом техники в обжиге анодов.

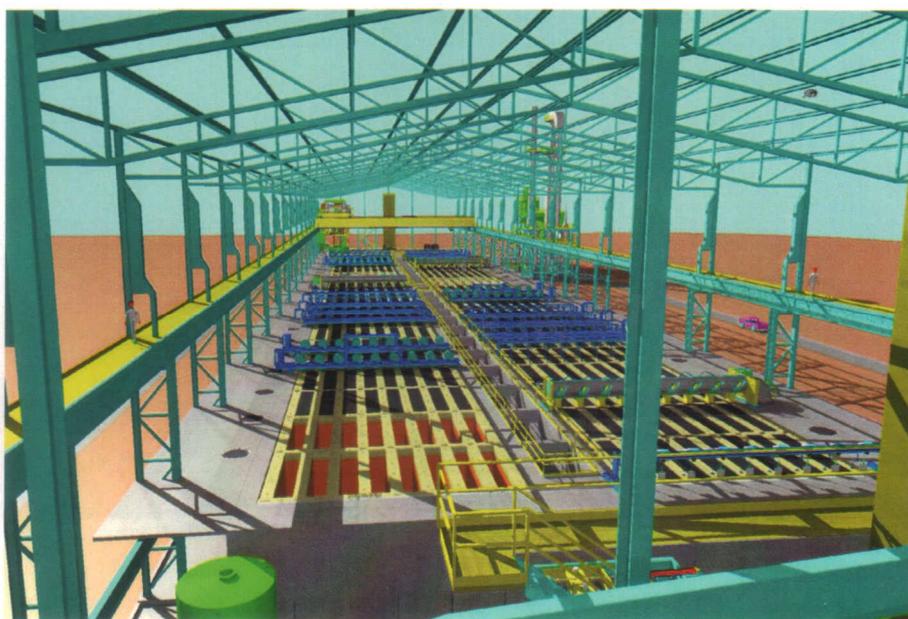


Рисунок 1 - Изображение кольцевой печи открытого типа

Печи открытого типа состоят из «камер» (до 72), в каждой из которых находится ряд «кассет» - как правило, от пяти до девяти – в которые загружаются аноды. Количество кассет ограничено главным образом, размерами здания и мощностью крана. При типовых анодах (т.е. анодах весом от 1000 до 1200 кг) и девяти кассетах ширина здания составляет около 40 метров; обычно такая ширина является максимальной. Между кассетами находятся газоходы из огнеупорного материала. Камеры отделены друг от друга поперечными перегородками (Рисунок 2). Обычно 14 - 18 камер приходится на одну зону огня или «огонь» - производственную единицу печи кольцевого типа. Как правило, печи работают с двумя или тремя огнями; вместе с тем существуют печи с одним огнем, и до шести огней.

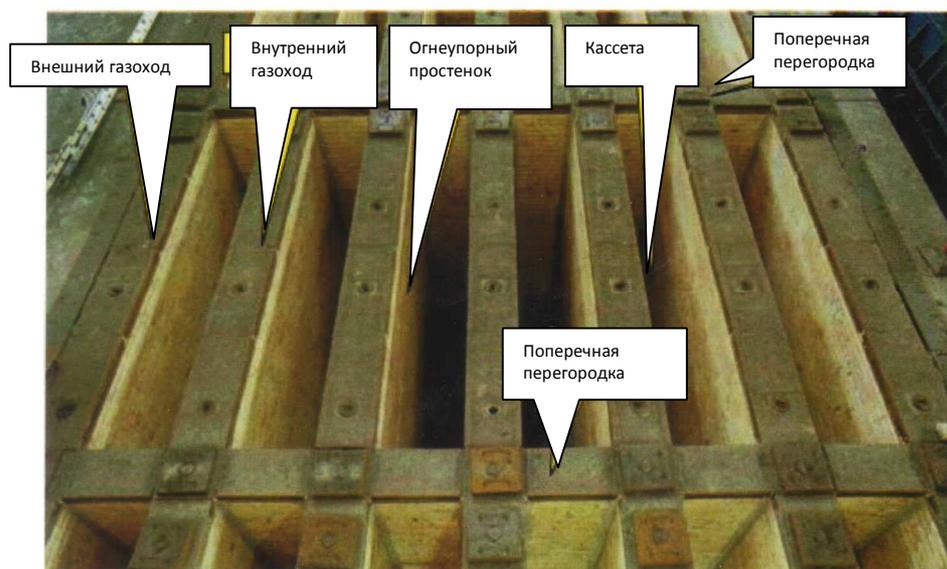


Рисунок 2 - Элементы печи с указанием кассет, газоходов и перегородок

Элементы конструкции газоходов и поперечных перегородок. Газоход состоит из двух стенок, выполненных из огнеупорных материалов с углублением между ними для прохода газов сгорания.

Направляющие перегородки и кирпичи для перевязки кладки в газоходах (Рисунок 3) направляют газы сгорания и служат для обеспечения механической прочности. В верхней части газоходов имеются отверстия (лючки) для установки горелок или датчиков температуры и давления. В верхней части поперечных перегородок также имеются отверстия, предназначенные для операций с охлаждающим воздухом и газами сгорания.

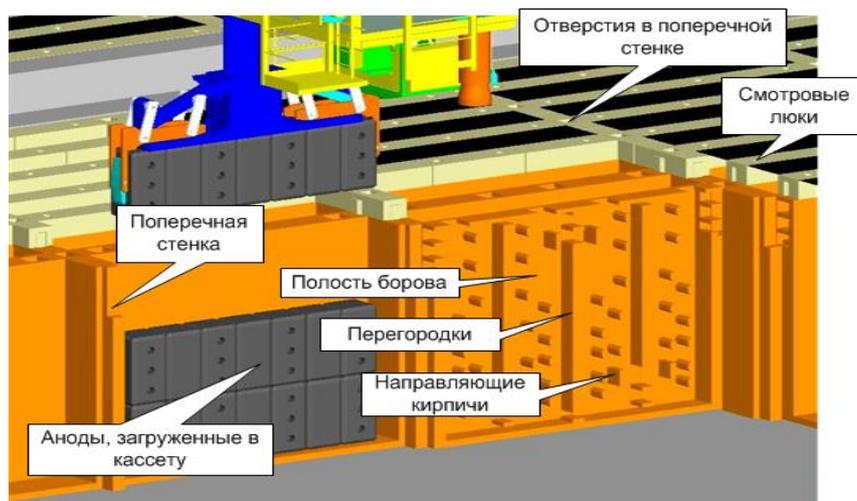


Рисунок 3 - Газоход с направляющими перегородками и кирпичами для перевязки, кассета с анодами

Принцип работы печи кольцевого типа. По сравнению с печью туннельного типа, в которой зона обжига является стационарной, а изделия

проходят через туннель, в печи кольцевого типа изделия остаются на месте, перемещается зона обжига. Для этого оборудование обжига должно быть подвижным. Такое оборудование должно перемещаться с зоной обжига с определенной «скоростью» или «продолжительностью цикла», как правило, 24 - 32 часа на камеру. Оборудование печи обжига на один «огонь» состоит, минимум, из следующих элементов (Рисунок 4):

- 1 вытяжная раampa, соединяющая горелотопочную систему с системой отвода газов;
- 1 измерительная раampa, оборудованная датчиками температуры и разрежения;
- 2 - 4 горелочных моста, работающих на газе или на жидком топливе;
- 1 - 2 охладителя.

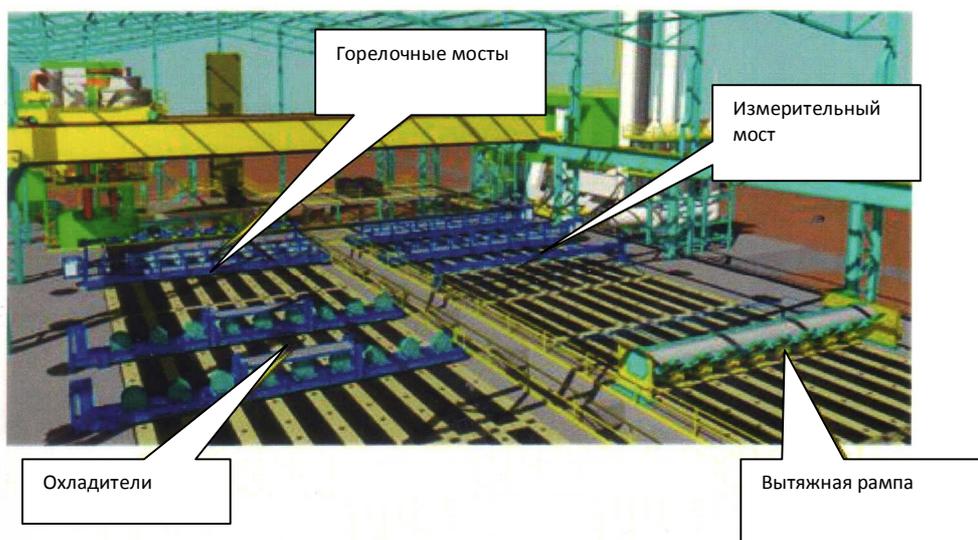


Рисунок 4 - Оборудование печи обжига

На Рисунке 5 приведен пример типового размещения оборудования с соответствующим распределением температуры в газоходах.

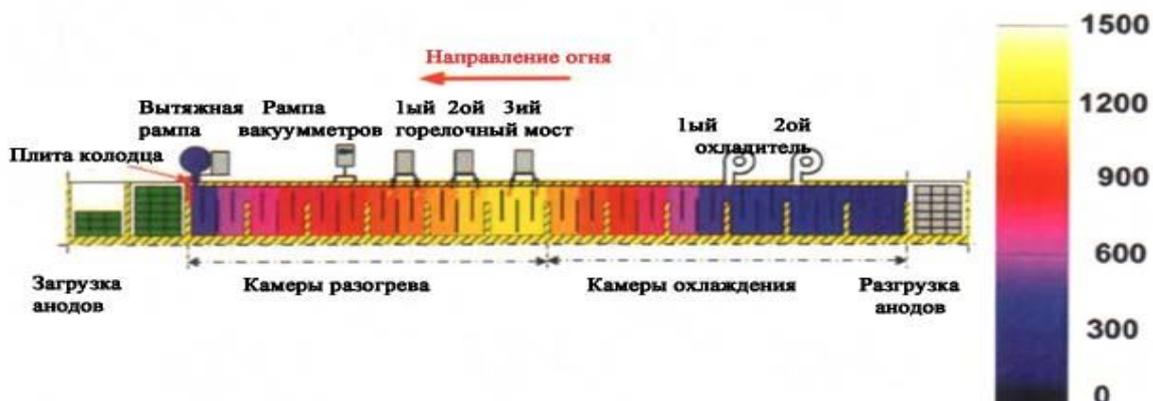


Рисунок 5 - Типовое расположение оборудования на один огонь с соответствующими температурами

В ходе технологического процесса воздух горения засасывается в печь из зоны охлаждения созданием разрежения в печи через вытяжную рампу. Разрежение создается вентиляторами, соединенными с трубой для отвода газов в атмосферу (Рисунок 6). На всех современных установках вентиляторы входят в состав установок по очистке отходящих газов. Наличие достаточного разрежения является обязательным для работы печи обжига анодов. Без постоянного наличия разрежения работа печи и производство анодов невозможно. Вентилятор показан на рисунке 6 и является «движущей силой» печи.

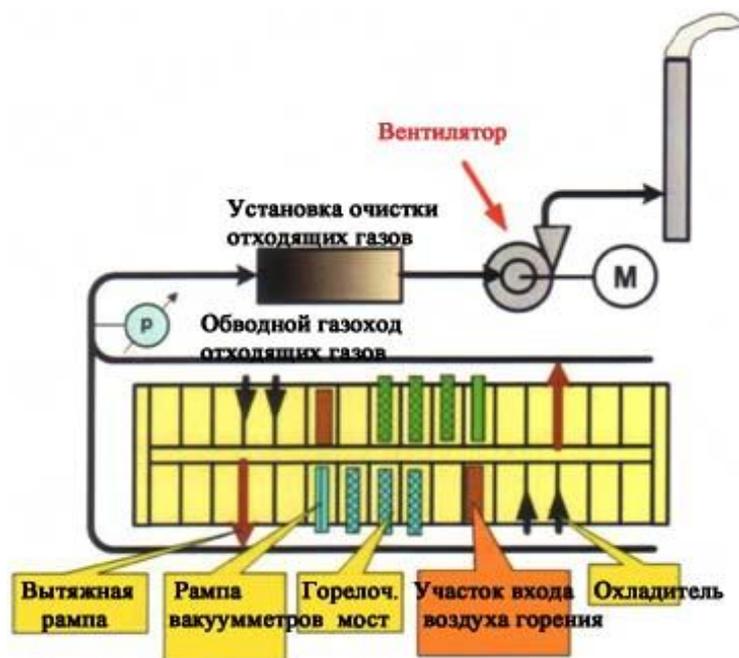


Рисунок 6 - Обводной газоход и система разрежения

Система трубопроводов для сбора отходящих газов обычно называется обводным (кольцевым) газоходом отходящих газов. В большинстве случаев такое название некорректно, т.к. две «ветви» соединены только с одной стороны печи. Таким образом, фактически «кольцо» представляет собой «U»-образную конструкцию. Для правильного функционирования печи особое значение имеет постоянное поддержание достаточного разрежения на выходном конце обводного газохода (на рисунке 6 – точка «р»). В зависимости от конструкции значение разрежения может составлять от 12 до 15 гПа. На обводном газоходе отходящих газов на каждой камере имеется стояк, расположенный на одной прямой с поперечной перегородкой (рисунок 7).

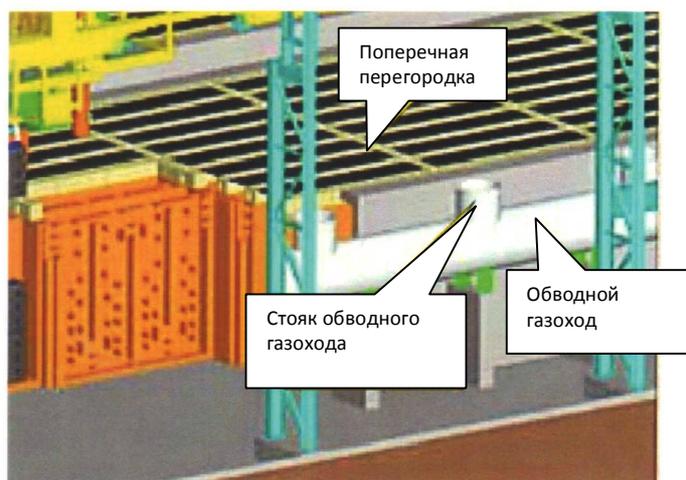


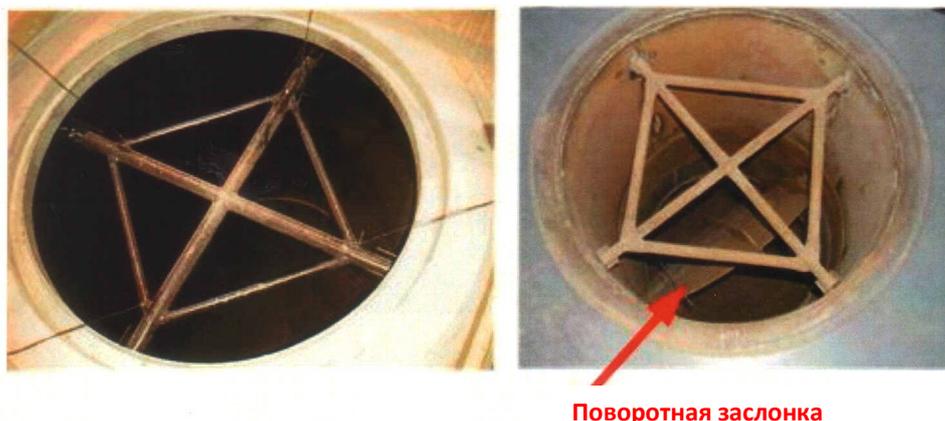
Рисунок 7 - Стояк обводного газохода, расположенный на одной прямой с поперечной перегородкой

Когда стояк не используется, сверху он закрывается металлической крышкой, которая, в свою очередь обычно накрывают гибким резиновым листом (рисунок 8) для предотвращения подсосов «паразитного» воздуха.



Рисунок 8 - Крышка обводного газохода с резиновым листом на неиспользуемом стояке обводного газохода

Из соображений безопасности каждый стояк обводного газохода оборудуется стальной рамой (Рисунок 9, слева). При техническом обслуживании рама снимается. Иногда под рамой устанавливается поворотная заслонка (Рисунок 9, справа). Поворотная заслонка осложняет установку, но при этом обеспечивает преимущество существенного сокращения подсасываемого воздуха при перемещении вытяжной рампы. Соединение между печью и системой отходящих газов осуществляется снятием соответствующих крышек на огневых простенках или поперечных перегородках и со стояков обводного газохода и установкой вытяжной рампы в это положение (рисунок 10).



Поворотная заслонка

Рисунок 9 - Стояк обводного газохода со стальной рамой в качестве предохранительного устройства. Без поворотной заслонки (слева) и с поворотной заслонкой (справа).

На каждый огневой простенок приходится по патрубку центральной собирающей трубы с шиберной заслонкой или (поворотной) заслонкой для регулирования разрежения.



Рисунок 10 - Вытяжная ramпа, соединяющая отдельные газоходы с обводным газоходом. На каждой ветви – шиберная заслонка для регулирования тяги

На рисунке 11 представлен вид кольцевой печи горизонтального потока с открытым верхом. Печь называется «с открытым верхом» из-за отсутствия крышек из огнеупорных материалов на камерах. В отличие от данной печи, печи закрытого типа, оборудованы крышками на камерах из огнеупорного материала. В печах открытого типа аноды изолируются от воздействия окружающего воздуха слоем «пересыпки», обычно представляющей собой прокаленный нефтяной кокс.

Печь открытого типа также называется печью горизонтального потока с открытым верхом, так как общее направление потока газов сгорания в каждой камере (рисунок 12) горизонтальное. Это еще одно отличие от печи закрытого типа, в которой поток газов сгорания в каждой камере направлен строго вертикально; поэтому печи закрытого типа также называют печами вертикального потока.

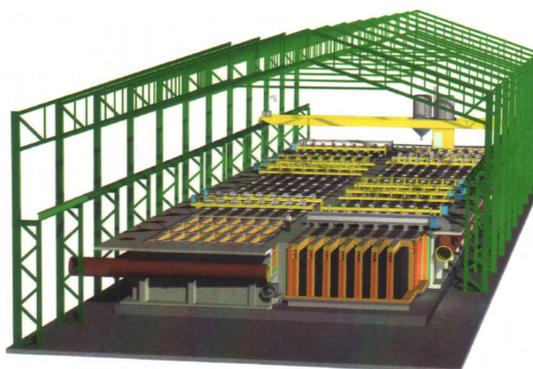


Рисунок 11 - Изображение кольцевой печи открытого типа

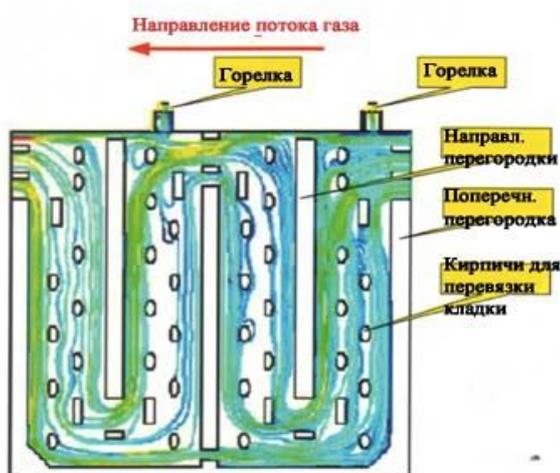


Рисунок 12 - Поток газа в каждой камере

Расположение камер. В современных печах загрузка производится краном сверху, а камеры расположены в два параллельных ряда. На самом деле печь состоит из двух отдельных сторон, соединенных по концам так называемым переходным каналом (Рисунок 13).

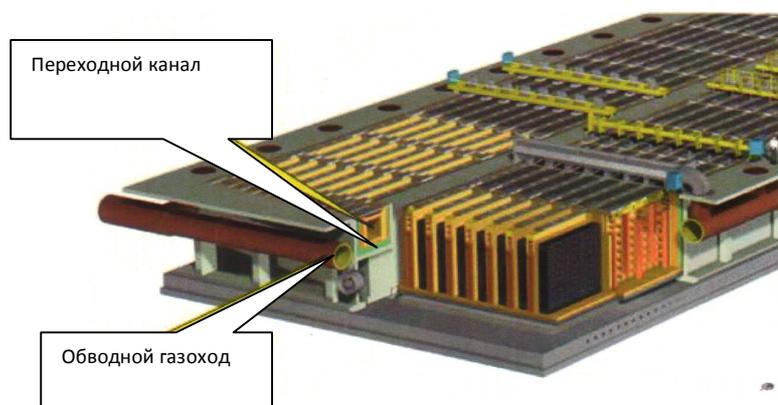


Рисунок 13 - Переходной канал

Переходной канал является основной причиной существенных возмущений процесса обжига. Переходной канал действует как сток

тепла. Вследствие этого температура газов сгорания, входящих в первую и вторую камеру после стока тепла значительно ниже, чем в других камерах. Для компенсации тепловых потерь на переходной канал иногда устанавливают дополнительные горелки. При этом установка дополнительных горелок не должна приводить к дефициту кислорода в области сгорания летучих веществ пека. В качестве варианта иногда увеличивается общее время разогрева в переходном канале установкой дополнительной нагревательной камеры для нагрева переходного канала. Дополнительное время позволяет компенсировать потери тепла.

В камерах между вытяжной рампой и передним горелочным мостом температура регулируется тягой в каждом газоходе с помощью клапанов в каждой патрубке вытяжной рампы. В переходном канале газы сгорания из всех газоходов сливаются и регулирование отдельными тягами в камерах, находящихся до переходного канала, становится невозможным, при положении вытяжной рампы на первой или второй камере после переходного канала.

Опыт показывает, что обеспечить правильную тепловую обработку первой и второй камеры после переходного канала достаточно сложно. Без проведения специальных мероприятий качество анодов, полученных в этих камерах, будет ниже стандартного.

Энергоснабжение. Энергия подается на печь из двух источников:

- энергия, поступающая от горелок, установленных на горелочных мостах, и работающих либо на природном газе, либо на жидком топливе (рисунок 14, слева). Таким образом подается около 50% - 60% всей отдачи энергии печи;

- энергия, поступающая от летучих веществ, выделяемых из пека, применяемого в качестве связующего при производстве зеленых анодов (рисунок 14, справа). Таким образом поступает около 40% - 50% всей отдачи энергии печи. Сгорание летучих веществ пека обычно наблюдается на второй и третьей камерах до вытяжной рампы.

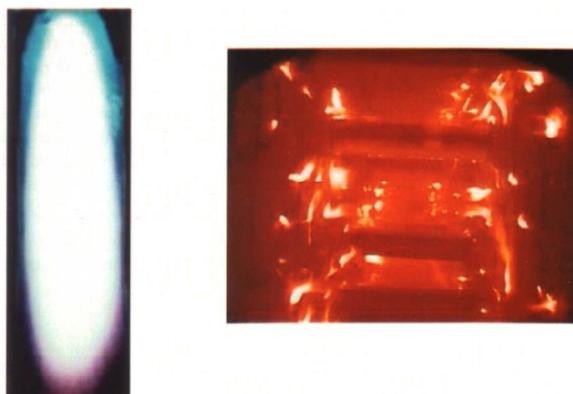


Рисунок 14 - Слева: газовый факел в газоходе. Справа: сгорание летучих веществ пека в газоходе

Для обеспечения всасывания летучих веществ пека в углубления газохода при строительстве огнеупорных простенок мертель наносится только на горизонтальные поверхности огнеупорных кирпичей. Иногда для обеспечения достаточной газовой проницаемости огнеупорных простенок в вертикальные зазоры между огнеупорными кирпичами вставляется картон (рисунок 15). Данный подход должен применяться ко всем огнеупорным простенкам, за исключением внешних стенок огнеупорных простенок. Через эти стены летучие вещества пека не проходят. Для максимального сокращения подсосов воздуха огнеупорные простенки строятся обычным образом, т.е. без открытых зазоров (рисунок 16).

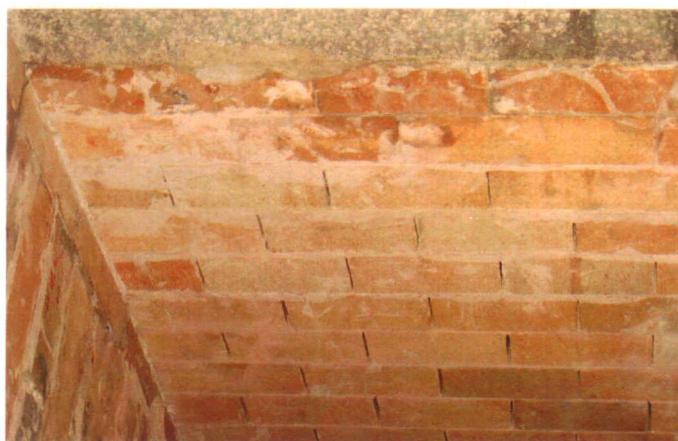


Рисунок 15 - Элемент внутреннего огнеупорного простенка с открытыми вертикальными зазорами между кирпичами для прохождения летучих веществ пека

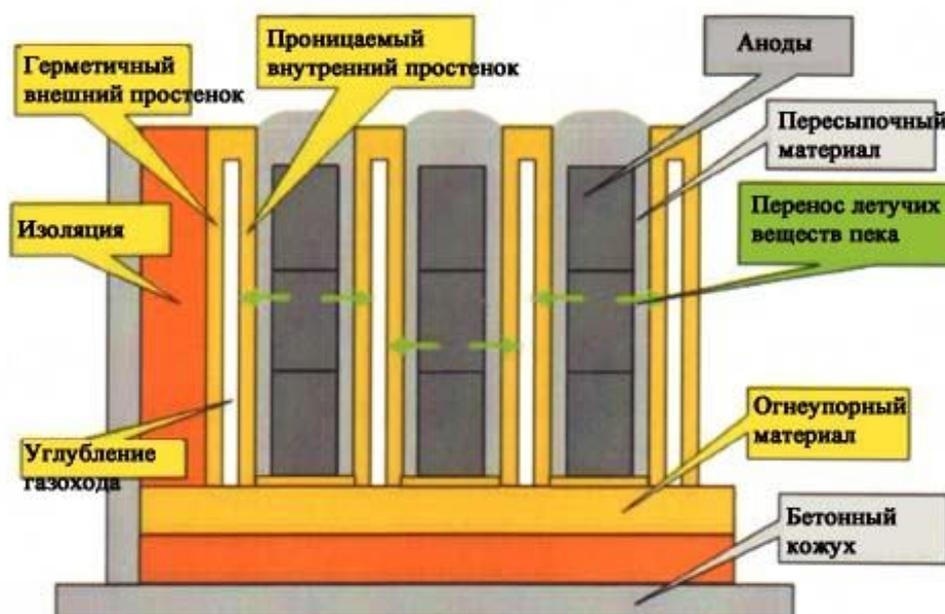


Рисунок 16 - Конструкция огнеупорного простенка, подсос воздуха из внешнего простенка и перенос летучих веществ пека в области нагрева

Содержание огнеупорных материалов в ненадлежащем состоянии может привести к недостатку (нежелательному) количества энергии, поступающей при сгорании материала пересыпки (Рисунок 17).



Рисунок 17 - Сгорание пересыпочногo материала в результате содержания огнеупорных материалов ненадлежащем состоянии

Перемещение зоны обжига и продвижение огня. Зона огня смещается в направлении вытяжной ramпы. «Скорость» представляет собой функцию приложенного разрежения. Как правило, разрежение устанавливается на таком уровне, что огонь перемещается на длину одной камеры за время, равное 24 -32 часам и называется «циклом обжига» или «скоростью огня». Производительность печи определяется по уравнению 1:

$$P = 8760 \cdot Q \cdot n / t \quad (1)$$

где: 8760 – количество часов в год;

P – продукция в тоннах в год;

Q – загрузка анодов на камеру в год;

n – количество огней;

t – время цикла, часы.

В современных печах обычно используется схема, в которой зону нагрева образует шесть-семь камер. На старых печах иногда применяется схема с разогревом четырех камер. Т.к. общее время, необходимое для правильного обжига анодов, одинаково, такие печи работают с более продолжительным циклом обжига, например 36-40 часов.

Производительность обратно пропорциональна времени цикла, следовательно, чем дольше время цикла, тем меньше производительность на огонь. Чтобы компенсировать это явление необходимо увеличить количество огней.

Независимо от количества камер на разогреве, для данного количества огней производительность печи – это функция только загрузки анодов и времени цикла. Поскольку в большинстве случаев загрузка анодов – величина постоянная, время цикла становится основным фактором производительности печи. Ограничивающими факторами являются допустимая скорость максимального нагрева и

время, необходимое для разогрева твердых веществ печи, т.е. огнеупоров, пересыпки и зеленых анодов.

Смена огня. В ходе технологического процесса оборудование печи перемещается на одну камеру на каждом цикле огня. Данная операция называется «смена огня» или «продвижение огня». Фактически все эти названия некорректны. В огне ничего не изменяется, и необходимости в перемещении огня нет. Огонь движется сам по себе под действием разрежения. Перемещать необходимо оборудование вслед за огнем. Корректно было бы назвать данную операцию «Продвижение оборудования»; но некорректные термины используются настолько широко, что внедрение правильного термина уже маловероятно. Опыт показывает, что «пик» выделения летучих пека чаще всего наблюдается в первой половине цикла огня.

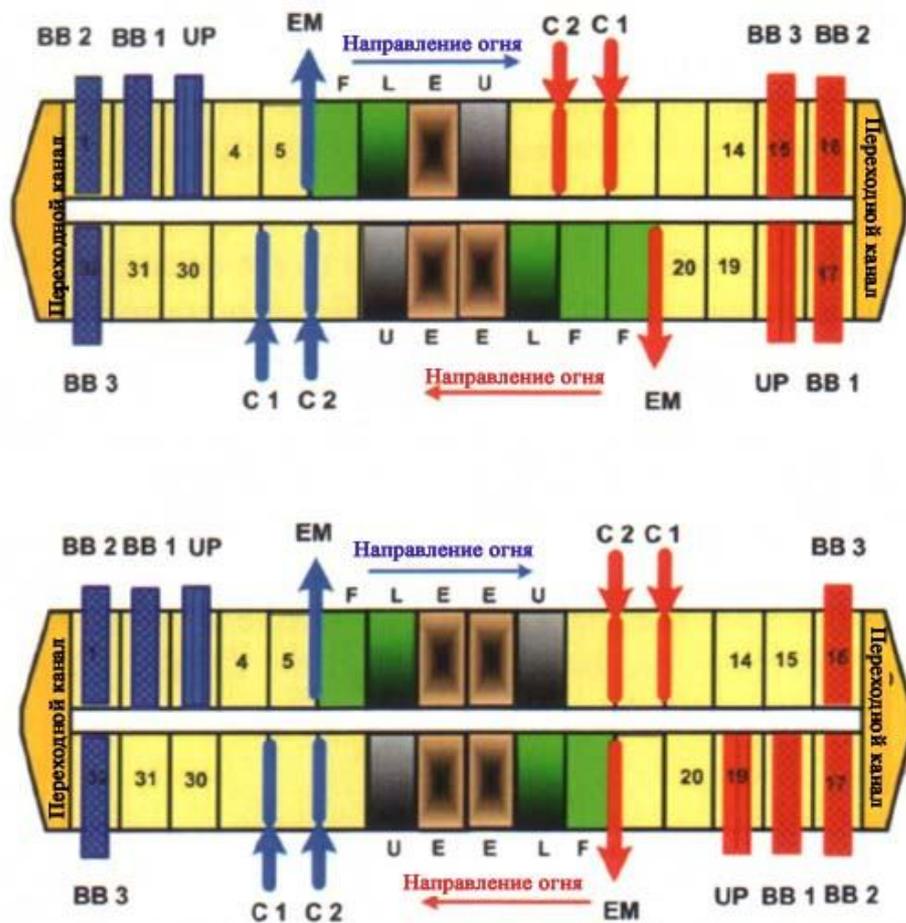


Рисунок 18 - Схема расположения оборудования до и после смены огня на красном огне. EM = Вытяжная рампа; UP = Рампа вакуумметров; BB = Горелочный мост; C = Охладитель; U = Разгрузка; E = Пустой; L = Загрузка; F = Полный

Для предотвращения одновременного выброса слишком большого количества смолистых перемещение огня необходимо производить с временным сдвигом. Как правило, в печи с двумя огнями, работающей с

«временем цикла» 26 часов, перемещение огня производится с интервалом в 13 часов. На рисунке 18 показана печь до и после перемещения «красного огня».

Обозначения огня посредством соответствующей окраски части оборудования вместо использования нумерации (огонь 1, огонь 2) иногда используется для предотвращения смены огня на «неправильном» огне.

На рисунке 19 представлена типовая последовательность смены огня.

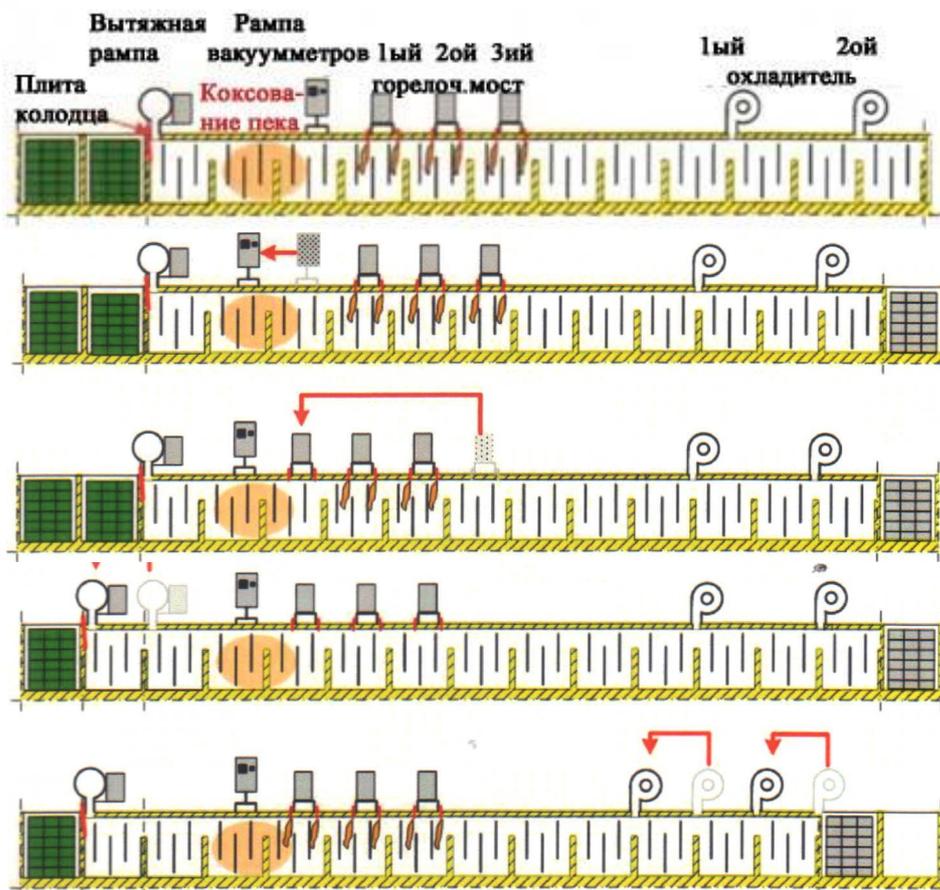


Рисунок 19 - Типовая последовательность смены огня.

Смена огня производится таким образом, чтобы свести до минимума возмущения технологического процесса. Например, при перемещении заднего горелочного моста два других горелочных моста продолжают работать. Подача топлива прекращается на все три горелочных моста только во время перемещения вытяжной рампы.

Влияние времени на изменение температуры в газоходе и в кассете показано на рисунке 20 совмещением двух «снимков», сделанных с интервалом в 10 часов. Необходимо обратить внимание, что кривая температуры анода сдвинута влево. Кривая температуры анода, однако, поднята в области разогрева и понижена в области охлаждения.

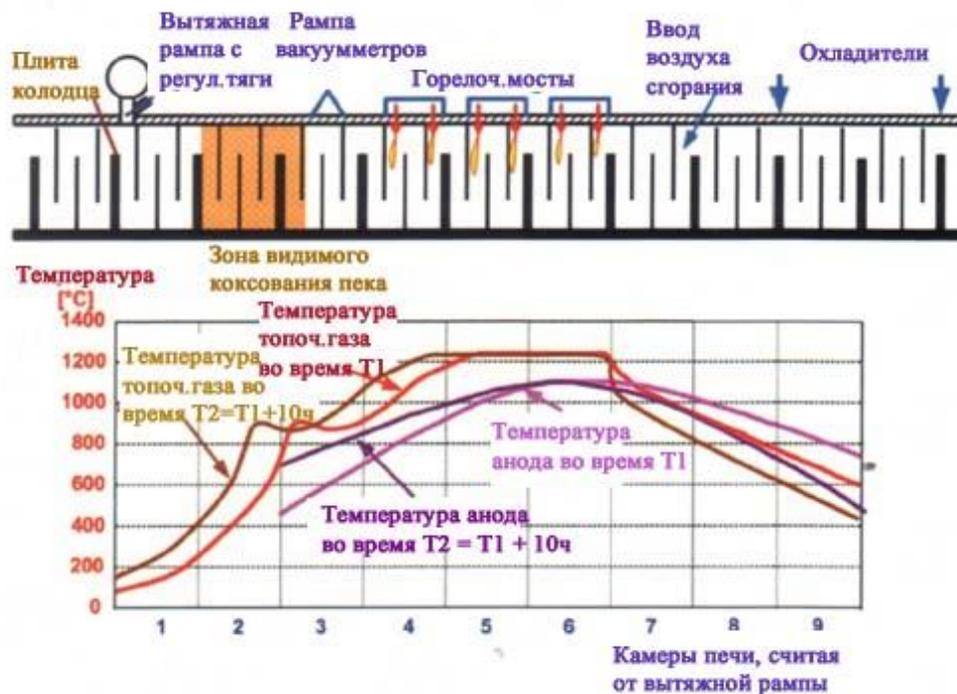


Рисунок 20 - Температура газа в газоходе и «снимки» температуры анода, сделанные с интервалом в 10 часов

Иногда используется дополнительное оборудование, например, запасная вытяжная рампа или «рампа вакуумметров контроля нулевой точки» (рисунок 21). Если на стояках установлены поворотные заслонки (рисунок 9, справа), при наличии запасной вытяжной рампы установку вытяжной рампы можно произвести до перемещения огня. Активирование «новой» камеры в зоне нагрева будет в таком случае осуществляться просто открытием поворотной заслонки на стояке обводного газохода, находящемся после вытяжной рампы, и закрытием заслонки на стояке обводного газохода, находящемся до вытяжной рампы.

Иногда перед задним горелочным мостом устанавливается «рампа вакуумметров контроля нулевой точки». В этом случае сигнал о (пониженном) давлении используется для регулирования мощности первого охладителя, называемого в настоящее время «воздуходувкой» (рисунок 21). Необходимо отметить, что возможности регулирования разрежения с помощью воздуходувки ограничены. Для правильного функционирования нулевая точка разрежения должна находиться перед задним горелочным мостом. Данное условие ограничивает мощность воздуходувки.

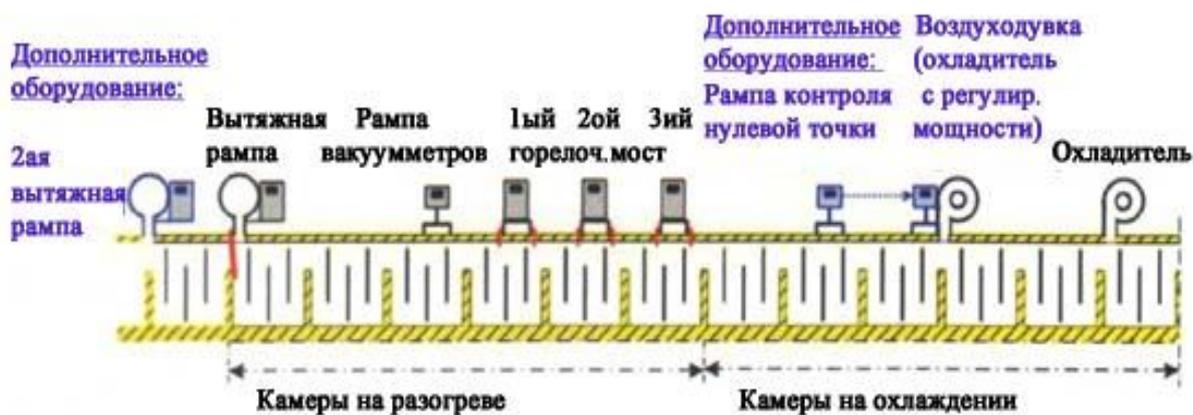


Рисунок 21 - Дополнительное оборудование обжига (отмечено синим цветом)

Операции с анодами и пересыпочным материалом. Загрузка зеленых анодов в кассеты и выгрузка обожженных анодов из кассет осуществляется с помощью крана (рисунок 22). Для повышения производительности иногда используются краны с двумя или даже тремя захватами.

После установки зеленых анодов в кассету пустое пространство кассеты заполняется пересыпочным материалом, чаще всего прокаленным нефтяным коксом. Пересыпочный материал удерживает аноды и предотвращает их деформацию при температурах выше температуры размягчения пека. Верхний слой отделяет пакет анодов от окружающего воздуха и действует как изолятор, снижающий до минимума потери тепла. После обжига пересыпка удаляется с помощью вакуумного устройства, установленного на кране (рисунок 23).

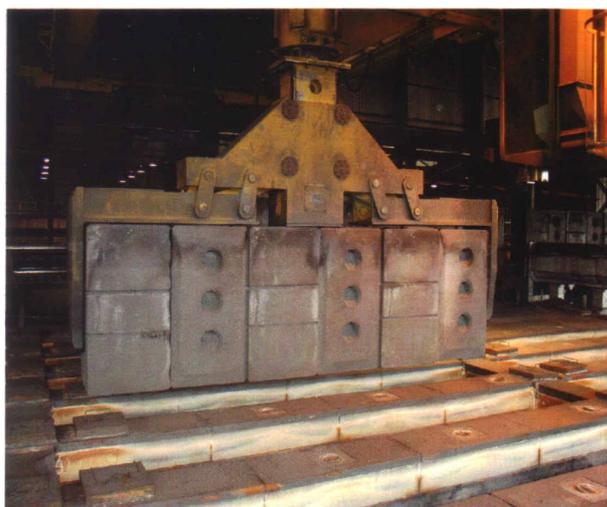


Рисунок 22 - Выгрузка обожженных анодов из кассеты с помощью крана



Рисунок 23 - Устройство отсоса пересыпки, установленное на кране печи обжига

Охлаждение анодов (рисунок 24). Печь выступает в качестве теплообменника между топочными газами с одной стороны, и материалом, находящимся в кассетах (аноды и пересыпка), с другой стороны. На участке охлаждения окружающий воздух подается в газоходы с помощью охладителей. Энергия от горячих анодов передается через пересыпку и огнеупорные простенки в углубления в газоходах. Часть нагретого воздуха охлаждения выделяется в здание печи через открытые лючки. Еще часть энергии затягивается зоной обжига и выступает в качестве воздуха горения. «Предварительный» нагрев этого воздуха в зоне охлаждения повышает общий энергетический КПД. Выгрузка анодов производится, как правило, в диапазоне температур анодов 150 - 350°C.

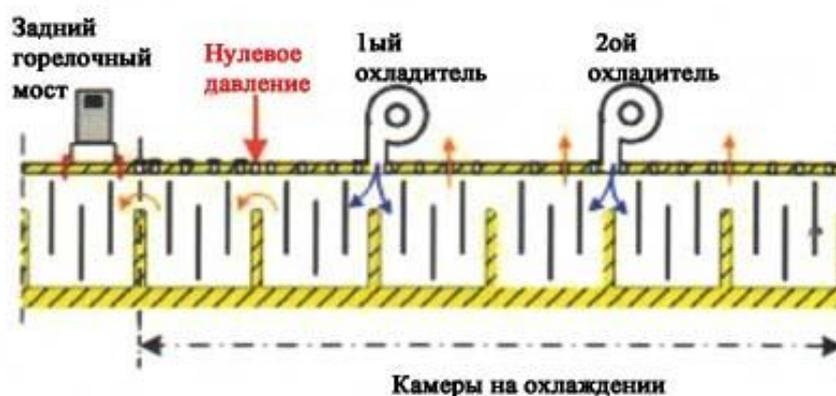


Рисунок 24 - Поток воздуха в зоне охлаждения

Процесс горения. Общий обзор свойств печи, связанных с процессом горения приведен на рисунке 25. Следует отметить следующие особенности:

- существенное падение давления за шибберными заслонками на вытяжной рампе. Непосредственно перед вытяжной рампой уровень разрежения находится в диапазоне от 100 Па до 200 Па. Для правильного регулирования разрежение в обводном газоходе должно поддерживаться в диапазоне 12 -15 кПа;

- снижение содержания кислорода воздуха сгорания на участке разогрева. На самом деле, на большинстве печей поддержание достаточного количества кислорода на участке сгорания летучих веществах пека представляет собой самую сложную задачу.

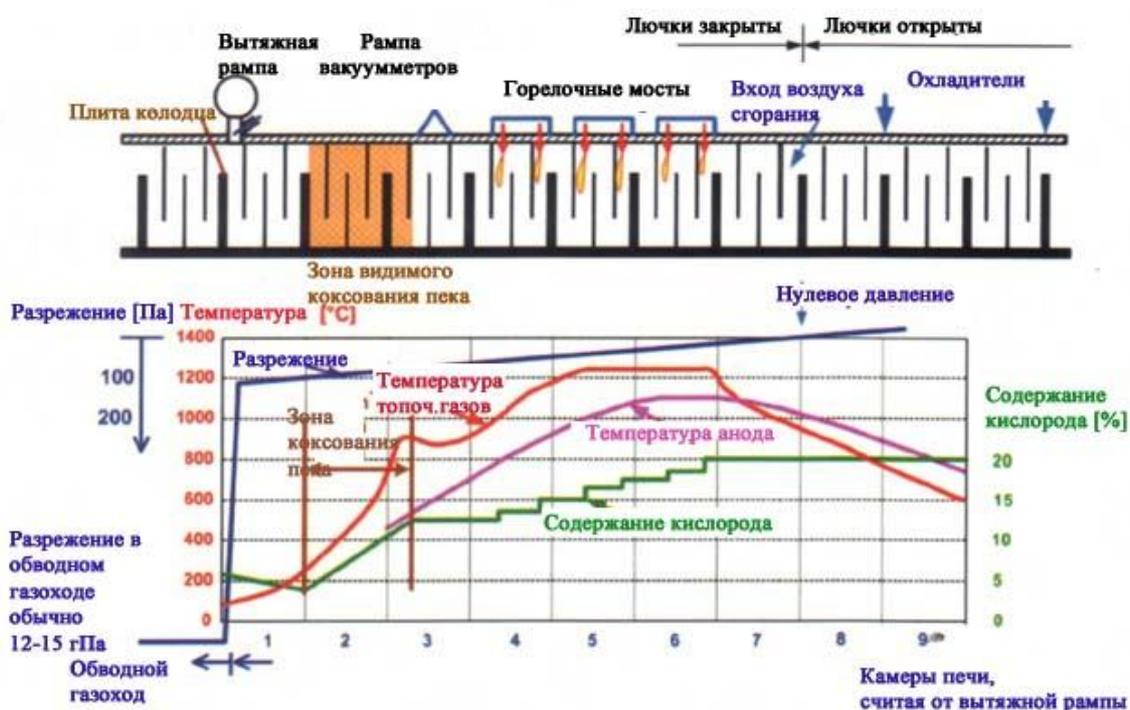


Рисунок 25 - Общий вид типовой ситуации с температурой анодов, температурой топочного газа, разрежением и содержанием кислорода в топочном газе

Дефицит кислорода приводит к неполному сгоранию и образованию сажи. Образование сажи наблюдается в углублениях в газоходах на участке сгорания летучих пека (рисунок 26).

Образование сажи может быть уменьшено посредством поднятия термпар, установленных в первой камере на разогреве (рисунок 27). Отложения сажи также наблюдаются в вытяжной рампе и в стояке обводного газохода. Образование сажи всегда является проблемой, т.к. данный материал существенно повышает риск пожара в вытяжной рампе, в обводном газоходе и даже в установке очистки отходящих газов. При

обнаружении сажи необходимо внести изменения в технологию производства с целью предотвращения ее образования.

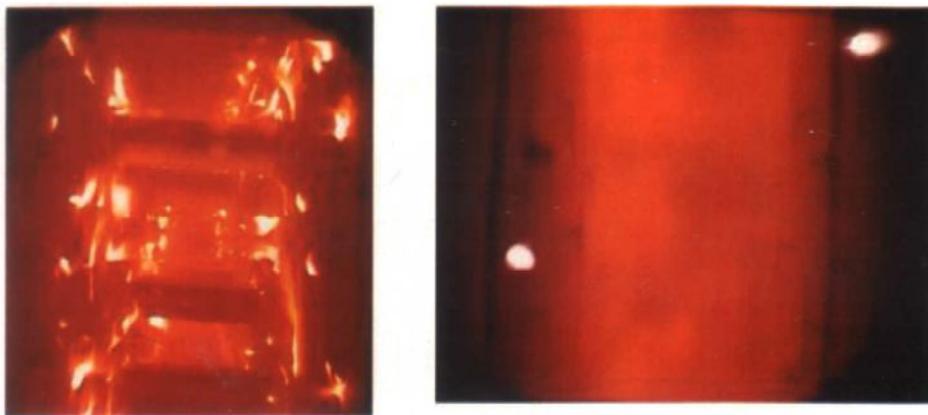


Рисунок 26 - Сгорание летучих пека; полное сгорание (слева), образование сажи (справа).



Рисунок 27 - Слева: отложения сажи на термопаре в первой камере на разогреве. Справа: отложения сажи в стояке обводного газохода.

Некачественная конструкция и неудовлетворительная технология производства могут привести к выделению летучих пека в углубления газохода до достижения температуры возгорания. Блестящие черные и вязкие смолистые отложения наблюдаются на термопарах в первой камере на разогреве (рисунок 28). Что касается образования сажи, для снижения риска пожара настоятельно рекомендуется изменить параметры режима работы таким образом, чтобы предотвратить наличие несгоревших смолистых.



Рисунок 28 - Отложения смолистых на термопаре в первой камере на разогреве

Измерение температуры. Правильность измерения температуры имеет первостепенное значение. Все действия по регулированию зависят от анализа разности между измеренной температурой и заданной температурой. Измерение температуры топочных газов производится с помощью термопары (рисунок 29) или оптических пирометров (рисунок 30). Температура анодов измеряется термопарами (рисунок 31).



Рисунок 29 - Термопара, извлекаемая из газохода



Рисунок 30 - Оптический пирометр, устанавливаемый в лючок

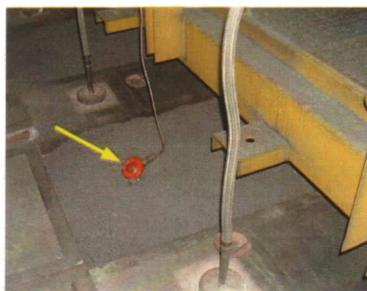


Рисунок 31 - Термопара для измерений температуры анодов

Тепловая обработка анодов. Качество анодов во многом зависит от максимальной температуры обжига и «времени выдержки», т.е. времени, в течение которого анод выдерживается при температуре выше заданного уровня (часто устанавливаемом на 1000 °С) (Рисунок 32).



Рисунок 32 - Температура топочного газа, максимальная температура анода и время выдержки анода

При более прагматичном подходе вместо времени выдержки анода используется время от момента, когда температура топочного газа достигает до окончательной заданной величины до остановки горелок на заднем горелочном мосте (рисунок 33).



Рисунок 33 - Период времени с постоянной температурой топочного газа вместо времени выдержки анода

## 1.2 Физико-химические процессы, обусловленные тепловой обработкой

При оценке теплового воздействия зеленых анодов необходимо учитывать следующие моменты:

- анодные огарки;
- нефтяной кокс;
- примеси, вносимые анодными огарками и/или пеком;
- пек.

Реакции в анодных огарках, вызванные температурой. Анодные огарки ранее уже подвергались такой же тепловой обработке, следовательно, в данном материале физических или химических изменений не происходит.

Реакции в нефтяном коксе, обусловленные температурой. При прокаливании нефтяной кокс подвергается тепловой обработке при температурах в диапазоне 1250 °С – 1350 °С. Так как данный уровень выше типовой температуры обжига анодов, на первый взгляд физических или химических изменений происходить не должно. Однако, за исключением нефтяного кокса, производимого в Китае, большей частью кокс прокаливается в поворотных печах. Время нахождения кокса в такой печи составляет, как правило, не более одного часа. При обжиге анодов время нахождения при повышенной температуре гораздо дольше. Обычно время нахождения анода в печи составляет 20-40 часов при температуре выше 1000 °С. Температуру и время нахождения можно в определенных пределах изменять. Прокаленный нефтяной кокс, производимый в поворотной печи, более или менее аморфный – т.е. недостаточно структурирован. Выдерживание анодов при «обычных» температурах обжига в диапазоне около 1050 °С - 1150 °С в течение заданного времени, называемого «временем выдерживания анода», приводит к определенным структурным изменениям и более высокой степени ориентации.

Обжиг анода до «высоких» температур приводит к улучшению кристаллической ориентации. Это, в свою очередь, приводит к повышению устойчивости к воздействию окружающего воздуха и газообразного  $\text{CO}_2$ , образующегося в процессе электролиза алюминия. В целом, чем выше максимальная температура обжига анодов, тем выше качество анодов. Вместе с тем, при температуре выше примерно 1150 °С, возможен процесс десульфуризации. Десульфуризация особенно заметна на сортах кокса с содержанием серы выше 2% и на анодах обожженных при температуре 1150 °С и выше. Десульфуризация приводит к образованию микропор и сильному отрицательному воздействию на реактивность анода в токе воздуха и, таким образом, на расход анодов на заводе. Поэтому, нельзя допускать обжиг анодов при слишком высокой температуре, называемый «пережог». Поскольку температура десульфуризации зависит от сорта нефтяного кокса, каждый раз

необходимо определять допустимую температуру обжига в соответствии с данной маркой сырья.

Реакции в примесях, обусловленные температурой. При температурах выше примерно  $900^{\circ}\text{C}$ , при обжиге анодов из перерабатываемых анодных огарков выделяются фториды. Предотвращение данной реакции невозможно. Единственный метод снижения выбросов фторидов – это улучшение очистки анодных огарков. Наблюдаются уровни фтористого водорода до 0.3 кг на тонну обожженных анодов. При невыполнении соответствующих нормативов необходима установка для улавливания фторидов в отходящих газах.

Реакции в пеке, обусловленные температурой. В процессе обжига примерно  $2/3$  пека по весу в анодах превращается в кокс. Химические и физические реакции, имеющие большое значение для свойств обожженных анодов, связаны с пеком – или точнее – со «связующей», т.е. смеси пека и пыли. Происходящие процессы достаточно сложны и количество публикаций о свойствах пека и реакциях пека или связующей матрицы, обусловленных тепловой обработкой огромно. Наиболее значимые работы приведены в ссылках [18, 34, 35, 36, 37, 38]. Оставшаяся часть пека, т.е. примерно  $1/3$  его веса выделяется в виде летучих веществ. Цель заключается в полном сжигании летучих веществ пека в печи. Тем не менее, происходит выделение некоторых легких фракций, не сгорающих в газоходах, по мере их выбросов, т.к. температура слишком низка для их возгорания. Кроме того, обжиг приводит к испарению и окислению некоторых следовых элементов в каменноугольном пеке, используемого для изготовления анодов, самыми яркими представителями являются цинк и свинец. Вместе с тем, при концентрациях от 100 до 500 ppm, влияние этих примесей на выбросы является пренебрежимо малым. В отличие от них, сера присутствует в пеке в концентрации от 0.3% до 0.6%. Наблюдаются выбросы порядка 1.2 кг на тонну обожженных анодов. Предотвращение данной реакции невозможно.

Обзор технологического процесса. Несмотря на то, что «перевод» результатов исследований в рекомендации по оптимальной эксплуатации печи достаточно сложен, если не невозможен, существует общее соглашение о цели, к которой надо стремиться и об основных процессах, происходящих в теле анода во время нагрева. Эти вывод можно обобщить следующим образом:

Цель заключается в превращении связующей матрицы в структуру, напоминающую структуру нефтяного кокса;

Во время нагрева зеленого анода происходят следующие основные процессы;

0 -  $200^{\circ}\text{C}$  – Релаксация напряжения, обусловленная охлаждением анода;

0 -  $200^{\circ}\text{C}$  – Риск возникновения разрушительных трещин при установке холодных (мерзлых) анодов во (все еще) горячие камеры печи;

150 - 350°C – Риск деформации анода и ниппельного гнезда (также называемая «оплывание массы вокруг подштыревой лунки»);  
350 - 450°C – Выделение легких летучих веществ пека;  
450 - 600°C – «Коксование»: отверждение связующей матрицы. Возможно возникновение трещин, вызванных дилатометрическими напряжениями;  
600 - 900°C – «Пост-коксование»: выделение метана и водорода;  
900 - 1200°C – Реориентация кристаллов связующего кокса и нефтяного кокса;  
> 1150°C – Выделение азота из пека. При использовании кокса с высоким содержанием серы может произойти десульфуризация («пережог»), сильно влияющая на устойчивость анода к воздействию окружающего воздуха.

### **1.3 Альтернативные подходы к обжигу анодов**

Высокие капитальные затраты, значительные оборотные средства, необходимые для эксплуатации печи, и ограничения по размерам анодов стали мощным стимулом поиска новых подходов к обжигу анодов. В прошлом и только в небольшом масштабе для обжига анодов использовались три разных типа печей:

- печь с одной камерой;
- электрический обжиг анодов;
- туннельная печь.

Были предложены следующие системы, но от них отказались еще до стадии реализации:

- двухступенчатый обжиг;
- обжиг, совмещенный с процессом формования.

Маловероятно, что один из данных подходов когда-либо заменит печь кольцевого типа. Последний раз в семидесятые годы 20-го века были предприняты попытки восстановить обжиг анодов в туннельной печи, от которой отказались до Второй мировой войны. Попытка окончилась неудачей, т.к. оказалось, что удерживать атмосферу в печи под контролем невозможно, что приводило к взрывам. С тех пор ничего неизвестно о других попытках создать альтернативные системы обжига.

### **1.4 Краткие выводы**

В настоящее время кольцевые печи с открытым верхом являются самым последним словом в деле обжига анодов. Основные положения по печам обжига и процессу обжига анодов можно обобщить следующим образом:

- в печи кольцевого типа «на месте» остается изделие, а зона огня (или огонь) перемещается по печи со «скоростью» или «циклом огня» обычно 24 - 28 часов на камеру;

- печь состоит из «камер»; обычно 16 - 18 камер на огонь;
- печь действует в качестве теплообменника. При нагреве анодов энергия подается через горелки и через сгорание летучих веществ, выделяющихся из пека, используемого в качестве связующего в производстве зеленых анодов;
- на разогреве обычно находится шесть - семь камер;
- на охлаждении анодов обычно находится пять - шесть камер;
- примерно на четырех камерах производятся операции с анодами и техническое обслуживание огнеупоров;
- большинство печей работают с двумя-шестью огнями при производительности, как правило, от 40 000 тонн до 60 000 тонн на огонь в год;
- производительность огня ограничена временем, необходимым для разогрева «твердых веществ» печи (т.е. аноды и огнеупорные материалы) и/или максимальной допустимой скоростью нагрева анодов;
- оптимальная тепловая обработка является функцией свойств нефтяного пека и формулы зеленых анодов;
- оптимальное сгорание характеризуется полным сгоранием летучих пека без образования смолистых или сажи;
- обжиг "зеленых" заготовок в многокамерных печах закрытого типа имеет ряд существенных недостатков: из-за значительного перепада температуры по высоте загрузки (до 200-250°C) и неоптимальных режимов обжига доля брака достигает 30-50 %; расход природного газа на 40-50% выше теоретически возможного; крайне ограничена возможность регулирования количества теплоносителя, вводимого в печь; качество обожженной продукции не стабильно; процесс обжига не автоматизирован;
- геометрия камер и кассет на существующих печах создают условия неравномерного и неэффективного обжига изделий.

За 50-ти летнюю отечественную практику эксплуатации и модернизации многокамерных печей для обжига углеграфитовой продукции эти недостатки устранить не удалось.

Отмеченные недостатки оказывают существенное влияние на технологию обжига, свойства обожженных изделий, экономическую эффективность процесса.

В связи с этим необходимо провести исследования механизма и кинетики процессов, происходящих при обжиге с целью определения путей его совершенствования и повышения экономической эффективности.

Отсюда возникает необходимость глубокого теоретического и экспериментального исследования процесса обжига с целью определения оптимальных условий формирования структуры углеграфитовых заготовок и выявления взаимосвязей между физико-химическими процессами, протекающими на различных стадиях обжига.

## **2 Исследование механизма и кинетики процесса обжига**

Исходя из назначения операции обжига, основной задачей является установление оптимальных условий проведения процесса обжига, при которых выход коксового остатка из связующего максимален. Это обуславливает прочность спекания частиц наполнителя и конечную механическую прочность обжигаемых изделий и готовых изделий, а также получение материала с однородной по всему объему заготовки бездефектной структурой.

Выполнение этих требований зависит от множества факторов, в том числе от качества исходных сырьевых материалов (кокса-наполнителя и связующего) [54-60], условий изготовления «зеленой» заготовки (рецептуры, параметров смешивания и прессования массы) [61-66]. А также от параметров обжига: скорости нагрева «зеленых» и охлаждения обожженных заготовок, конечной температуры обжига, свойств засыпочных материалов, схем загрузки заготовок и т.д. [67, 68].

### **2.1 Теоретические основы формирования структуры углеграфитовой заготовки в процессе обжига**

В начальной стадии обжига завершаются процессы смачивания и пропитки, которые не нашли полного развития в ходе смешения массы и виброуплотнения «зеленых» изделий. Однако капиллярные явления не являются единственными в ходе уплотнения заготовки. При повышении температуры нагрева связующее подвергается усиленной дистилляции с выделением ароматических смол и непредельных углеводородов. Явление переноса углерода через парогазовую фазу может влиять не только на заполнение тонких и ультратонких пор, но и действовать применительно к частицам, масса которых равна нулю, т.е. к вакансиям в кристаллической решетке углерода. Этот процесс носит определение как «залечивание» труднодоступной поры, расположенной в кристаллическом теле, и математически описывается как испарение капли пустоты из кристалла. Процесс «залечивания» поры всегда сопровождается понижением энергии, обусловленной естественным движением системы к состоянию термодинамического равновесия. Если капиллярные явления завершаются при температуре  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ , т. е. до момента коксования вещества матрицы, то массоперенос через парогазовую фазу продолжается и при более высоких температурах [16].

На ранней стадии обжига наблюдается припекание вещества матрицы к поверхности частиц наполнителя, образование контактных мостиков, которые соединяют зерна кокса, не находящиеся в непосредственном контакте. Тем самым образуется каркас будущего изделия, и система приобретает устойчивую жесткость. Имеют место два существенно различных механизма образования и развития контактного взаимодействия наполнителя и кокса из связующего.

Для первого характерно взаимное сращивание методом механического заклинивания зерен наполнителя коксом из связующего. При таком механизме спекания отдельные компоненты системы сохраняют структурную индивидуальность, т.е. граница между ними сохраняется. Последующее уплотнение межзернового граничного слоя происходит в результате массопереноса в парогазовой фазе и отложения пиролитического углерода между зернами.

При втором имеет место химическое взаимодействие связующего с поверхностью кокса с образованием устойчивых химических связей и элементов общей кристаллической решетки. В значительной мере развитие такого взаимодействия будет зависеть от предыстории композиционной системы, т.е. свойств исходного сырья для получения коксов и пеков, степени термообработки кокса, рецептуры, условий смешения и виброуплотнения системы. В любом случае снижение свободной энергии композиции будет определяться сращиванием кристаллической структуры кокса матрицы и наполнителя. Факт химической прививки на поверхности коксовых частиц доказан на практике электронно-микроскопическими исследованиями [71].

Начальное взаимодействие наполнителя и связующего на стадии смешения и виброуплотнения заготовки основано на ван-дер-ваальсовой природе связей пек - поверхность коксового порошка. Энергия такого взаимодействия равняется всего 4,2 кДж/моль и представляет собой физическое прилипание пека к поверхности зерен наполнителя.

Высокотемпературное спекание пекококсовой композиции инициирует длинный ряд реакций сшивания на границе матрица - наполнитель, причем с ростом температуры инициируются химические реакции все более высокого порядка. Так, энергия ковалентных водородных связей составляет 20-40 кДж/моль, а углерод - углеродных связей в реакции сшивания 314-834 кДж/моль.

Источником химической активности в связующем и наполнителе является так называемые активные химические радикалы с высоким энергетическим уровнем, а также ненасыщенные химические связи. К последним относятся соединения с кратными связями, например, с двойной или тройной ковалентной связью между атомами углерода. Соответствующие структуры, имеющие одинарные связи химически более инертны [19].

Квантометрическое рассмотрение процесса спекания приводит к тому, что каждая дополнительная углерод - углеродная связь, образующаяся между наполнителем и матрицей, ведет к дальнейшей стабилизации системы, а, следовательно, наиболее устойчивы такие электронные структуры, в которых все свободные орбитали атомов либо использованы для образования связей, либо заполнены неподеленными парами электронов.

Основным носителем активных радикалов и ненасыщенных химических связей в начальный период спекания являются функциональные группы, которые образуются с участием кислорода, азота, серы и других. Функциональные группы представлены карбоксильными, фенольными, карбонильными, перекисными и другими соединениями [72].

Сводные радикалы представляют собой неспаренные электроны атомов углерода, кислорода, а также серы и азота. Присутствие ненасыщенных групп способствуют формированию химических связей между поверхностью частиц кокса и связующим.

С ростом температуры нагрева роль водородных связей неизменно снижается. Однако их образование в начальных стадиях взаимодействия способствует определенной направленности последующих реакций формирования структуры углерода. При дальнейшем росте температуры возрастает число ковалентных связей, которые можно рассматривать как взаимодействие совокупности электронов в поле нескольких ядер. Указанные связи создаются ступенчато, по мере роста температуры. Их характер определяется предшествующей им структурой связей более низкой ступени.

На практике процедура обжига выглядит как непрерывная цепь преобразований различных видов связей: от поверхностных ван - дер - ваальсовских связей до водородных и, далее, ковалентных связей химического характера. Их структурная перестройка завершается при максимальной температуре обжига, т.е. при 1050 - 1100°C образованием сплошной структурной решетки углерода.

Структурные изменения при спекании заготовки происходят не только на границе матрица-наполнитель, но и в объеме пленки связующего. Интенсивные превращения в каменноугольном пеке с выделением летучих веществ начинаются при температуре порядка 300°C, что соответствует началу процессов молекулярной перестройки, сопровождающейся удалением продуктов разложения. При термическом разложении ароматических углеводородов в осколках молекул появляются ненасыщенные силы притяжения, которые при сближении обуславливают образование новых, более тяжелых молекул и ускоряют процесс дальнейшей молекулярной ассоциации. Последующее увеличение температуры приводит к активации более высокого энергетического уровня и к образованию еще более тяжелых макромолекул.

Эти процессы в прослойках связующего происходят в интервале температур 300-500°C, причем наиболее интенсивно при 450°C и заканчивается при 500-550°C образованием полукокса [19]. Дальнейшее изменение молекулярной структуры матрицы протекает в направлении упорядочения кристаллической решетки образующегося полукокса.

Совокупность процессов образования полукокса сводится к первоначальному образованию плоских макромолекул, основными структурными элементами которых являются правильными гексагональные ячейки преимущественно с атомами водорода или СН группами на углах (рисунки 34-36).

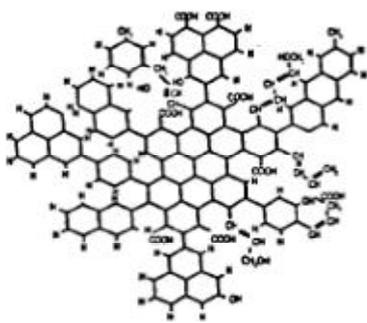


Рисунок 34



Рисунок 35



Рисунок 36

Рисунок 34 - Изменение плоской сетки каменноугольного связующего на стадии спекания 450°C; рисунок 35 - на стадии спекания 700°C; рисунок 36 - на стадии спекания 1300°C

Таким образом, формирование структурной первоначальной сетки полукокса связано одновременно с расщеплением (крекингом) ароматических углеводородов и ассоциаций (конденсацией) образовавшихся осколков в плоскую сетку. Образование плоских макромолекул завершаются до температуры 500-550°C. Дальнейшие превращения происходят уже в твердой фазе, и выражается в переходе структуры полукокса в кокс.

Переход полукокса в кокс означает ориентацию, упорядочение и наложение плоских гексагональных сеток в объемные кристаллы, т.е. рост толщины кристаллов и создание графитоподобной структуры, как показано на рисунке 36.

Другой вид превращений имеет место в парогазовой фазе. При коксовании связующего образуется значительное количество смол и газов, главным образом метана и этана, которые подвергаются вторичному пирогенетическому разложению. Продуктами пиролиза являются элементарный углерод и водород.

Анализируя физико-химические процессы, происходящие при термической обработке углеграфитовых материалов можно сделать следующие выводы:

- углерод, образующийся в результате пирогенетических процессов, активно участвует в заполнении свободных пор и «залечивании» вакансий, повышая структурную плотность решетки углерода;
- полнота использования пиролитического углерода напрямую зависит от скорости нагревания обжигаемого изделия, особенно на стадии интенсивного выделения парогазовой фазы;
- при замедленном нагреве процессы пирогенетического разложения углеводородов успевают полностью завершиться, а пиролитический углерод отложиться в порах и пустотах обжигаемого изделия;
- при высоких температурах (более 750°C), когда в газообразных продуктах коксования начинает преобладать водород, количество выделенного пиролитического углерода резко снижается, а к концу обжига прекращаются полностью.

## 2.2 Влияние режимов обжига «зеленых» анодов на качество анодов

Обжиг «зеленых» анодных блоков является завершающей стадией производства обожженных анодов для алюминиевых электролизеров. Обжиг – это процесс, при котором пекококсовая масса превращается в монолитный электрод.

При обжиге «зеленых» анодных блоков происходит замедленное спекание связующего и формирование структуры анода. Однако при обжиге «зеленых» блоков удается сохранить первоначальную структуру анода, заложенную при смешении и виброформовании. Тем не менее обжиг «зеленых» анодов также является непростой задачей и требует тщательного подбора температурного режима обжига, условий теплопередачи и создания восстановительной атмосферы в печных камерах на весь период высокотемпературной части графика обжига.

Обжиг анодов проводится исключительно в кольцевых камерных печах открытого или закрытого типа. Именно на печах этого типа достигаются большая производительность, максимальная экономия топлива и наилучшие технологические результаты обжига, включая хорошее качество обожженных анодов.

Обжиг анодов сопровождается сложными физико-химическими процессами, происходящими в пекококсовых композициях в результате размягчения, дистилляции и коксования связующего. На начальной стадии нагревания «зеленых» анодов пековая фаза размягчается, а затем переходит в жидкое состояние. Пек остается жидким до момента спекания, т. е. до 400-450<sup>0</sup>С. При достижении столь высоких температур угол смачивания стремится к нулю, а поверхностное натяжение стремится к минимуму, что обуславливает резкое усиление капиллярных сил.

Величина капиллярного давления может быть весьма значительной и достигать нескольких десятков атмосфер. В связи с этим величина капиллярного давления по влиянию на процесс пропитки зерен наполнителя эквивалентна действию давления всестороннего сжатия. Перемещение жидкой матрицы в капилляры сопровождается уменьшением избыточной поверхностной энергии, а кинетика процесса определяется скоростью вязкого течения жидкости. Частицы наполнителя становятся подобными губке, впитывающей жидкую фазу.

Таким образом, в начальной стадии обжига завершаются процессы смачивания и пропитки, которые не нашли полного развития в ходе смешения массы и виброуплотнения «зеленых» блоков. Однако капиллярные явления не являются единственными в ходе уплотнения анодного блока. При повышении температуры нагрева связующее подвергается усиленной дистилляции с выделением ароматических смол и непредельных углеводородов. Явление переноса углерода через парогазовую фазу влияет на заполнение тонких и ультратонких пор. Если капиллярные явления завершаются при температуре 400<sup>0</sup>С, т. е. до момента коксования вещества матрицы, то массоперенос через парогазовую фазу продолжается и при более высоких температурах.

На ранней стадии обжига наблюдается припекание вещества матрицы к поверхности частиц наполнителя, образование контактных мостиков, которые соединяют зерна кокса, не находящиеся в непосредственном контакте. Тем самым образуется общий каркас будущего блока и система приобретает устойчивую жесткость. Имеют место два существенно различных механизма образования и развития контактного взаимодействия наполнителя и кокса из связующего.

Во-вторых, химическое взаимодействие связующего с поверхностью кокса с образованием устойчивых химических связей и элементов общей кристаллической решетки. В значительной мере развитие такого взаимодействия будет зависеть от свойств исходного сырья, степени термообработки кокса, рецептуры, условий смешения и виброуплотнения системы.

На практике процедура обжига выглядит как непрерывная цепь преобразований различных видов связей: от поверхностных ван-дер-ваальсовых связей до водородных и, далее, ковалентных связей химического характера. Их структурная перестройка завершается при максимальной температуре обжига, т.е. при 1050-1100°C образованием сплошной структурной решетки углерода.

Структурные превращения при спекании анода происходят не только на границе матрица-наполнитель, но и в объеме пленки связующего. Интенсивные превращения в каменноугольном пеке с выделением летучих веществ начинаются при температуре порядка 300°C, что соответствует началу процессов молекулярной перестройки, сопровождающейся удалением продуктов разложения. Процессы в прослойках связующего происходят наиболее интенсивно при 450°C и заканчиваются при 500-550°C образованием полукокса. Дальнейшее изменение молекулярной структуры матрицы происходит в направлении упорядочения кристаллической решетки образующегося полукокса.

Процесс обжига «зеленых» анодных блоков условно можно разделить на следующие стадии:

1-я – до 120°C – предварительный нагрев «зеленых» блоков, который сопровождается релаксацией имеющихся механических напряжений в структуре, размягчением пека и дистилляцией влаги.

2-я – 120-350°C – термические преобразования в пеке и пекококсовой смеси, связанные с реакциями деструктивного разложения органических соединений и образованием жидких кристаллов мезофазы.

3-я – 350-600°C – коксование связующего и начало спекания пекококсовой композиции.

4-я – 600-1200°C – физико-химические преобразования, направленные на упорядочение структуры обожженного анода.

Применение рационального температурного графика обжига, т. е. оптимального темпа подъема температуры на каждой из четырех стадий обжига является важным условием получения высокого качества обожженных анодов при минимальных энергетических затратах.

С повышением темпа нагрева обжигаемых анодов их механическая прочность снижается, а удельное электросопротивление возрастает. Кроме того, повышается так называемая девиация, или статистический разброс измеряемых показателей. То есть повышенный темп нагрева способствует возникновению многочисленных факторов, вызывающих вспучивание образцов, образование микро- и макротрещин, градиента плотности и др. Заметный рост девиации наблюдается уже при темпе нагрева 12 °С/ч, а при 16 °С/ч девиация становится неконтролируемой.

Режим обжига должен обеспечить минимальный подъем температур в интервале 250-550 °С, когда происходят интенсивное выделение смолистых и образование коксовой структуры анода. Замедленный подъем температуры в указанной области, так же, как и наличие восстановительной атмосферы в камерах печи, способствует снижению потерь углерода и формированию более упорядоченной структуры углерода.

Следует отметить, что если до 500-550°С происходят весьма глубокие процессы дистилляции пеков с большой потерей массы, значительные усадочные процессы и физико-химические преобразования в структуре самого пека, то в последующих интервалах и особенно после 800 °С преобладают относительно простые процессы дегидрирования и умеренной усадки

Зона высоких температур (600-1100°С) характеризуется структурными преобразованиями в решетке полукокса при интенсивном дегидрировании материала. Двух-трехкратное увеличение темпа нагрева уже не может отрицательно повлиять на результаты обжига, так как потери углерода в этой температурной зоне практически не наблюдаются. Таким образом, если в начальной стадии лучшие результаты получены при темпе нагрева 7-8°С/ч, то после 600°С темп нагрева может быть повышен до 15-20°С/ч без ущерба для качества.

С точки зрения предотвращения деформации анодов, темп нагрева в наиболее опасной области температур 120-350°С должен быть предельно снижен.

Наиболее ответственными стадиями обжига являются режим первоначального расширения, зона интенсивной дистилляции пека и последующей стадии перехода полукокса в кокс с соответствующими температурными интервалами. Поэтому суммарный температурный интервал 120-600°С требует наиболее ответственного подхода к выбору режима нагрева обжигаемых анодов.

Следует также учесть, что прогрев «зеленых» блоков в процессе обжига идет от поверхности к центру, поэтому формирование пористой структуры на поверхности происходит значительно раньше и быстрее, чем внутри. Под действием капиллярных сил жидкий пек из внутренних слоев выдавливается к поверхности и заполняет поры, что приводит к дополнительной пропитке верхних слоев блока. Плотность поверхностных структур в результате этого возрастает, соответственно образуется разница в величине усадки для внутренних и внешних слоев. Внутренняя часть блока из-за большей потери массы имеет более высокую усадку, чем наружные слои, что может являться

одной из причин растрескивания анодных блоков при обжиге. Замедленный темп нагрева обжигаемых изделий существенно смягчает эту тенденцию.

Наложение различных температур в пределах одного блока может вызвать и другие разнонаправленные явления расширения-усадки, образующие локальные напряжения в структуре анода, образование трещин, деформаций и т. д. Поэтому все, что ведет к смягчению этих явлений, может быть использовано для совершенствования режима обжига. Прежде всего это разработка и поддержание оптимального температурного графика обжига с замедленным темпом нагрева в пределах камер предварительного нагрева. Во-вторых, создание восстановительной атмосферы в загруженных кассетах с исключением подсосов воздуха на наиболее ответственных участках обжига.

Не менее важен вопрос максимальной температуры обжига, т. е. температуры завершения обжига. С этим показателем связывается степень завершения реструктуризации решетки углерода и готовности анода к использованию в алюминиевом электролизере.

При температурах более 1200°C начинается активная десульфуризация анода, которая достигает при 1300 °C около 40%. Стойкость анода в атмосфере CO<sub>2</sub> непрерывно повышается с ростом температуры, что хорошо согласуется со снижением преимущественного окисления пековой матрицы. Что касается окисления в атмосфере воздуха, то для малосернистого анода сохраняется та же тенденция. Для анода из сернистого кокса эффект десульфуризации при температуре выше 1150 °C вызывает рост пористости и, соответственно, аномалию при окислении в атмосфере воздуха.

Установлено, что в области температур 1000-1100°C наблюдается заметная стабилизация основных физических характеристик обожженного анода.

Оптимальное значение конечной температуры обжига может варьироваться в зависимости от типа исходного сырья, свойств «зеленых» анодных блоков, а также от конструктивных особенностей печных агрегатов. Тем не менее в производственной практике на большинстве предприятий за норму принята конечная температура обжига в интервале 1050-1100°C, причем сдвиг в сторону 1100°C является предпочтительным.

### **2.3 Миграция связующего при обжиге электродов**

Экспериментальные данные показывают, что углеграфитовые заготовки, прошедшие обжиг, обладают существенной неоднородностью. Пробы, отобранные в различных участках электрода, отличаются по абсолютным величинам физико-механических свойств: например, по прочности на сжатие - на 25-30%, а по удельному электрическому сопротивлению - до 40%. Объемная масса одного и того же электрода находится в пределах 1.54 - 1.62 г/см<sup>3</sup>. Такая неоднородность свойств объясняется миграцией связующего в процессе обжига. Неравномерность свойств электрода приводит к увеличению расхода энергии на электросталеплавильных печах и алюминиевых электролизерах на обожженных анодах. Поэтому проблема миграции связующего при обжиге

электродов имеет важнейшее значение в организации технологических процессов электродного производства.

Рассмотрим факторы, влияющие на миграцию связующего в теле заготовок при обжиге.

### 2.3.1 Влияние гравитации на перемещение связующего

В обжиговых печах электроды устанавливаются вертикально, такое положение заготовок создает условие для перемещения связующего под влиянием гравитационных сил.

На рисунке 37 приведены данные зависимости изменения приведенной суммарной плотности образца □ от гранулометрического состава и количества связующего для крупного состава шихты (рецепты а, б, с), а на рисунке 38 - та же зависимость только для мелкого состава - рецепты d и e.

Перемещение связующего начинается при температуре около 120°C, затем скорость перемещения связующего резко возрастает и при температуре 180 - 200°C достигает максимального значения.

При 230°C - 250°C, процесс перемещения связующего прекращается. При температурах выше 250°C начинаются процессы дистилляции и деструкции, которые усиливаются с повышением температуры. Эти процессы протекают по всей длине образца, однако, в нижнем конце заготовки имеют место большие потери массы, что объясняется не столько большим содержанием пека, сколько увеличенным содержанием легких углеводородов, переместившихся из верхних горизонтов заготовки, и значительным обеднением ими верхнего конца.

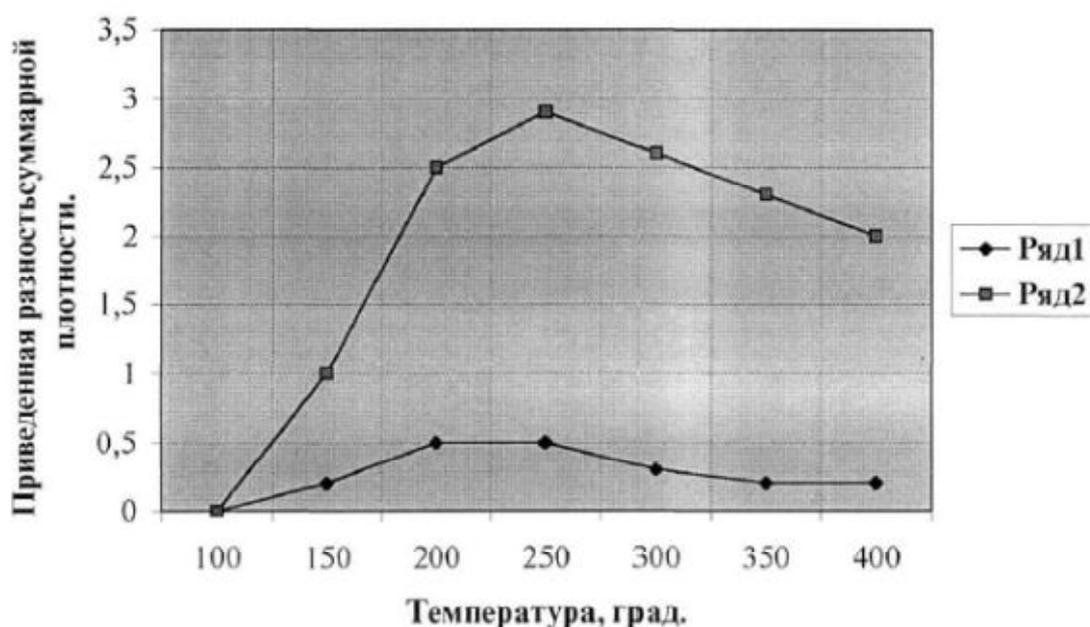


Рисунок 37 - Зависимость изменения приведенной суммарной плотности образца □ от гранулометрического состава и количества связующего для крупного состава шихты (рецепты а, б, с).

Данное явление можно объяснить следующим образом. При нагревании имеет место селективная миграция связующего, поэтому при термообработке из верхних горизонтов перемещается наиболее легкая часть пека (мальтены) в нижние слои образца. По мере того как содержание мальтенов уменьшается, пек становится более вязким и миграция сначала замедляется, а затем и вовсе прекращается.

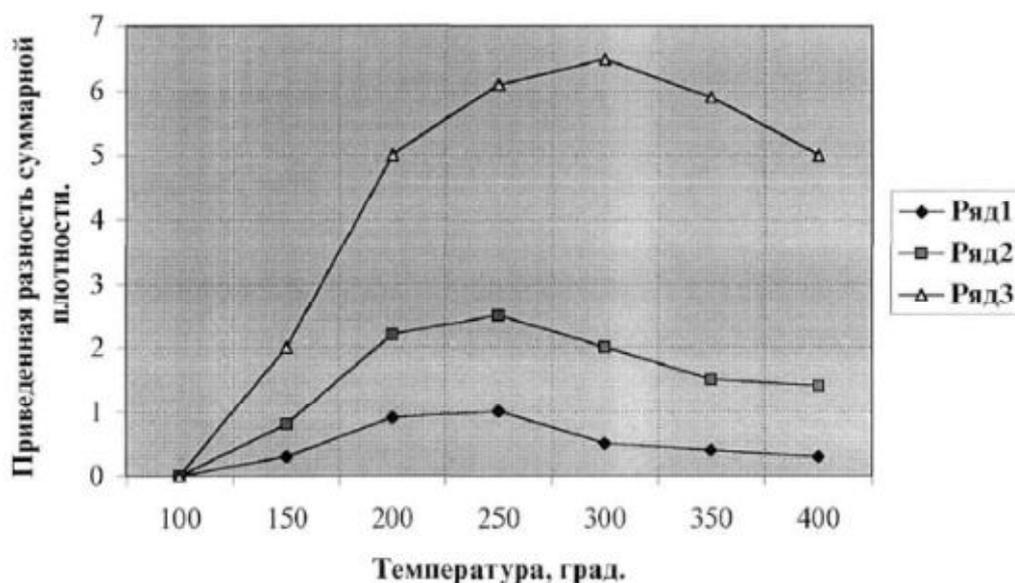


Рисунок 38 - Влияние гранулометрического состава и количества связующего на миграцию связующего при угле наклона образца 20 град, и скорости нагревания 30°C/ч.

### 2.3.2 Влияние скорости нагревания на перемещения связующих

На рисунке 39 приведены результаты исследования влияния скорости подъема температуры на миграционные процессы при обжиге.

На основании этих данных становится очевидным, что чем медленнее поднимается температура при нагревании образцов, тем большая разность масс возникает на концах образца. Следовательно, процессы миграции при этом протекают в большей степени. Следует обратить внимание еще на одно явление. При скорости подъема температуры 6°C/час максимум  $\square$  наступает при температуре 275 - 300°C, а при скорости 30°C/час этот же максимум достигается около 225°C. Следовательно, с увеличением скорости подъема температуры максимум  $\square$  смещается в сторону более низких температур.

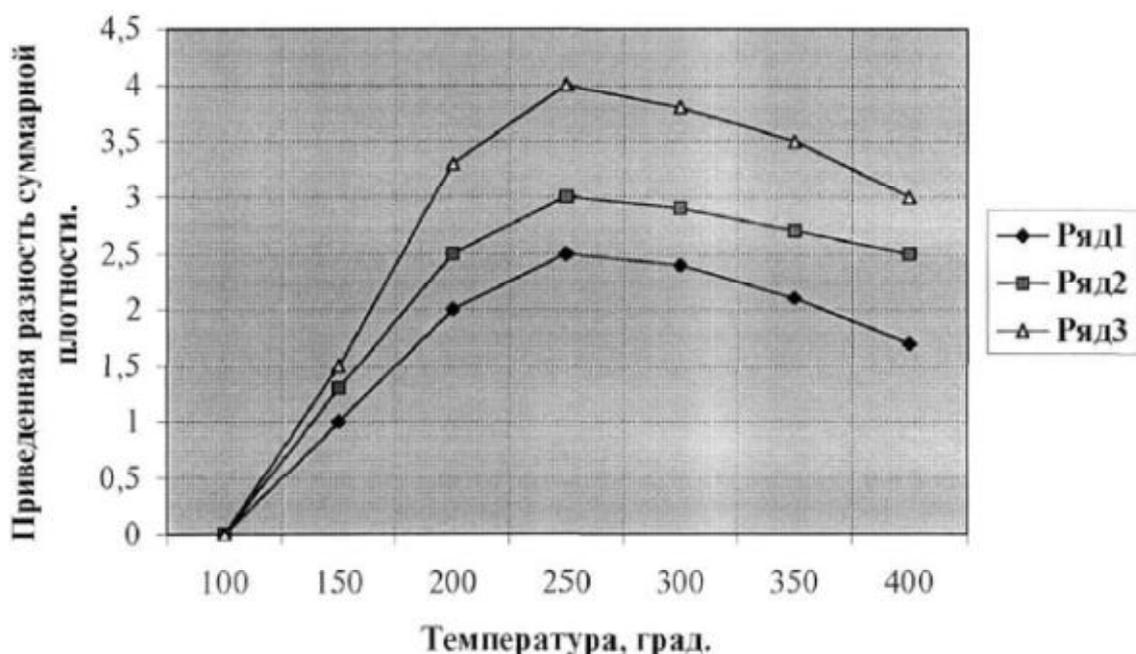


Рисунок 39 - Влияние скорости нагрева на миграцию связующего в образцах, изготовленных по рецепту В, °С/ч: кривая 1 - 30; кривая 2 - 15; кривая 3-6

Практически влияет на скорость подъема температуры до 250°C в промышленных условиях, учитывая конструкции современных обжиговых печей весьма сложно. Однако за счет сокращения числа находящихся на подогреве камер и/или увеличения количества вводимого теплоносителя в газовый тракт печи значительно уменьшается время пребывания изделий в зоне критических температур 150 - 250°C, при которых интенсивно протекают процессы перемещения связующих.

### 2.3.3 Влияние градиента температур

При обжиге электродных материалов в обжиговых печах промышленного типа изделия находятся в нестационарном тепловом поле, что приводит к неравномерному протеканию пирогенетических процессов в различных участках электрода. Иными словами, при обжиге формируется сложная температурная зависимость этих процессов. Каждая точка в теле электрода находится под воздействием двух взаимно перпендикулярных тепловых потоков - от наружных слоев к внутренним (от греющих стенок муфеля) и сверху вниз. Эти два потока, отличающиеся по величине градиента температур, оказывает влияние на величину, направление и характер перемещения связующего в теле электрода. Из теоретических разработок [82] в области перемещения жидкости в капиллярно - пористых телах известно, что при их нагревании движение жидкости будет происходить по направлению потока тепла. Это движение вызывается изменением капиллярного потенциала от температуры, так как коэффициент поверхностного натяжения с повышением

температуры уменьшается. При наличии постоянного градиента температур по длине электрода изменяется поверхностное натяжение от точки к точке, что приводит к появлению на поверхности натяжений. Возникшие напряжения создают условия для перемещения жидкости в зону более низких температур, при которых поверхностное натяжение жидкости больше, чем для этой же жидкости, но находящейся в более высоких температурных областях. Поверхностное натяжение для среднетемпературного пека при 180°C равно 49 Н/м, а при 210°C - 30 Н/м. Вязкость этого же пека и при этих же температурах соответственно изменяется от 115 до  $82 \cdot 10^3$  мПа с. Для электродов, находящихся в обжиговой печи, имеют место описанные условия, и наблюдается перемещение связующего, вызванное градиентом температур и направленное в сторону пониженных температур. Тем самым создается поток связующего, пропорциональный градиенту температур.

На рисунке 40 представлены результаты, отображающие миграцию связующего при горизонтальном расположении образцов и градиенте температур 5°C/см (кривая 1) и 10°C/см (кривая 2). Эти данные показывают, что с увеличением градиента температур возрастает интенсивность миграционных процессов, значительно изменяется масса образцов, и передвижение связующего направлено от горячего конца образца к менее нагретому.

Вторая серия экспериментов проводилась при наклоне образца 20 град, к горизонту, при градиенте температур 5 и 10°C/см. На рисунке 41 представлены результаты исследований.

Видно, что с увеличением градиента температуры возрастает скорость перемещения связующего.

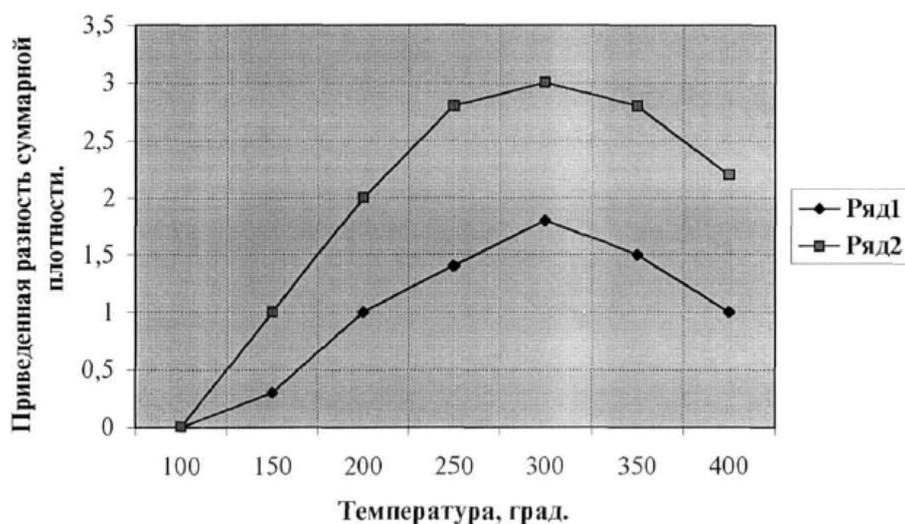


Рисунок 40 - Влияние градиента температур и положения образца, изготовленного по рецепту Е, на миграцию связующего при скорости нагревания 30°C/ч и горизонтальном расположении образцов: кривая 1 - 5°C/см; кривая 2-10° C/см

При организации третьей серии экспериментов выяснялась зависимость передвижения связующего под суммарным воздействием сил поля тяжести и градиента температур. В связи с этим на образец, находящийся в наклонном положении, для создания градиента температур по длине образца помещался торцовый нагреватель либо в верхнем конце, либо в нижнем конце.

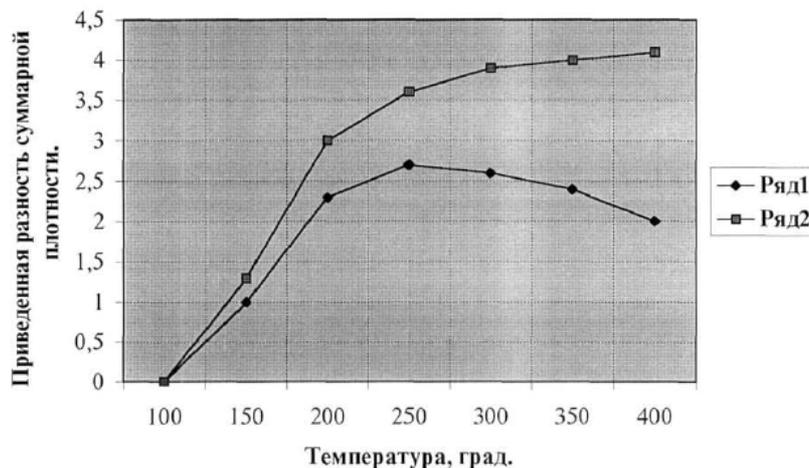


Рисунок 41 - Влияние градиента температур и положения образца, изготовленного по рецепту Е при угле наклона 20 град, скорости нагревания 30° С/ч: кривая 1 - 5°С/см; кривая 2 - 10°С/см

При помещении торцового нагревателя на верхнем торце силы, приводящие к перемещению связующего, суммируются, а при нахождении торцового нагревателя на нижнем конце силы, вызванные градиентом температур, направлены против сил поля тяжести.

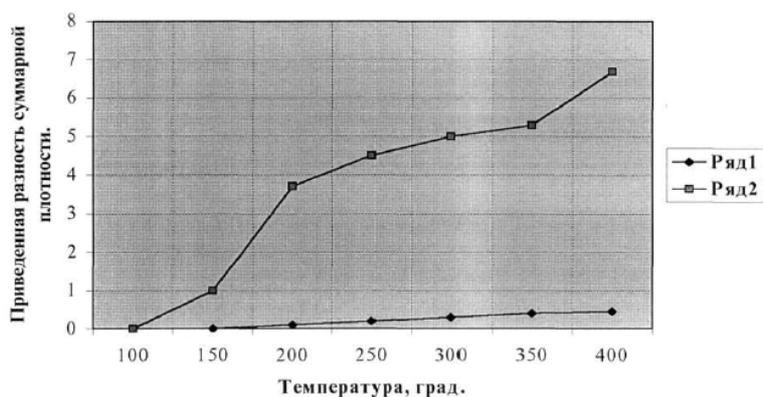


Рисунок 42 - Влияние градиента температур на миграцию связующего (рецепт Е, угол наклона 20 град): кривая 1 - суммарное воздействие сил гравитации и градиента температур, кривая 2 - градиент температур направлен против сил гравитации.

На рисунке 42 приведены данные этих исследований. Кривая 1 иллюстрирует суммарное воздействие сил поля тяжести и градиента

температур, видно, что это приводит к значительному перемещению связующего. Если же градиент температур направлен в противоположном направлении силам гравитации - кривая 2, то наблюдается значительное торможение перемещающейся жидкости и можно достичь полной ликвидации перемещения связующего. В этом случае обжигаемые изделия обладали бы наибольшей однородностью.

На основании анализа экспериментальных данных сделан вывод: необходимо вводить столько теплоносителя в газовый тракт печи и таким способом, чтобы миновать область температур наибольшей миграции связующего (до 250°C) как можно быстрее, обеспечивая при этом минимальный температурный градиент по длине заготовки и не допуская местного перегрева верхних горизонтов камеры. Выполнение этих условий совместно возможно при сжигании топлива в межкамерных простенках (а не под сводом, как на печах обжига традиционной конструкции) и при наличии эффективных регулирующих устройств, дозирующих подачу горючей смеси и обеспечивающих полное ее сжигание.

Обожженные электроды крупных сечений (к однородности свойств которых предъявляются особенно высокие требования) после первичного обжига подвергаются пропитке пеком под давлением и повторному обжигу. При этом имеющиеся разноплотности можно значительно уменьшить за счет встречной миграции связующего, если электроды при загрузке в камеры печи повторного обжига перевернуть на 180 град, относительно их положения в кассетах печи первичного обжига.

Таким образом, при обеспечении минимальной миграции связующего на стадии первичного обжига (и компенсации возникших неоднородностей на стадии повторного обжига для заготовок электродов крупных сечений) может быть достигнута высокая однородность и стабильность физико-механических показателей углеграфитовых изделий.

Конструктивные недостатки существующих многокамерных печей обжига создают условия для интенсивного протекания нежелательных процессов миграции связующего. Усилению этих процессов способствует также локальный перегрев верхних горизонтов загрузки, вызванный интенсивной лучистой теплопередачей от факелов газогорелочных устройств, расположенных под сводом в непосредственной близости от поверхности засыпки. Для улучшения условий обжига требуется математический анализ возможных конструкций камеры печи и способов введения теплоносителя в газовый тракт печи.

## **2.4 Выводы по главе**

Анализ условий обжига в существующих камерных печах позволяет сделать вывод о низкой эффективности существующей технологии обжига углеграфитовых изделий. Конструкция камеры печи имеет ряд существенных недостатков, а именно: способ сжигания топлива не позволяет регулировать подачу теплоносителя в газовый тракт печи в необходимом диапазоне; из-за

удаленного расположения греющих простенков в камере нагрев заготовок замедлен и характеризуется существенными перепадами температур, что приводит к возникновению нежелательных напряжений в теле заготовок.

Перечисленные недостатки не позволяют осуществлять обжиг по оптимальным графикам с минимальными перепадами температур по высоте и объему загрузки.

На базе сформированного краткого теоретического описания физико-химических процессов, протекающих в углеграфитовых заготовках при обжиге необходима разработка комплексного математического описания процесса обжига с учетом специфики камерного обжига заготовок для дальнейшего изучения и совершенствования техники и технологии обжига электродных заготовок.

### 3 Разработка математической модели процесса обжига

Нагрев заготовок в камере обжиговой печи осуществляется за счет за счет конвективного и лучистого теплообмена между топочными (дымовыми) газами, проходящими через муфельные каналы и поверхностью муфеля, и теплопередачи через стенку муфеля и засыпку к телу заготовки. Распределение температуры по диаметру и высоте электрода в ходе обжига определяют условия теплообмена и пирогенетические изменения связующего вещества, выделение газообразных продуктов.

Изменение сортамента заготовок, гидродинамических условий прохождения газов от головной камеры к борову, стохастическое управление расходом газа создает неоднозначные условия теплообмена и соответственно непредсказуемые температурные поля в теле заготовки.

В настоящее время процесс обжига ведется без учета этих явлений, что сказывается на качестве изделий и повышенному выходу брака. В связи с этим весьма актуальным является моделирование температурного поля заготовки и определение управляющих воздействий для получения оптимальных условий обжига [38,83,84]. Распределение температуры в изделии может быть определено решением задачи нестационарной теплопроводности через стенки муфеля, коксовую засыпку и внутри изделия.

При допущении равномерного распределения дымовых газов по муфелям камеры рассмотрим задачу конвективного теплообмена и теплопередачи в теле цилиндрической формы. В качестве геометрических условий принимаем, что муфель представляет гладкую трубу длиной  $L$ , м и эквивалентным диаметром  $D$ , м ( $L \gg D$ ).

Процесс принимаем стационарным, т.е. поле, средней по времени скорости, потока является постоянным.

#### 3.1. Решение задачи теплообмена между дымовыми газами и муфельным каналом печи

В качестве граничных условий задаем распределение температуры греющих газов и скорости на границах потока. К физическим условиям отнесем следующие параметры для дымовых газов: коэффициент температуропроводности -  $\alpha$ , м<sup>2</sup>/с, коэффициент кинематической вязкости -  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, коэффициент теплопроводности -  $\lambda$ , Вт/м.град, плотность -  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость, Дж/кг.град. Аналитическое решение процессов конвективного и лучистого теплообмена при ламинарном и турбулентном движении определяется системой дифференциальных уравнений. Математические трудности решения предполагают использование теории подобия в критериальной форме. Необходимые значения чисел Рейнольдса и Прандтля для определения коэффициента теплоотдачи определяются из условий однозначности.

Для условий расчета конвективного теплообмена в муфеле камерной печи скорость течения дымовых газов при расходе топлива 25-50 м<sup>3</sup>/час составляет 0.3 - 0.4 м/сек, а плотность дымовых газов при нормальных условиях равна 1.27 кг/м<sup>3</sup>.

При этом рассчитанные для данного типа камер печи значения чисел Рейнольдса и Прандтля равны  $Re \approx 1000$ , что характеризует течение газа в канале муфеля как ламинарное, среднее значение критерия Рг составляет 0.65. (Эти параметры изменяются при изменении температуры).

Рассмотрим условия теплообмена в одиночном муфельном канале.

Тепловой поток, вносимый в канал муфеля дымовыми газами, равен

$$\Phi_1 = G_2 \cdot c_2(t_1)t_1 \quad (2)$$

где  $\Phi_1$  - тепловой поток на входе в муфель, Вт;  $G_2$  - массовый расход дымовых газов, кг/с;  $c_2(t_1)$  - теплоемкость газового потока, функция температуры, Дж/кг.град;  $t_1$  - температура газового потока, °С.

Аналогично, тепловой поток  $\Phi_2$ , выносимый газовым потоком из муфеля, при температуре  $t_2$ , равен

$$\Phi_2 = G_2 \cdot c_2(t_2)t_2 \quad (3)$$

В результате процессов теплообмена в муфеле между движущимся газом и стенкой муфеля, результирующий тепловой поток через стенку муфеля в кассету составит

$$\Phi_{2\text{рез}} = \Phi_{\text{луч}} + \Phi_{\text{конв}} \quad (4)$$

где  $\Phi_{\text{луч}}$  - лучистая составляющая результирующего потока, Вт;  $\Phi_{\text{конв}}$  - конвективная составляющая, Вт.

Следовательно, уравнение теплового баланса муфеля имеет вид

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{2\text{рез}} \quad (5)$$

Излучение от газа к окружающей стенке в соответствии с [85] описывается уравнением

$$\Phi_{\text{луч}} = C_s \varepsilon_{\text{ст.эф}} \varepsilon_2 F \left[ \left( \frac{t_{2\text{cp}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{ст.сп}} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

где  $C_s = 5.67 \text{ Вт/м}^2 \text{град}^4$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\square_{\text{ст.эф}} = 0.5(\square_{\text{ст}} + 1)$  - эффективная степень черноты стенки;  $\square_{\text{ст}}$  - степень черноты материала муфеля;  $F = \pi DL$  - внутренняя поверхность муфеля, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{ст.сп}}$  - средняя температура стенки, °С;  $t_{2\text{cp}}$  - средняя температура газа, °С.

Считая газ серым, степень черноты газового потока найдем по формуле [86]

$$\varepsilon_z = 1 - \exp(-k \cdot s_{эф}) \quad (7)$$

где  $S_{эф} = 3.6V/F$  - эффективная длина пути луча, м;  $k$  - коэффициент поглощения в газовой зоне;  $V$  - объем газовой зоны, м<sup>3</sup>.

Для расчета коэффициента поглощения известно множество формул. В соответствии с [86] он равен

$$k = (0.8 + 1.6 \cdot 10^{-5} p_{H_2O})(1 - 0.38 \cdot 10^{-3} t_{z,сп}) \sqrt{(p_{CO_2} + p_{H_2O}) \cdot 10^5} / \sqrt{s_{эф}} \quad (8)$$

где  $p_{CO_2}$   $p_{H_2O}$  парциальные давления диоксида углерода и водяных паров. Конвективный тепловой поток на стенку равен

$$\Phi_{конв} = \alpha \cdot F \cdot (t_{z,сп} - t_{ст,сп}) \quad (9)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>град.

Критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в соответствии с [87-89] определяется следующим образом:

$$Nu_D = 1,86(Re_D Pr)^{0,33} \left(\frac{D}{L}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (10)$$

где:  $\mu_b$  - коэффициент динамической вязкости при среднемассовой температуре газа. Па·с,  $\mu_s$  - коэффициент динамической вязкости при среднемассовой температуре стенки муфеля. Па·с.

Поскольку число Нуссельта определяется как

$$Nu_D = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (11)$$

то коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu_D}{D} \quad (12)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газа, Вт/м град. Для наших условий [87]

$$\lambda = 0.028 + 0.00006 \cdot t_{z,сп} \quad (13)$$

Считая, что температура газового потока по длине муфеля изменяется по линейному закону, определим  $t_{z,cp}$  как среднеарифметическое  $t_1$  и  $t_2$

$$t_{z,cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (14)$$

При этом допущении находим среднюю температуру стенки муфеля  $t_{cm,cp}$  решением нелинейного уравнения теплового баланса (5), которое в явном виде следующее

$$G_z [c_z(t_1)t_1 - c_z(t_2)t_2] = c_s \varepsilon_{cm,эф} \varepsilon_z F \left[ \left( \frac{t_{z,cp} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{cm,cp} + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha \cdot F \cdot (t_{z,cp} - t_{cm,cp}) \quad (15)$$

после чего находим результирующий тепловой поток  $\Phi_{2рез}$ .

При решении уравнения (15) считаем известным объем дымовых газов через камеру  $Q$ ,  $m^3/c$ , а также значения  $t_1$  и  $t_2$ .

Скорость газа в канале муфеля равна

$$w = \frac{Q}{F \cdot K_m} \quad (16)$$

Тогда массовый расход газа

$$G_z = \frac{\rho(t_{z,cp}) \cdot \pi \cdot D \cdot w}{4} \quad (17)$$

Плотность газов  $\rho_t$  при рабочих условиях (температуре  $t_z$ , °C барометрическом давлении  $p_{бар}$ , кПа, и избыточном давлении  $\pm p_z$ , кПа) определится из выражения

$$\rho_t = \frac{\rho_0 \cdot 273 \cdot (p_{бар} \pm p_z)}{101.3 \cdot (273 + t_z)} \quad (18)$$

Где  $\rho_0$  - плотность газа при температуре нормальных условиях,  $кг/м^3$ .

Полный тепловой поток, из муфельных каналов в кассету камеры равен

$$\Phi_{общ} = \Phi_{2рез} \cdot K_m \quad (19)$$

Из выражения (15) определили, что при  $t_{z,cp} = 310^\circ C$  значение  $t_{cm,cp} = 282^\circ C$ .

При этом массовый расход газа  $G_r = 0.61$  кг/сек, а расчетное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от дымовых газов к стенке муфеля составляет  $8.67$  Вт/м<sup>2</sup> град.

Передачу тепла через стенку муфеля определим решением задачи теплопроводности через плоскую стенку

$$\Phi_{2,рез} = \frac{t_{ст.вр} - t_{ст.нар}}{R} \quad (20)$$

где  $R = \frac{\delta}{\lambda_{ст} F}$  тепловое сопротивление стенки, град/Вт;  $\lambda_{ст}$  - коэффициент теплопроводности стенки [49,90], Вт/м.град;  $t_{ст.нар}$  - температура наружной стенки муфеля, °С.

Значение температуры для внешней стенки муфеля при стационарных условиях теплопроводности, определенное из (20) составляет  $275^\circ\text{C}$ . В процессе обжига, длящемся до 420 часов, можно принять установившиеся значения на интервале 2-3 часа (без изменения управляющих воздействий) в качестве стационарных.

При этом расчетные значения будут справедливы на данной траектории процесса.

При изменении входных воздействий необходим перерасчет полученных значений в соответствии с новыми данными. Для выбранного интервала стационарности  $\Delta\tau$ , час можно записать

$$M_3 \cdot c_3(t_3) \cdot t_3 = \Phi_{общ} \cdot \Delta\tau \quad (21)$$

где  $M_3$  - суммарная масса засыпки в кассете, кг;  $c_3$  - теплоемкость засыпки (функция температуры);  $t_3$  - средняя температура засыпки, °С.

Отсюда средняя температура засыпки равна

$$t_3 = \frac{\Phi_{общ} \cdot \Delta\tau}{M_3 c_3(t_3)} \quad (22)$$

Аналогично средняя температура ( $t_u$ ) обжигаемого изделия равна

$$t_u = \frac{\Phi_{общ} \cdot \Delta\tau}{M_u c_u(t_u)} \quad (23)$$

где  $t_u$  - средняя температура изделия, °С;  $M_u$  - суммарная масса изделий в кассете, кг;  $C_u$  - теплоемкость изделия (функция температуры), [7].

Обработкой результатов экспериментальных исследований получены следующие уравнения регрессии:

$$Q(\tau) = 1,5 - 0,002 \cdot \tau - 0,0004 \cdot \tau^2 \quad (24)$$

$$t_1(\tau) = 350 + 0,076 \cdot \tau + 0,35\tau^2 \quad (25)$$

$$t_2(\tau) = 130 + 0,076 \cdot \tau + 0,388 \cdot \tau^2 \quad (26)$$

где  $\tau$  - время процесса обжига, час.

Приняв интервал стационарности  $\Delta\tau = 8$  час, при полном цикле обжига 400 часов, получены расчетные значения изменения температур и параметров процесса обжига.

На рисунках 43 и 44 приведены зависимости изменения температуры стенки муфеля и коэффициента теплоотдачи от теплофизических свойств теплоносителя и технологических параметров процесса во времени.

На рисунке 45 приведены зависимости средней температуры дымовых газов и муфеля обжиговой печи от времени обжига.



Рисунок 43 - Расчетная зависимость изменения температуры муфеля от времени обжига.

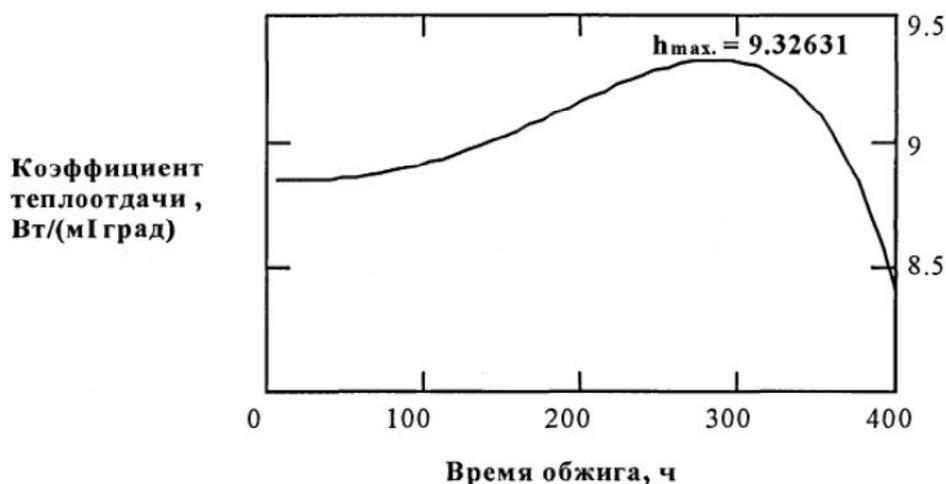


Рисунок 44 - Расчетная зависимость коэффициента теплоотдачи дымовых газов к стенке муфеля в процессе обжига.

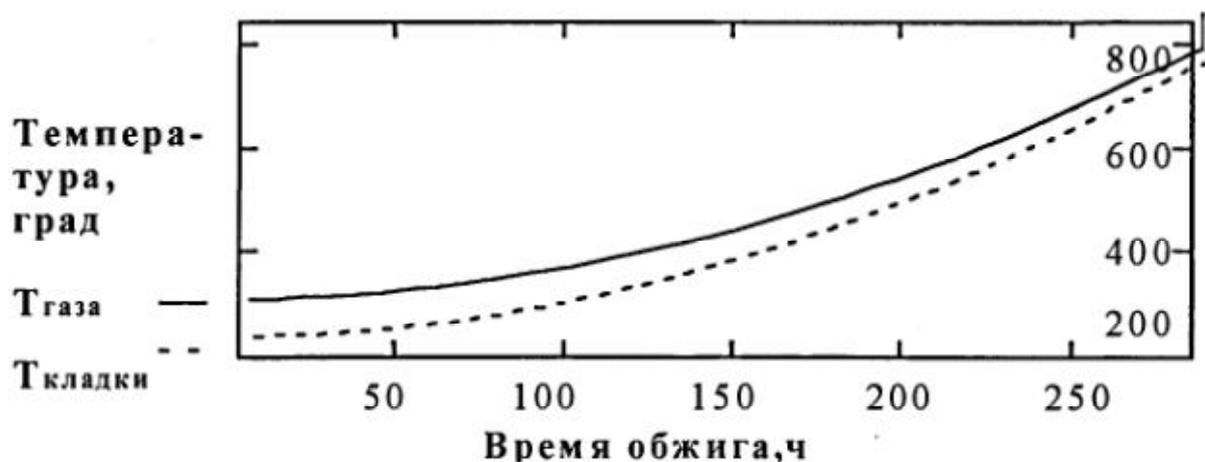


Рисунок 45 - Расчетная зависимость средней температуры дымовых газов и муфеля обжиговой печи от времени обжига.

Полученные результаты используются для решения задачи теплопроводности в теле заготовки.

### 3.2 Решение задачи теплопроводности в теле заготовки

Процесс термической обработки электродных заготовок в многокамерных обжигowych печах - это нестационарный процесс нагрева анизотропных тел по заданному графику обжига под действием внешнего источника тепла и при переменных теплофизических характеристиках нагреваемых материалов [96].

Для расчета оптимальных технологических режимов обжига необходима разработка метода расчета трехмерного температурного поля камеры печи в зависимости от введенной в печь тепловой энергии.

Учитывая, что распределение температуры в кассете на протяжении процесса обжига, расчет нагрева обжигаемых заготовок выполнен путем решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности. Задача содержит уравнения теплопроводности для областей засыпки, обжигаемых изделий и футеровки, а так же начальные и граничные условия и уравнения сопряжения на поверхностях изделий.

Граничные условия находили решением задачи внешнего теплообмена (см. предыдущий раздел).

Система дифференциальных уравнений включает в себя:

- уравнение теплопроводности в засыпке:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a, \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (27)$$

- уравнение теплопроводности в изделиях:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_u \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (28)$$

Условия сопряжения на боковой поверхности изделия определили по результатам решения внешней задачи теплопроводности. При этом температура  $t_{u\text{ нов}}$  на внешней поверхности изделия определяется из уравнения

$$\Phi_{2, \text{рез}} = \frac{(t_{\text{см.сп}} - t_{u, \text{нов}})F}{\delta_{\text{см}}/\lambda_{\text{см}} + \delta_2/\lambda_2} \quad (29)$$

Решение уравнения баланса энергии позволяет однозначно получить выражение для искомой температуры в следующем виде:

$$t^{n+1} = t^n + \frac{\Delta \tau}{C^n} \left[ \sum_{i=1}^m \left( \frac{t_i^n}{R_i^n} \right) - \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{R_i^n} \right) \right] \quad (30)$$

где:  $t^{n+1}$ ,  $t^n$  - температура рассматриваемого элемента в  $n+1$  и  $n$  моменты времени;

$t_i^n$  - температура граничащего элемента по  $i$ -тому направлению;

$c^n = c^n pV$  - полная теплоемкость элемента;

$\Delta \tau$  - временной шаг;

$R_i^n$  термическое сопротивление по  $i$ -тому направлению;

$n$  - временной индекс (текущий временной слой).

На выбор шага времени в соответствии с шагом по координате налагается ограничение[86]:

$$f \leq \frac{1}{2 \cdot (1+b)} \quad (31)$$

где  $b = \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda}$        $f = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2}$

которое является общим показателем устойчивости явных схем при нелинейных коэффициентах.

Решение уравнения баланса энергии основано на предположении, что величина среднего за промежуток времени  $\Delta \tau$  теплового потока через какую – либо поверхность элементарного объема пропорциональна начальному значению составляющей температурного градиента.

При построении модели приняты следующие допущения:

- теплофизические свойства греющих простенков равномерны. Объемная масса и фракционный состав засыпки для всего объема загрузки равны;
- потери тепла через внешние стенки не влияют на распределение температур в кассетах;
- теплопередача через засыпку к заготовкам осуществляется исключительно посредством теплопроводности. Влияние массопереноса и конвекции в газовой фазе считается незначительным и не учитывается;
- расчеты проводятся для половины кассеты по продольному сечению в силу симметричности загрузки относительно обогревающих простенков.

Алгоритм расчета содержит следующие основные операции:

1. Задается начальное температурное поле объема кассеты;
2. Описывается геометрическое пространство кассеты. По заданной схеме укладки и габаритам заготовок, конструктивным размерам печи формируется сетка разбиения элемента кассеты слоя на элементарные объемы  $\Delta V_{i,j,k}$ ;
3. Рассчитываются по известным формулам параметры теплообмена между печными газами и муфельными каналами обогревающего простенка;

Операции с 4 по 9 выполняются циклически.

4. Определяются теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, плотность) для каждого элементарного объема с учетом материалов, из которого он состоит и текущей температуры элемента;
5. Вычисляются тепловые сопротивления и тепловые потоки по каждому направлению для каждого элементарного объема;
6. Рассчитывается очередной шаг времени для каждого элемента с учетом известного ограничения и выбирается наименьший из них;
7. Вычисляется «временное» сопротивление;
8. Рассчитывается температурное поле на конец шага;

$$t_{i,j}^{n+1} = t_{i,j}^n + R_{\tau} \left( \frac{t_{i+1,j}^n - t_{i,j}^n}{R_{\lambda_{i+1,j}}^{\lambda}} + \frac{t_{i-1,j}^n - t_{i,j}^n}{R_{\lambda_{i-1,j}}^{\lambda}} + \frac{t_{i,j+1}^n - t_{i,j}^n}{R_{\lambda_{i,j+1}}^{\lambda}} + \frac{t_{i,j-1}^n - t_{i,j}^n}{R_{\lambda_{i,j-1}}^{\lambda}} \right) \quad (32)$$

где:

$t_{ij}^n$  - температура расчетного и окружающих его элементарных объемов на начальном шаге расчета;

$t_{ij}^{n+1}$  - температура расчетного элементарного объема на следующем шаге расчета;

$R_{\tau}$  - «временное» тепловое сопротивление;

$R_{i+1,j}^{\lambda}$  тепловое сопротивление теплопроводности между расчетным и окружающим его элементарными объемами.

9. Организуется новый цикл расчета.

Теплофизические характеристики засыпки взяты из. Теплофизические характеристики огнеупоров взяты из [49,90]. Для определения теплофизических характеристик углеграфитовых материалов использовались [7]. Коэффициент

температуропроводности  $a$  электродной заготовки принят  $g_j$  данным исследований института ГОСНИЭПа равным  $0,00244 \text{ м}^2/\text{час}$ .

Решение задачи реализовано в среде MCAD 2001iPro и позволяет рассчитывать температурное поле кассеты камеры обжиговой печи и заготовки в режиме реального времени. Пример расчета приведен на рисунке 46.

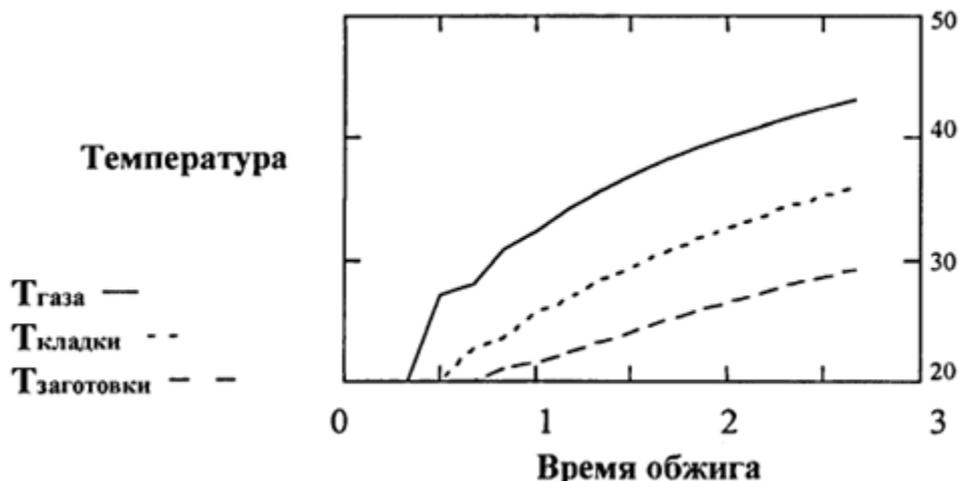


Рисунок 46 - Распределение температуры в теле заготовке в относительных единицах.

Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными кривыми изменения температуры по сечению электродного изделия при обжиге в лабораторных условиях, приведенными в работах [38, 87], и нашими экспериментальными данными. Погрешность оценки расчетной температуры не превышает 5%, что вполне допустимо для инженерного метода расчета и применения полученной модели в практических целях.

### 3.3 Математическое описание процесса удаление продуктов термического разложения органической массы (летучих)

Процесс удаления летучих из «зеленых» заготовок при обжиге представляет собой разрыв физико-химических связей внутри составляющих пека с весьма быстрым последующим образованием конечных продуктов разложения. Можно выделить отдельные группы связей, которые разрушаются при определенных условиях с какой-то постоянной и примерно одинаковой для данной группы скоростью.

В данном случае скорость выделения продуктов пиролиза, образующихся в результате разрушения такой группы связей, по закономерностям физической химии можно записать следующим образом:

$$\frac{dv^1}{d\tau} = K(1 - v^1)^{np} \quad (33)$$

где:  $v^l = v/C_o$  - доля продуктов пиролиза, выделявшихся за время  $\tau$  в результате разрушения определенной группы связей;

$C_o$  - доля продуктов пиролиза, в общем, их количестве, получающаяся в результате полного разрушения связей данной группы;

$v$  - доля продуктов пиролиза, в общем, их количестве, выделяющаяся в результате разрушения связей данной группы за время  $\tau$ ,

$K = f(T_m)$  - константа скорости реакций, приведшей к разрушению связей данной группы;

$T_m$  - температура материала;

$n_p$  - порядок реакции, величина которой ниже принимается равной 1, что для реакции разложения в первом приближении допустимо. Константа скорости реакции определяется по закону Аррениуса

$$K = K_o \exp^{-E / (RT_m)} \quad (34)$$

где:  $K_o$  - предэкспоненциальный множитель;

$E$  - энергия активизации;

$R$  - универсальная газовая постоянная.

Сумма интегральных решений уравнения (33) запишется в виде:

$$\Phi^l = \sum C_{on} (1 - \exp^{-k_n \tau}), \quad i=1, \dots, n \quad (35)$$

где:  $\Phi^l$  - суммарное количество летучих, выделявшихся к моменту времени  $\tau$ ,

$n$  - количество групп реакций, которые учитываются при описании процесса пиролиза;

$C_{on}$  - количественная характеристика определенной группы реакций.

Для практических приложений вполне удовлетворительные результаты дает схема расчета для двухкомпонентной смеси ( $n=2$ ,  $C_{o1} + C_{o2} = 1$ ), т.е. уравнение (35) можно записать в виде:

$$\Phi^l = C_{o1}(1 - e^{-k_1 \tau}) + C_{o2}(1 - e^{-k_2 \tau}) \quad (36)$$

Приведенные выше уравнения справедливы для изотермических условий ( $T_m = const$ ), в случае же изменяющейся во времени обжига изделий температуры задача усложняется и суммарное количество летучих, выделявшихся к моменту времени  $\tau$  определяется зависимостью:

$$\Phi^l = \sum_{i=1}^n C_{on} (1 - \exp^{-\int_0^{\tau} (K_o \exp^{-E / (RT(t))}) dt}) \quad (37)$$

В основу метода решения (37) положен метод кусочно-линейной аппроксимации температурной кривой, что позволяет заменить суммой интеграл в (37):

$$\Phi^l = \sum_{i=1}^n C_{on} (1 - \exp^{-\sum_{i=0}^l (K_i \exp^{-\eta_i (K_i T(i)/k)})}) \quad (38)$$

где:  $t = 0.1 \dots, i$ - время.

Полученное уравнение (38) используется в алгоритме решения математической модели для определения динамики выделения летучих веществ. Решение задачи реализовано в среде MCAD 2001i Pro.

### 3.4. Изменение плотности заготовки при обжиге

Учитывая тот факт, что основное изменение плотности заготовки происходит в результате выделения летучих, примем следующее выражение для ее определения:

$$D_i = D_{i0} k_i \frac{G_z - G_i}{G_{z0} - G_{i0}} \quad (39)$$

где:  $D_i$  - текущая плотность изделия.

$D_{i0}$  - начальная плотность изделия,

$G_i$  - текущая масса изделия,

$G_i$  - масса остатка летучих,

$G_{i0}$  - начальная масса заготовки,

$G_{i0}$  - начальная масса летучих.

$K_i$  - коэффициент идентификации, учитывающий уплотнение структуры изделия.

$$G_i = G_{i0} - G_{i\alpha} \quad (40)$$

Количество выделившихся летучих для однокомпонентной смеси определяется из выражения (38). Решение задачи реализовано в среде MCAD 2001i Pro.

### 3.5 Выводы по главе

Сформированное математическое описание процессов, протекающих при обжиге углеграфитовых заготовок в камере, позволяет моделировать температурное поле камеры печи для различных вариантов конструкции печи обжига, температурных графиков обжига, тяговых режимов в газовом тракте печи и сортамента «зеленых» заготовок.

Модель адекватна полученным в главе 2 результатам.

Анализ результатов моделирования температурного поля камеры традиционной обжиговой печи указывает на существенные недостатки в ее конструкции (в частности: неэффективное использование объема камеры; высокая тепловая инерционность загрузки в целом, и как следствие, увеличение продолжительности обжига; локальный перегрев заготовок при сжигании топлива; не равномерный нагрев заготовок по высоте и т.д.).

Очевидна необходимость внесения существенных конструктивных и организационных изменений в технологию обжига, а именно:

- оптимизация работы горелок в огневых колодцах, расположенные в межкамерных простенках в целях устранения локального перегрева изделий верхних рядов загрузки за счет лучистого теплопереноса от факелов горелок;
- минимизация влияния подсосов холодного воздуха по периметру камеры.

Наряду с необходимостью внесения существенных изменений в конструкцию обжиговой печи, для оптимизации технологии обжига необходимы методы и технические средства для сжигания топлива с возможностью регулирования тепловой производительности в широких пределах и автоматическим поддержанием соотношения топливо/воздух во всем диапазоне регулирования. При работе топливных горелок в огневых колодцах приобретают большое значение длина и форма факела, а также температура его ядра, т. к. долговечность огнеупорной кладки колодцев напрямую зависит от условий сжигания газа.

Существующие методы и системы управления подачей и сжиганием топлива не позволяют реализовать меры по усовершенствованию технологии обжига углеграфитовых изделий в полном объеме.

## 4 Типичные дефекты обожженных анодных блоков

### 4.1 Основные виды трещин в теле анода

В целом фатальное образование трещин в аноде можно рассматривать как конечную стадию образования взаимосвязей между трещинами. Эти трещины создаются за счет растягивающих напряжений, которые действуют перпендикулярно плоскости трещины.

Поскольку встречаются разные конфигурации трещин, можно говорить, что каждый тип трещины является результатом специфических напряжений.

Эти напряжения вызваны либо некоторыми конкретными этапами процесса производства анодов, либо условиями в электролизере. Соответственно, анализ конфигурации трещин является прямым способом отслеживания источников напряжений для последующего устранения причины образования трещин непосредственно в месте ее возникновения.

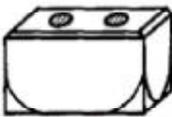
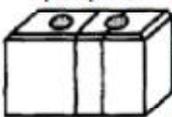
Влияющие факторы	Угловые трещины 	Вертикальные трещины 	Горизонтальные трещины 
Сырьевые материалы	++	+	+
Состав	++	+	*
Перемешивание	+	+	*
Формовка	+	+	++
Обжиг	*	++	*
Установка стержней	*	++	*
Тепловой удар	+++	++	+

Рисунок 47 - Относительная значимость основных факторов, вызывающих различную конфигурацию трещин в аноде

Следует принять во внимание, что образование трещин в анодах часто вызвано несколькими механизмами, независимыми друг от друга. В таком случае особенно важно проанализировать проблемы отдельно с целью определения влияния от каждого источника.

В этой главе приводится обзор всех конфигураций трещин, которые можно наблюдать на практике. В последующих главах обсуждаются механизмы, которые вызывают эти конкретные конфигурации трещин.

На Рисунке 47 показаны различные типы конфигурации трещин, приводится в обобщенном виде относительная значимость каждого источника. Отметим, что необходимо проверить несколько факторов с целью выявления причины образования трещин в анодах. Далее рассмотрим различные виды трещин.

### **4.1.1 Угловые трещины**

Образование угловых трещин в аноде происходит в основном после установки анодов в электролизеры. Это означает, что материал не теряет прочность в углах до такой степени, что изломы или трещины становятся заметными до установки в электролизер.

Угловые трещины возникают в аноде под воздействием теплового удара.

Степень тепловой деформации в углах может достигать такого уровня, который превышает допустимые пределы анода. Центр максимальной деформации расположен примерно в 15 см от донной части и в 25 см от боковых поверхностей анода. Такие выводы совпадают с практическими наблюдениями времени и формы образования трещин. Обычно образование трещин в аноде происходит через 5 – 25 минут после установки анода в электролизер.

Образование трещин в углах усиливается за счет неблагоприятных свойств анода, значимых для теплового удара. Некоторые свойства анода (например, коэффициент теплового расширения или модуль Юнга) существенно зависят от качества сырьевых материалов. Аналогичный эффект на стойкость к тепловому удару может быть вызван процессом подготовки сухой смеси твердых частиц и составом анодной массы. Таким образом, постоянство качества анодной массы является фактором, который часто недооценивают. Существенное внимание следует уделить постоянному показателю тонины пылевой фракции, которая является обязательной для оптимального добавления пека. Условия перемешивания (удельная энергия перемешивания и температура) следует подобрать соответствующим образом для получения однородной зеленой анодной массы. В конечном итоге это повлияет на колебания механических свойств анода (т.е., модуль Вейбулла). Неблагоприятные условия формовки (которые могут быть вызваны несоответствующим качеством анодной массы!) могут привести к образованию в зеленом анодном блоке слоев с различными показателями плотности. Образовавшиеся в углах изобары совпадут с изотермами под воздействием теплового удара, в результате чего начнут действовать как плоскости смещения, что приведет к образованию трещин. В целях полноты картины в этом месте следует упомянуть о том, что угловые трещины могут также быть вызваны некорректными процедурами транспортировки анодов. Часто трещины бывают едва видны, структура материала реагирует на напряжения, составляющие всего лишь 10% от максимально допустимого напряжения.

### **4.1.2 Вертикальные и горизонтальные трещины**

Для разрыва анода в вертикальном направлении необходимо воздействие растягивающих напряжений в горизонтальной плоскости. Такие напряжения могут создаваться несколькими механизмами, независимыми друг от друга.

В процессе обжига зеленых анодных блоков происходит выделение паров пека в критическом диапазоне температур от 200 до 600°C. На этом этапе

образуется внутреннее давление, которое может превысить допустимые пределы анода. Этот эффект усиливается, если выбран слишком высокий градиент температур (т.е., скорость нагрева). В крайних случаях образование трещин в анодах происходит уже в обжиговой печи. Обычно плоскость трещины проходит непосредственно через центр анода, где ширина минимальна. Очевидно, что в обычной ситуации после обжига наличие фатальных трещин в аноде не наблюдается. Еще одним источником образования вертикальных трещин является операция установки анодных штырей. При первом подходе параметры установки (геометрия ниппеля и ниппельного гнезда, температура предварительного нагрева ниппеля) выбираются таким образом, чтобы обеспечить по возможности плотный контакт ниппель – угольный блок. За счет этого обеспечивается максимальная электропроводность этого соединения в электролизере. Однако слишком плотное соединение вызывает критические напряжения в угольном блоке. Часто можно наблюдать радиальный рост трещин от ниппельного гнезда. После установки анода в электролизер зона максимальных напряжений постепенно смещается из углов в центр анода. Образующаяся деформация растяжения может возрасти до 90 % от показателя в углах. Максимум достигается примерно через один час после замены анода.

В ходе процесса электролиза температура головной части анода постепенно возрастает по мере опускания анода и приближении к поверхности электролита. В случае относительно коротких ниппелей температура траверсы, а значит, и тепловое расширение может достигать значения, которое превышает допустимый уровень анода (поскольку коэффициент теплового расширения стальной траверсы выше коэффициента теплового расширения угольного анода). В этом случае на головную часть анода воздействует растягивающая нагрузка между ниппельными гнездами, что также может привести к образованию вертикальной трещины. Обычно трещины такого рода возникают в аноде перед завершением срока службы, когда высота анода становится минимальной. Таким образом, не существует прямой связи между этим типом вертикальных трещин и тепловым ударом, если только не произошло предварительное ослабление анода за счет тепловых напряжений при тепловом ударе. В зависимости от ранее существовавших трещин (например, после процесса обжига) или любых иных образовавшихся механических напряжений от соединения ниппель угольный блок или от траверсы вертикальные трещины могут проходить между двумя ниппелями или непосредственно через ниппель. В последнем случае существует потенциальная опасность падения куска анода в ванну (с последующим нарушением режима работы электролизера), поскольку он уже не удерживается ниппелем.

Образование горизонтальных трещин в аноде является наиболее вредным для работы электролизера, поскольку нижняя часть анода – на расстоянии от четверти до половины от его высоты – падает в ванну. Для образования горизонтальной трещины требуется наличие существенного растягивающего напряжения, действующего в вертикальном направлении. При нормальных условиях значения напряжений, образующихся в результате теплового удара,

весьма далеки от критического уровня. Образование горизонтальных трещин можно объяснить за счет ранее существовавших трещин, ослабивших материал потерей, наряду с тепловым ударом. Трещины такого рода уже присутствуют в виде небольших горизонтальных трещин; скорее всего, они появились в процессе формования.

### 4.1.3 Влияние теплового удара

Зачастую на практике образование трещин любого типа в анодах рассматривается как результат теплового удара. На рисунке 47 показано, что существует множество других источников, которые могут вызвать образование трещин в анодах. Как уже отмечалось, лишь угловые трещины можно рассматривать как прямой результат теплового удара. И вертикальные, и горизонтальные трещины в анодах обычно сопровождаются другими явлениями, которые возникают в электролизе дополнительно к тепловому удару.

### 4.2 Расчет растягивающего напряжения вокруг ниппельных гнезд

Напряжения вокруг ниппельных гнезд достигают первого максимума в ходе монтажа штырей, когда температура ниппеля максимальна. В этой работе такая температура носит название «температуры баланса» (ТОВ), поскольку она отражает этап, на котором температуры ниппеля и чугуновой заливки равны. Теплоперенос от чугуновой заливки к ниппелю описывает следующим образом:

$$\Delta Q = m_{\text{cast iron}} \cdot c_{p,\text{cast iron}} \cdot \Delta T_{\text{cast iron}} = m_{\text{stub}} \cdot c_{p,\text{stub}} \cdot \Delta T_{\text{stub}} \quad (41)$$

Поскольку теплоемкости чугуновой заливки и стали равны, уравнение (41) можно упростить и определить температуру баланса ТОВ:

$$\text{ТОВ} = \frac{m_{\text{stub}} \cdot T_{p,\text{stub}} + m_{\text{cast iron}} \cdot T_{l,\text{cast iron}}}{m_{\text{stub}} + m_{\text{cast iron}}} \quad (42)$$

где:

$\Delta Q$  [Дж] - тепло;

$m_{\text{stub}}$  [кг] - масса ниппеля =  $1.5 \cdot 9.55$  кг = 14.33 кг;

$m_{\text{cast iron}}$  [кг] - масса чугуновой заливки = 3.45 кг;

$c_p$  [Дж/кг/К] - теплоемкость стали, чугуна  $c_p = 250$  Дж/кгК;

$T_{p,\text{stub}}$  [°C] - температура предварительного нагрева ниппеля;

$\Delta T_{p,\text{stub}} = 150$  °C;

$T_{l,\text{cast iron}}$  [°C] температура ликвидуса чугуна = 1400 °C;

ТОВ = 392 °C.

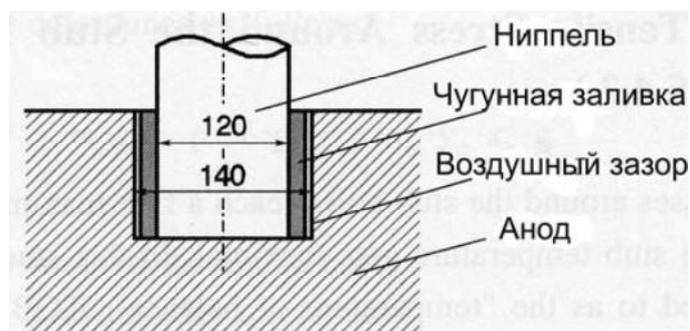


Рисунок 48 – Схематическое представление ниппеля в разрезе

Напряжения в аноде при определенной температуре возникают за счет удлинения ниппеля/чугунной заливки относительно угольного материала. Это удлинение определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta L}{L} = \epsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (43)$$

где:

$\Delta L$  [m] изменение длины;

$L$  [m] общая длина;

$\epsilon$  [-] напряжение;

$\alpha$  [K-1] коэффициент теплового напряжения;

$\Delta T$  [K] изменение температуры.

Поскольку предполагается, что в процессе монтажа штырей все тепло из чугуна проникает в ниппель, тепловым расширением анода на этом этапе можно пренебречь. Таким образом, воздушный зазор и образующееся в аноде напряжение при температуре баланса ТОВ можно определить следующим образом:

$$\Delta L_{\text{stub}} = \varnothing_{\text{stub}} \cdot \alpha_{\text{stub}} \cdot (T_{\text{ОВ}} - T_{\text{p,stub}}) \quad (44)$$

где:

$\Delta L_{\text{stub}}$  [м] - изменение диаметра ниппеля;

$\varnothing_{\text{stub}}$  [м] - диаметр ниппеля = 120 мм;

$\alpha_{\text{stub}}$  [K-1] - коэффициент теплового расширения стали =  $1.6 \cdot 10^{-5}$ ;

$\Delta L_{\text{stub}} = 0,4646$  мм

$$\Delta L_{\text{cast iron}} = D_{\text{cast iron}} \cdot (\alpha_{\text{cast iron}} \cdot (T_{\text{s,cast iron}} - T_{\text{ОВ}}) + S_{\text{cast iron}}) \quad (45)$$

где:

$\Delta L_{\text{cast iron}}$  [м] - изменение толщины чугунной заливки;

$D_{\text{cast iron}}$  [м] - толщина чугунной заливки = 20 мм;

$T_{s, \text{ cast iron}} [^{\circ}\text{C}]$  - температура солидуса чугуна = 1150°C;  
 $S_{\text{cast iron}}$  - усадка чугуна при застывании = 0.01мм;  
 $\Delta L_{\text{cast iron}} = 0.4350$  мм.

Воздушный зазор между ниппелем/чугунной заливкой и периметром ниппельного гнезда (рисунок 48) можно определить следующим образом:

$$\Delta L_{\text{air gap}} = \Delta L_{\text{cast iron}} - \Delta L_{\text{stub}} = - 0.0297 \text{ мм} \quad (46)$$

Отрицательный знак указывает на то, что воздушного зазора не существует и что анод подвергается растягивающим напряжениям:

$$\sigma_{\text{anode}} = - \frac{E_{\text{anode}} \cdot \Delta L_{\text{air gap}}}{L_{\text{anode}}} \quad (47)$$

где:

$\sigma_{\text{anode}} [N/m^2]$  - растягивающее напряжение в аноде около ниппельного гнезда;

$E_{\text{anode}} [N/m^2]$  - модуль Юнга анода, =  $5.0 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>;

$L_{\text{anode}} [m]$  - диаметр ниппельного гнезда, = 140 мм;

$\sigma_{\text{anode}} = 1.04$  МПа.

Напряжения, возникающие в ходе электролиза, можно определить аналогичным образом по уравнениям (44) и (47). Наивысшие возможные напряжения достигаются к концу срока службы анода, когда температура головной части анода становится максимальной. В дальнейшем напряжения в аноде определяются для (теоретической) температуры ниппеля в 960°C.

$$\Delta L_{\text{anode}} = D_{\text{anode}} \cdot \alpha_{\text{anode}} \cdot (T_0 - T_{\text{ambient}}) \quad (48)$$

где:

$\Delta L_{\text{anode}} [m]$  - изменение диаметра ниппельного гнезда;

$D_{\text{anode}} [m]$  - диаметр ниппельного гнезда = 140 мм;

$\alpha_{\text{anode}}$  - коэффициент теплового расширения анода =  $4.0 \cdot 10^{-6}$ ;

$T_0 [^{\circ}\text{C}]$  - фактическая температура = 960°C;

$T_{\text{ambient}} [^{\circ}\text{C}]$  - окружающая температура = 25°C;

$\Delta L_{\text{anode}} = 0.5236$  мм

$$\Delta L_{\text{stub}} = \varnothing_{\text{stub}} \cdot \alpha_{\text{stub}} \cdot (T_0 - T_{p, \text{ stub}}) \quad (49)$$

где:

$\Delta L_{\text{stub}} [m]$  - изменение диаметра ниппеля;

$\varnothing_{\text{stub}}$  [м] - диаметр ниппеля = 120 мм;  
 $\alpha_{\text{stub}}$  - коэффициент теплового расширения стали =  $1.6 \cdot 10^{-5}$  ;  
 $T_{\text{p,stub}}$  [°C] - температура предварительного нагрева ниппеля  
 $\Delta T_{\text{p,stub}} = 150^\circ\text{C}$ ;  
 $\Delta L_{\text{stub}} = 1.552$  мм.

$$\Delta L_{\text{cast iron}} = D_{\text{cast iron}} \cdot (\alpha_{\text{cast iron}} \cdot (T_{\text{s,cast iron}} - T_0) + S_{\text{cast iron}}) \quad (50)$$

где:

$\Delta L_{\text{cast iron}}$  [м] - изменение толщины чугунной заливки;  
 $D_{\text{cast iron}}$  [м] - толщина чугунной заливки = 20 мм;  
 $\alpha_{\text{cast iron}}$  - коэффициент теплового расширения чугуна =  $1.5510^{-5}$ ;  
 $T_{\text{s, cast iron}}$  [°C] - температура солидуса чугуна =  $1150^\circ\text{C}$ ;  
 $S_{\text{cast iron}}$  - усадка чугуна при застывании = 0.01 мм;  
 $\Delta L_{\text{cast iron}} = 0.2589$  мм.

Воздушный зазор между ниппелем/чугунной заливкой и периметром ниппельного гнезда можно определить следующим образом:

$$\Delta L_{\text{air gap}} = \Delta L_{\text{anode}} - \Delta L_{\text{stub}} + \Delta L_{\text{cast iron}} = -0.7727 \text{ мм} \quad (50)$$

Отрицательный знак указывает на то, что воздушного зазора не существует и что анод подвергается растягивающим напряжениям (см. уравнение 47):  $\sigma_{\text{anode}} = 27.6$  МПа.

### 4.3 Выводы и рекомендации

Две основные цели, поставленные в данной главе, заключались в следующем:

1. Определение различных механизмов образования трещин и оценка их происхождения;
2. Разработка мер определения характеристик поведения анода при образовании трещин с целью устранения механических разрушений анодов до, а также в процессе их использования в электролизерах.

Предлагаемые меры являются практически осуществимыми с точки зрения технических возможностей на алюминиевых заводах.

Исследования показали, что образование трещин в анодах может быть вызвано несколькими причинами, независимыми друг от друга.

Поведение при образовании трещин в основном зависит от следующих трех этапов производства и эксплуатации анодов.

Качество сырьевых материалов. Наиболее предпочтительным сырьевым материалом для производства анодов с высокой стойкостью к тепловому удару является анизотропный игольчатый кокс.

Качество и стабильность процесса производства анодов. Основная цель заключается в производстве анодов с высокой однородностью с незначительными колебаниями физических свойств. Грубый состав с умеренным содержанием пека уменьшает появление проблем при перемешивании и обжиге, тем самым повышая модуль Вейбулла и энергию разрушения. Интенсивное перемешивание зеленой анодной массы (в идеальной комбинации с устройством предварительного нагрева и повторного охлаждения), а также малый градиент температур обжига являются наиболее предпочтительными параметрами для достижения высокой стойкости к тепловому удару.

Жесткость теплового удара в электролизере. Теплообмен между электролитом и анодом должен быть по возможности незначительным. Малый перегрев, незначительные перемещения металла и электролита (т.е., отсутствие горизонтальных токов за счет неравномерной боковой настыли), малая глубина погружения, и малые размеры анода являются благоприятными факторами для достижения мягкого теплового удара.

Относительные значимости этих этапов могут рассматриваться как эквивалентные друг другу.

Поведение угольных анодов при образовании трещин было исследовано на основании механики разрушения хрупких твердых тел. Был выведен показатель стойкости к тепловому удару (TSR), в котором принимаются в расчет следующие значимые факторы:

- механические свойства анода;
- колебания свойств;
- размеры анода;
- условия в электролизере.

На основании показателя стойкости к тепловому удару TSR можно оценить возможную опасность разрушения анода под воздействием теплового удара. Практическая значимость расчетного показателя стойкости к тепловому удару TSR оказалась очень высокой. Анализ работы реального алюминиевого завода в течение 20 месяцев выявил корреляцию между средним показателем образования трещин в анодах и показателем стойкости к тепловому удару TSR, которая составила  $-0.85$ . Колебания показаний энергии разрушения (выраженных в виде модуля Вейбулла) являются тем свойством, которое оказывает громадное влияние на стойкость к тепловому удару. Было определено, что плохой модуль Вейбулла оказывается таким же отрицательным, как и неблагоприятные условия в электролизере, которые приводят к чрезмерному теплообмену. На практике это означает, что образование трещин можно предотвратить более эффективным образом, улучшив показатель колебаний, а не среднее качество анодов.

В отношении мировой алюминиевой промышленности и поставок сырьевых материалов для анодов в ближайшем будущем можно ожидать появление следующих тенденций:

- Ухудшение качества сырьевых материалов:

Потребуется производить переработку более изотропных нефтяных коксов с высоким содержанием серы и ванадия. В результате пострадают механические свойства, а также возрастут показатели расхода. Еще одним результатом будет влияние на условия в электролизере, при этом повысится жесткость теплового удара.

Из-за повышения экологических требований содержание серы в нефтяных коксах может превратиться в одну из главных проблем. Поскольку пековый кокс отличается крайне высокой чистотой, он станет идеальной альтернативой нефтяному коксу в качестве сырьевого материала для производства анодов. В частности, реакционная способность на воздухе оказалась выше, чем у нефтяного кокса. Однако пековый кокс является очень твердым и неупругим, а также имеет высокий коэффициент теплового расширения. Таким образом, следует ожидать случаев жестких тепловых ударов.

- Повышение силы тока электролизеров:

В электролизерах с высокой силой тока магнитные явления приводят к опасным перемещениям металла и электролита при нарушениях теплового баланса. Повышение силы тока серии обычно сопровождается увеличением размера анодов для поддержания плотности тока в критических пределах. Однако более крупные аноды характеризуются более высоким колебанием механических свойств.

Следует принять, что жесткость теплового удара будет повышаться, при этом стойкость к тепловому удару скорее всего будет понижаться. Такие неблагоприятные тенденции необходимо компенсировать повышением качества производства анодов.

Дальнейшее повышение стойкости к тепловому удару (наряду с уже предложенными мерами) можно обеспечить, проведя исследования в следующих областях:

- оптимизация параметров обработки зеленого кокса для производства прокаленного кокса с вышеупомянутыми характеристиками;
- разработка практических мер по оптимизации микроструктуры с целью улучшения поведения R-кривой и механизмов упрочнения трещин в аноде (т.е., технологии перемешивания, переработки сырьевых материалов с получением конкретного распределения размеров частиц);
- оптимизация формы анодов и конструкции траверсы для минимизации концентрации напряжений;
- разработка неразрушающих методов испытаний, которые можно применять до замены анодов с целью определения соответствия свойств анода предъявляемым требованиям производства или же для отбраковки анодов.

На основании вышеприведенных тенденций можно сделать вывод, что проблемы теплового удара скорее всего возрастут. Поэтому разработка мер по производству анодов с высокой стойкостью к тепловому удару даже и при неблагоприятных граничных условиях представляет большой научный интерес и будет весьма полезна для промышленности.

## 5 Перспективы анодного производства

Производительность новых заводов составит 0,5 – 1,5 миллионов тонн металла в год и даже больше. Для обеспечения работы таких заводов потребность в анодах составит 0,3 – 1 миллион тонн анодов в год. Перед анодным производством стоит задача обеспечить необходимое количество производимых анодов адекватного качества даже при ухудшении свойств сырья. К счастью имеются проверенные инструменты для проектирования и эксплуатации таких анодных производств. В данном разделе приводится описание ключевых элементов, которые необходимо отслеживать, а также путей интегрирования данных элементов с целью гарантированного производства необходимого количества анодов требуемого качества.

### 5.1 Применение инструментов вычислительной гидрогазодинамики

При правильном проектировании и эксплуатации печей срок службы простенок может достигать десяти лет. До начала строительства печи необходимо провести оптимизацию конструкции с помощью инструментов вычислительной гидрогазодинамики (Рисунок 49, 50). Внесение каких-либо изменений в течение первых 10 лет после запуска печи приведет к ненужным дополнительным расходам. Оптимизация конструкции должна быть произведена в отношении не только простенков, но и других компонентов, таких как переходной канал, вытяжная рампа, углубление газохода и система трубопровода газоочистки.

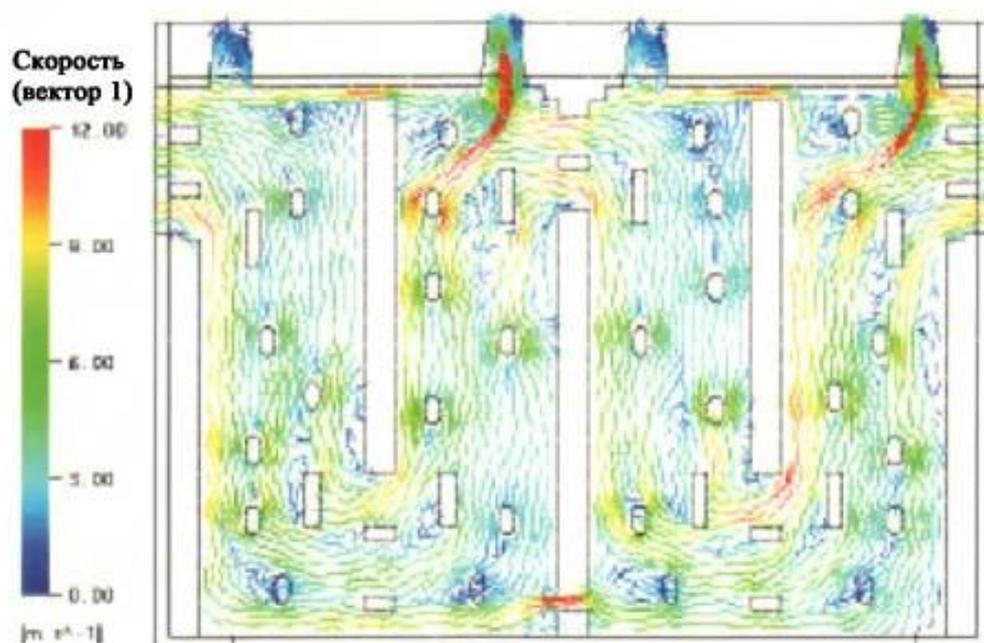


Рисунок 49 – Изображение скорости газа

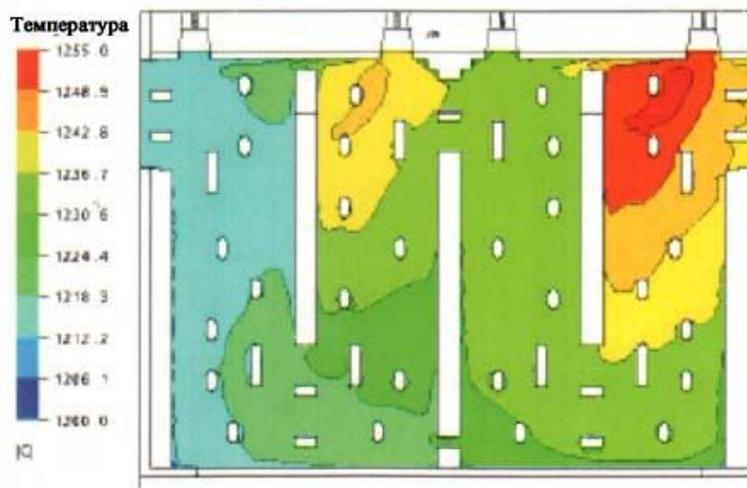


Рисунок 50 – Изображение температуры простенка

## 5.2. Замена термопар оптическими пирометрами

Термопары с защитным чехлом, изготовленным из любого материала, например, Nicrobell или Silicon Carbide широко используются в качестве датчиков для измерения температуры в анодных печах. Обработка сигнала в милливольтках, производимого термопарами, является трудоёмким процессом. В самых современных конструкциях используются термопары с головными датчиками (Рисунок 51). В данных датчиках, установленных непосредственно в верхней части термопары, сигнал в милливольтках преобразуется в сигнал 4 - 20 миллиампер, который более устойчив к электромагнитным помехам. В то же время, имеется компенсация температуры, измеряемой в головке термопары.



Рисунок 51 – Головной датчик для термопары

Термопара типа N с защитным чехлом и головным датчиком часто считается самым лучшим компромиссом в отношении стоимости, точности и ожидаемого срока службы. Однако вопрос эффективности данного вида оборудования является достаточно спорным, учитывая стандартный срок службы всего лишь 2-6 месяцев и значение температурного дрейфа до 30K и более только в течение нескольких недель. Иногда для большей температурной стабильности применяются редкоземельные термопары типа R или S. При стандартном сроке службы

6 - 9 месяцев и стоимости в два – три раза выше стоимости термопары типа N, соотношение стоимости и срока службы можно признать неудовлетворительным.

В настоящее время альтернативным видом оборудования, срок службы которого достигает 10 лет и более, являются радио-пирометры, которые также называют «двухцветными пирометрами» (рисунок 52).

Выходной сигнал пирометра представляет собой сигнал 4 - 20 миллиампера, так же как и для термопары с головным датчиком. В новых печах пирометры используются нечасто. Стоимость оптического пирометра приблизительно в десять раз превышает стоимость термопары типа N. Поставщики систем управления технологическим процессом часто предлагают пирометры как единственный возможный вариант датчиков. Опыт показывает, что покупатель выбирает термопару как более дешёвую альтернативу. Всегда имеется возможность заменить термопару на пирометр позднее. Из ценовых соображений возможна замена только термопар, соединённых с горелочными мостами. Термопары, предназначенные для температурных измерений в камерах после горелочных мостов, можно не заменять. Так как данные датчики работают при более низких температурах, срок их службы является более долгим. Более того, в зоне разогрева скорость разогрева является более важным фактором, чем абсолютный уровень температуры. Температурный дрейф термопары в данной зоне не будет оказывать отрицательного воздействия на работу печи и/или качество анода.



Рисунок 52 – Пирометр с оптоволоконным соединителем с обработчиком сигнала

### **5.3 Четыре или шесть систем огня на печь вместо стандартных трех**

Для выполнения требований по объему выпуска анодов новых крупных алюминиевых заводов с выработкой металла более одного миллиона тонн в год производительность анодных производств должна составлять 500000 тонн и более. Принимая во внимание ограничения, определяемые стабильностью огнеупоров, с нынешним качеством огнеупоров (2007), производительность печи на одну систему огня ограничивается примерно 60000 тонн в год на огонь. Как следствие, для

производства полумиллиона тонн анодов в год потребуется, по крайней мере, 8 систем огня. Для восьми огней лучшим решением будет строительство двух печей, по четыре огня в каждой (рисунок 53), расположенных в линию в одном общем здании. Для других количеств более подходящей может быть конструкция печи с шестью огнями. В обоих случаях для работы с большими количествами зелёных и обожженных анодов потребуется очень эффективная логистическая система. Для загрузки и разгрузки анодов, а также работы с пересыпчным материалом, потребуются отдельные краны с обеих сторон печи (рисунок 54).

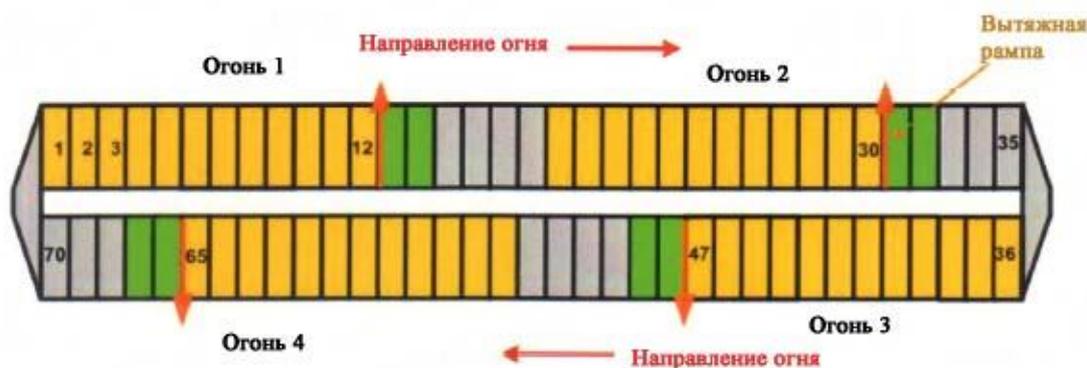


Рисунок 53 – Схема печи с 70 камерами и 4 огнями

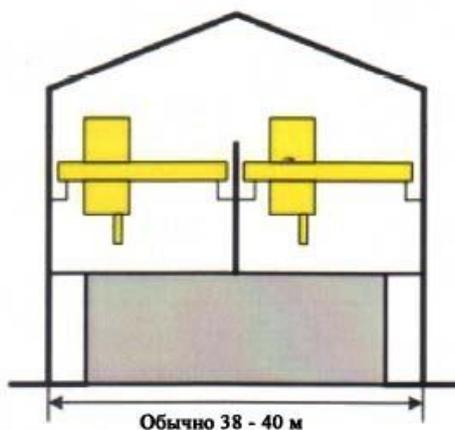


Рисунок 54 – Анодная печь с отдельными кранами для каждой стороны печи.

#### 5.4 Автоматизация крановых работ

Снижения потребности в людских ресурсах можно достичь путем полной (частичной) автоматизации крановых работ. Обычно краны печей обжига выполняют четыре функции:

- Транспортировка пересыпчного материала;
- Транспортировка анодов;
- Транспортировка оборудования во время смены огня;
- Поддержка при проведении работ по техническому обслуживанию и

ремонту.

В настоящее время считается, что автоматизация транспортировки пересыпчного материала является самой простой задачей (рисунок 55), на втором месте по простоте выполнения стоит транспортировка анодов. В целях достижения эффективности работы кранов требуется использование обычной кабины крановщика, а также прибора ручного радиографического управления (рисунок 56).



Рисунок 55 – Извлечение пересыпчного материала из кассеты для анодов



Рисунок 56 – Беспроводное устройство управления краном

### **5.5 Предотвращение налипания пересыпчного материала на аноды**

Явления налипания летучих веществ пека и слипания анодов могут серьезно нарушить ровный ход работы печи. Налипание пересыпчного материала на аноды (рисунок 57) или на простенки (рисунок 58) до сих пор является проблемой для многих предприятий. Еще более серьезные последствия имеет слипание анодов, поскольку это может привести к тому, что вес «пакетов» анодов превысит грузоподъемность крана. В целях предотвращения слипания анодов применяются картонные или даже деревянные клинья (рисунок 59). Очевидно, что разделение анодов клиньями представляет собой работу, затратную по времени и трудоресурсам.

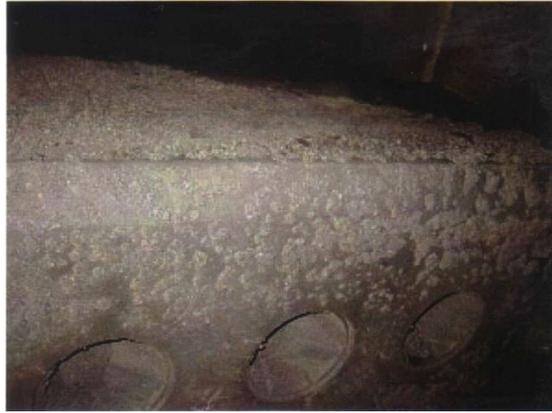
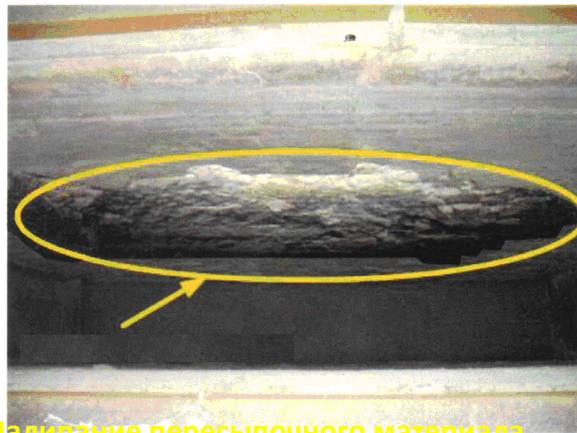


Рисунок 57 – Налипание пересыпочногo материала на обожженный анод



Налипание пересыпочногo материала

Рисунок 58 – Налипание пересыпочногo материала на простенок



Рисунок 59 – Разделение анодов деревянными клиньями для предотвращения слипания

Слипание анодов и налипание пересыпочногo материала, в основном, вызвано недостаточно высоким качеством состава зеленых анодов и некорректными параметрами формования. Возможным выходом является производство анодов с минимальным возможным содержанием связующего вещества при условии поддержания качества анодов на

высоком уровне. Внедрение плана по «Оптимизации динамики процесса» [13] в смесильно-прессовом отделении – самый быстрый способ определения набора оптимальных рабочих параметров, в которых учитывается качество анодов, равно как и факт слипания анодов или налипания пересыпочногo материала.

Исследования, проведенные на полноразмерных простенках, показали, что налипание пересыпочногo материала на простенки напрямую зависит от состава и качества изготовления огнеупорных кирпичей. Были выявлены виды кирпичей, на которых регистрировалось меньшее прилипание пересыпочногo материала [92]. По причинам, которые до сих пор (2007) полностью не были определены, никаких открытий в отношении огнеупорных кирпичей сделано не было. Необходимы дополнительные исследования в этой области.

### **5.6 Усовершенствования конструкций**

Несмотря на уже внесенные значительные изменения в конструкцию печей, до сих пор (2007) изгиб поперечных перегородок и простенков в существующих (старых) печах представляют проблему (рисунок 60). При проектировании современных печей основной упор делается на конструкцию огнеупора, которая позволила бы избежать изгибов поперечных перегородок и простенков в течение всего рабочего цикла огнеупора.



Рисунок 60 – Изгиб поперечной перегородки

### **5.7 Установка рекуперативного воздухонагревателя в магистрали отходящих газов**

На горелочном оборудовании печи обжига используется сжатый воздух для распыления топлива. Сжатый воздух подается в цех с компрессорной станции.

В холодное время года температура сжатого воздуха не поднимается выше 0°C.

Что в свою очередь способствует значительным потерям тепла в камерах печи обжига. Также в процессе эксплуатации печи был выявлен серьезный недостаток горелочного оборудования. Во время работы в условиях низких температур, подогреваемый мазут застывал в местах подверженных воздействию холода. Основным таким местом является головная металлическая часть горелки, где соединены шланг с топливом и рабочим воздухом.

Данную проблему решит предварительный нагрев воздуха в рекуперативном воздухоподогревателе установленного в магистрали отходящих газов печи (Рисунок 61).

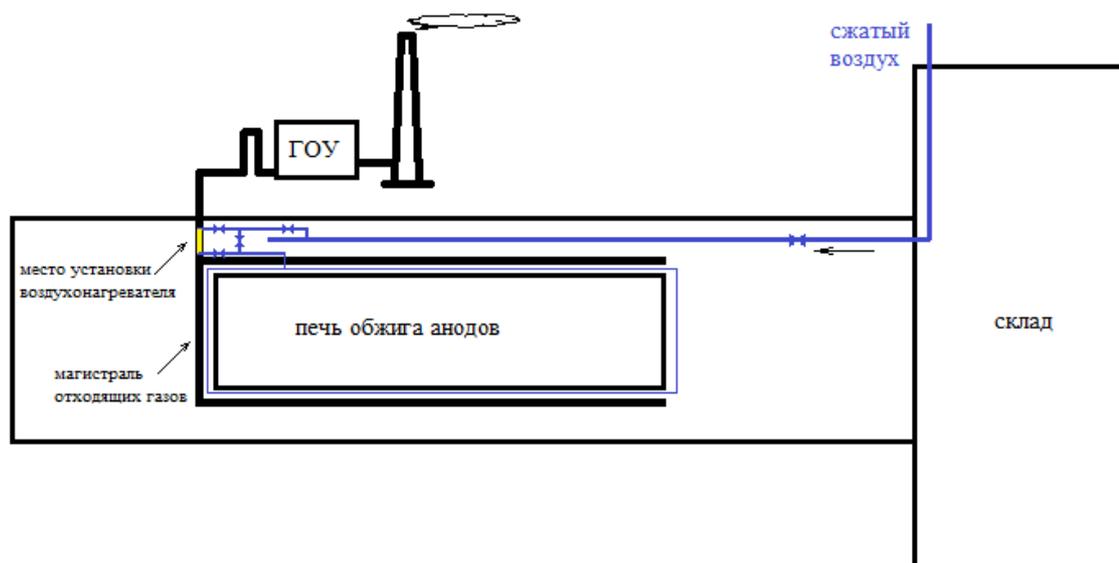


Рисунок 61 – Установка воздухоподогревателя в магистраль отходящих газов

Температура потока газов в магистрали на выходе из печи в среднем порядка 150°C. Достаточным будет являться подогрев воздуха до 60 -70°C.

Данное решение приведет к дополнительному притоку тепловой энергии что в свою очередь снизит расходы топлива в каждой горелке для поддержания заданной температуры. Также данное внедрение решит проблему с застыванием мазута в горелках, что приведет к стабильной работе горелок и в свою очередь равномерному нагреву анодов и как следствие качественному обжигу.

## 5.8 Усовершенствования систем технологического контроля

Современные системы контроля за работой печей обжига существуют на рынке с начала 80-х годов 20-го века. Что касается регулирования работы печи обжига, на данный момент (2007) основная тенденция в этом направлении может быть выражена как «лучше меньше, да лучше». Путем проведения анализа данных, собранных за более чем два десятилетия, удалось выявить возможности для упрощения систем без снижения точности контроля и/или качества анода. Развитие программного обеспечения идет по направлению улучшения интерфейса

для пользователей, который будет скорее сигнализировать о неприемлемых отклонениях от стандартной рабочей ситуации, нежели чем просто отражать нормальное поведение печи в работе.

В печах, где мониторинг температур выполняется пирометрами спектрального отношения, полученные данные могут использоваться для контроля сгорания летучих веществ пека.

В цехах производства анодов на многих предприятиях вплоть до сегодняшнего дня автоматизация ограничивается «точечным» контролем, как например, системами управления весами или миксерами. В то же время претерпела значительные усовершенствования и была запатентована интегрированная система управления для цеха анодной массы и участка формования анодов. После внедрения такой системы, не остается обоснованных причин, по которым подобная система не могла быть объединена с системой технологического контроля работы печи обжига. При условии соединения с системой определения и отслеживания анода, будет значительно проще выявить связь между характеристиками сырьевого материала, условиями производства зеленых анодов и параметрами обжига анодов с поведением анодов в ванне электролизера.

Стратегии по снижению выбросов печей обжига не должны концентрироваться только на очистке отходящих газов. Размеры, инвестиционные и эксплуатационные затраты на очистное оборудование, во многом, определяются работой установок и эффективностью операций, проводимых на более ранних стадиях, таких как:

- очистка и подготовка анодных огарков;
- конструкция и работа смесильно-прессового отделения;
- конструкция печи обжига и оптимизация процесса.

С учетом этого, необходимо выполнять следующие рекомендации.

При очистке анодных огарков необходимо обеспечивать максимальное удаление электролита и глинозема. Необходимо стремиться снизить содержание примесей до уровня  $F < 400 \text{ ppm.}$ ,  $Na < 200 \text{ ppm.}$  Низкий уровень F не только упрощает процесс очистки отходящих газов, но также положительно влияет на продолжительность срока службы футеровки печи обжига и качество анодов.

Оборудование смесильно-прессового отделения должно позволять удерживать вариации пылевой фракции шаровых мельниц в пределах 300 тонн (по Блейну). При более высоких вариациях потребуются добавлять больше пека в шихту, чтобы обеспечить необходимое количество пека при производстве анодов из мельчайших частиц пылевой фракции. В результате этого, содержание пека в анодах из крупной пылевой фракции будет избыточным. Это может привести к оплыванию тела анода, налипанию тяжелого пересыпочногo материала и повышенным выбросам смолы из-за неполного сгорания летучих веществ пека в газоходах.

Работа смесильно-прессового отделения: в попытке повысить кажущуюся плотность анода и, таким образом, увеличить, срок службы анодов, иногда увеличивают долю пека без изменения прочих параметров,

таких как содержание пыли, фракция пыли, интенсивность перемешивания и температура формования. Однако, если доля пека становится выше оптимальной для прочих заданных параметров, (небольшого) повышения кажущейся плотности анода все еще возможно добиться, но в результате этого возникнут проблемы с налипанием пересыпочногo материала и неполным сгоранием летучих пека в печи. При необходимости увеличения кажущейся плотности анодов требуется интегрированный подход с оптимизацией всех необходимых параметров. Такой подход был разработан компанией «R&D Carbon Ltd.», называется «Динамической оптимизацией процесса» и позволяет проводить оптимизацию работы смесильно-прессового отделения всего за несколько дней [13, 60].

При эксплуатации печи обжига необходимо выполнять следующие рекомендации:

Температурная кривая: для повышения качества анодов и обеспечения полного (бессажного и бессмольного) сгорания летучих пека необходимо оптимизировать температурную кривую в пределах границ, заданных максимальной разрешенной температурой вытяжной ramпы и максимальной скоростью разогрева. Следует обратить внимание на то, что оптимизацию необходимо проводить каждый раз при изменении источника сырья и/или состава зеленых анодов, размера анодов или времени цикла.

Смена огня должна всегда проводиться в соответствии с графиком. Полное сгорание летучих пека невозможно при несвоевременной смене огня. «Замедление работы» печи приводит к ухудшению тяги, соответственно повышает риск недостаточной подачи кислорода. Соответственно, крайне важно проводить смену огня строго по графику, плюс минус полчаса от времени, указанного в графике.

## **5.9 Выводы и рекомендации**

Производительность новых крупных заводов составит 0,5 – 1,5 миллионов тонн металла в год. Для обеспечения работы таких заводов потребность в анодах составит 0,3 – 1 миллион тонн анодов в год. При этом серьезные нарушения основного процесса производства алюминия будут практически неуправляемы и недопустимы. Перед цехами по производству анодов будет стоять непростая задача поставлять аноды такого качества, которое исключит возможность возникновения нарушений основного процесса производства из-за ненадлежащего качества анодов. Уровень качества анодов должен сохраняться даже при изменяющихся пограничных условиях, как например, ухудшение качества сырьевого материала и изменение требований к аноду ввиду повышения тока на линии электролиза.

Для наиболее эффективного управления работой цехов по производству анодов необходимо установить минимальное возможное

количество смесильно-прессовых линий цехе анодной массы и минимальное возможное количество систем огня в печи обжига. В настоящее время (2007) производительность смесильно-прессовой линии цеха анодной массы ограничивается приблизительно 75 т/ч при коэффициенте готовности системы приблизительно 85%. Что касается печей обжига, фактическое ограничение установлено на уровне приблизительно 60 000 тонн анодов на систему огня в год.

Положительным моментом является то, что практически все элементы основного оборудования, как например, смесители, валковые мельницы, формователи анодов, печи обжига и установки очистки отходящих газов работают по уже проверенной технологии. Единственный шаг, который нужно сделать, - интеграция различных элементов.

И, наконец, нужно подчеркнуть, что рассмотренные в данной главе усовершенствования можно применять в рамках проектов модернизации, внедряемых в меньших и более старых цехах по производству анодов.

## Заключение

### **Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.**

1) В настоящее время кольцевые печи с открытым верхом являются самым последним словом техники в области обжига анодов. Основные положения по печам обжига и процессу обжига анодов были рассмотрены и изучены в полном объеме в данной работе.

2) Проведены исследования механизма и кинетики процессов, происходящих при обжиге с целью определения путей его совершенствования и повышения экономической эффективности, а также теоретические и экспериментальные исследования процесса обжига и определены оптимальные условия формирования структуры углеграфитовых заготовок и выявлены взаимосвязи между физико-химическими процессами, протекающими на различных стадиях обжига.

3) На базе сформированного краткого теоретического описания физико-химических процессов, протекающих в углеграфитовых заготовках при обжиге было разработано комплексное математическое описание процесса обжига с учетом специфики камерного обжига заготовок для дальнейшего изучения и совершенствования техники и технологии обжига электродных заготовок. Анализ результатов моделирования температурного поля камеры традиционной обжиговой печи указывает на существенные недостатки в ее конструкции (в частности: неэффективное использование объема камеры; высокая тепловая инерционность загрузки в целом, и как следствие, увеличение продолжительности обжига; локальный перегрев заготовок при сжигании топлива; не равномерный нагрев заготовок по высоте и т.д.). По данным факторам предложены существенные конструктивные и организационные изменения в технологию обжига.

4) Определены различные механизмы образования трещин в обжигаемой продукции и оценка их происхождения, разработаны меры определения характеристик поведения анода при образовании трещин с целью устранения механических разрушений анодов до, а также в процессе их использования в электролизерах. Предлагаемые меры являются практически осуществимыми с точки зрения технических возможностей на алюминиевых заводах.

5) Рассмотрены перспективные направления в развитии анодного производства по повышению качества продукции и условий работы производственной линии в целом.

**Оценка полноты решений поставленных задач.** В результате проведенных исследований было подробно изучено влияние факторов на процесс обжига и предложены способы и внедрения по оптимизации работы печи и качеств обжигаемых изделий.

**Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов.** Полученные теоретические результаты имеют существенное значение для практики анодного производства и могут быть использованы при разработке новых, совершенствовании применяемых технологий обжига. Технологические результаты могут быть использованы в

анодном производстве при обжиге анодов для улучшения технико-экономических показателей производства.

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения.** Предложенные внедрения по оптимизации технологии анодного производства, такие как конструктивные решения и совершенствование систем технологического контроля, значительно повысят качество продукции, сведется к минимуму выход брака, а также стабилизируются энергетические параметры.

**Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.** Работа выполнена на научном уровне на основе теоретических исследований в области физико-химических процессов обжига и разработанных математических описаний процесса обжига. Уровень работы подтверждается теоретически обоснованными исследованиями, и внедрениями новых конструктивных решений в процесс обжига анодных изделий.

## Список использованной литературы

1. Чалых Е.Ф. Очерки по истории зарубежной электродной промышленности. - М.: МИСИС, 1995. - 160 с.
2. Чалых Е.Ф. История электродной и электроугольной промышленности России. - М.: Metallurgia, 1992. - 224 с.
3. Селезнев А.Н., Шипков Н.Н. Электродное производство сегодня //Цветные металлы. - 1996. - №12.- С. 48 - 49.
4. Технические условия на блочную продукцию ТУ 1913-001-00200992-95, 1995 г.
5. R&D Carbon Ltd. Anodes for Aluminium Industry //1-st Edition.1995. Sierre • (Switzerland).- 394 h.
6. Селезнев А.Н. Производство углеродной продукции в России и перспективы ее использования в черной и цветной металлургии //Сб. науч. Тр./Уралэлектродин- Челябинск, 1999.- С.5 -11.
7. Фиалков А. С. Углеграфитовые материалы.- М.: Энергия, 1979.- 320 с.
8. Чалых У.Ф. Оборудование электродных заводов.- М.: Metallurgia, 1990.- 125 с.
9. Санников А.К., Сомов А.К., Ключников В.В. и др. Производство электродной продукции. - М.: Metallurgia,- 1985.- 129 с.
10. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Издательский дом «Руды и металлы».- 2001.- 670 с.
11. Лукина Э. Ю., Николаев А. И. Структура и свойства углеродных материалов. Науч. тр. НИИграфит.- М.: Metallurgia.- 1987.- С. 26-31.
12. Островский В. С., Виргильев Ю. С., Костиков В.И., Шипков Н. Н. Искусственный графит.- М.: Metallurgia- 1986.-272 с.
13. Кузин Б. М., Шабуров Е. Н., Алексеев А. А., и др. Совершенствование технологии производства электродов диаметром 555 мм.- В кн.: Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. Сб. науч. Трудов ГосНИИЭПа. Вып. 7. Челябинск, Южно - Уральское кн. Изд-во, 1975 г.
14. Френкель Я.И. //Журнал физики.- Е. 9. 1945.- С. 385-390.
15. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания.-М.: Химия.- 1976.
16. Гегузин Я.Е. Физика спекания. - М.: Наука.- 1984. -78 с.
17. Чалых Е.Ф. Обжиг электродов.- М.: Metallurgia,- 1981.-116 с.
18. Молокова Т. Л., Нонишева Н. П., Соборницкая Т. Н. Оптимизация режима охлаждения электродных заготовок после обжига - В. кн.: Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. Сб. науч. Трудов ГосНИИЭПа. Вып. 8. Челябинск, Южно-Уральское кн. Изд-во, 1976. -115 с.
19. Фиалков А.С. Формирование структуры и свойств углеграфитовых материалов.- М.: Metallurgia.- 1965.-288 с.
20. Живых Т.И., Атманский А.И. и др. Влияние предварительной высокотемпературной обработки на свойства футеровочных, углеграфитовых

блоков //Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП.- Челябинск.- 1973.-С. 167-172.

21. Рогайлин М.И., Чалых Е.Ф. Справочник по углеграфитовым материалам.- Л.: Химия, 1974.- 206 с.

22. Крылов В.Н., Вильк Ю.Н. Углеграфитовые материалы и их применение в химической промышленности.- Л.: Химия, 1965.- 145 с.

23. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе.- М.: Аспект Пресс, 1997.- 717 с.

24. Колодин Э. А., Свердлин В. А., Свобода Р. В. Обжиг анодов для алюминиевых электролизеров.- М.: ЦНИИцветмет, 1980. - 42 с.

25. Колодин Э. А., Свердлин В. А., Свобода Р. В. Производство обожженных анодов алюминиевых электродов.- М.: Metallurgia, 1980.- 80 с.

26. Чалых Е.Ф. Технология углеграфитовых материалов.- М.: Metallurgizdat.- 1963.- 304 с.

27. Колодин Э. А., Свердлин В. А., Свобода Р. В. Обжиг анодов для алюминиевых электролизеров.- М.: ЦНИИцветмет.- 1980.- 42 с.

28. Колодин Э. А., Свердлин В. А., Свобода Р. В. Производство обожженных анодов алюминиевых электродов.- М.: Metallurgia.- 1980.- 80 с.

29. Технический отчет по выполнению теплотехнических испытаний кольцевой 30-ти камерной печи №2 цеха обжига №2 ОАО «НЭЗ». ОАО «ЭНЕРГОЧЕРМЕТ». Ростов-на-Дону. 2000.

30. Keller F., Oberdolz S. Process controlled operation of backing furnaces. Aluchemic and Alusuisse R&D Carbon (Netherlands, Switzerland). 1992. P. 134 - 137.

31. Hyvernat P., Fayet P., Lemorchand J.L. Aluminium Pechiney, AIME. //Light Metals. 1983. P. 821 -841.

32. Axel J. Rolf. Hoogovens AI Hottenwerk GmbH, AIME // Light Metals. 1992. P. 739-745.

34. Gerald F. Covanec. Century Aluminium of West Virginia, AIME // Light Metals. 2000. P. 573 - 578.

35. Sulzberger P. W., Bacon J.K. Comalko Aluminium Limited, AIME // Light Metals. 1989. P. 547-551.

36. Morbert A. Ambenne, Hero M. Bhavnani. Volta Aluminium Ltd, AIME // Light Metals. 1989. P. 553 -562.

37. Mannweiler U., Sulzberger P., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME // Light Metals. 1991. P. 635 - 639.

38. Leisenberg W. Innovatherm prof. Or. Leisenberg GmbH + Co. KG, AIME // Light Metals. 1999. P. 579 - 584.

39. Mainwald D., Schneider M. LVE Verfarenselektronik GmbH, AIME // Light Metals. 2000. P. 487-491.

40. Schneider M. Results of the installation of the new Prebake Firing and Control System. Hoogovens Voerde. Intern, business report. 1999.

41. Oberdolz S., Muhlemann O. R&D Carbon, AIME // Light Metals. 1978. P. 315

42. Молокова Т. Д., Нонишева Н.П., Фокин В.П. и др. Исследование процесса обжига углеродных заготовок в жаростойких контейнерах. Производство электродной продукции. Сб. науч. тр. - М.: НИИГрафит- 1984.- С. 37-43.
43. Лутков А.И., Калинин Э.В. Особенности обжига углерод-углеродных изделий в электрических печах. //Композиционные материалы на основе углерода. Сборник научных трудов НИИГрафит.- М.- 1991.- С. 14 - 16.
44. Riedhammer GmbH & Co. KG. Comparison between Open and Closed Carbon Baking Furnace/90332 Nuremberg. 1993.
45. Киселев А.И., Сошкин С.В., Сычева О.В. и др. Локальные средства управления процессом обжига в многокамерных печах ТадаЗа для АСТП «Обжиг»./ «Состояние и перспективы автоматизации производственных процессов цветной металлургии» (Тезисы докладов к научно-техническому совещанию)-Орджоникидзе.- 1989.-С.100-101.
46. Сошкин С.В., Априамов В.Н., Жуковецкий О.В. и др. Импульсная система управления температурным режимом обжиговых печей. //Цветная металлургия.- 1988.- №11.- С.36-37.
47. Царахов С.С., Сошкин С.В., Жуковецкий О.В. Разработка приборов для контроля высоких температур в металлургии.// «Электронные приборы и системы в промышленности». (Тезисы докладов к научно-техническому совещанию)- Орджоникидзе.- 1989.- С.21-22.
48. Пеккер И.И., Савин М.М., Васильева В.Д. и др. Возможности автоматизации обжиговой печи.//Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП.- Челябинск.- 1976.- С.77-87.
49. Сошкин С.В. К возможности создания импульсной системы сжигания топлива для камерных печей. Цветная металлургия, 1998. №3, С.55-58.
50. Сошкин С.В. Система управления обжигом электродных изделий в камерных печах и технические средства для ее реализации. Состояние и перспективы автоматизации в цветной металлургии. Тезисы докладов к конференции. Москва, 1995, С.8-9.
51. Сошкин С.В. Проектирование оптимальной системы управления обжигом электродных изделий в камерных печах. Цветная металлургия, 1998, С.68-72.
52. Сошкин С.В., Априамов В.Н., Жуковецкий О.В. Цветные металлы, 1987, №9.
53. Сошкин С.В. Системы оптимального управления обжигом электродных заготовок. Цветные металлы, 1998, №3, с.66-70.
54. Лысова Г.А., Слепова В.М., Мочалов В.В. О требованиях к нефтяным пекам. //Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП,- Челябинск.- 1988.- С.30-36.
55. Фиалков А.С., Варлаков В.П., Смирнова Т.Ю. Микроструктура нефтяного и пекового коксов. //Химия твердого топлива.- 1994.- №2.- С.49-53.
56. Бабенко Э.М., Ильина М.Н., Плевин Г.В. Исследование пиролизных пек-ков как связующего и пропитывающих материалов для производства

графитированных электродов. //Химия твердого топлива.-1981.- №4,- С.117-122.

57. Кулаков В.В., Орлов А.Ю., Пономарева Е.Н. Влияние углеродных наполнителей на термодеструкцию каменноугольного пека при температурах начала газовыделения. //Композиционные материалы на основе углерода. Сборник научных трудов НИИГрафит.- Москва.- 1991.- С. 19 - 23.

58. Селезнев А.Н., Шипков Н.Н. К вопросу использования углей и продуктов их переработки в электродной и алюминиевой отраслях металлургии //Твердые горючие ископаемые в решении экологических проблем топливно-энергетического комплекса России. Тез. докл. научной сессии научного Совета/РАН- Звенигород, 1998.- С. 218-220.

59. Сомов А.Б., Телегин А.С., Молокова Т.Л. К вопросу о повышении качества прокаливания углеродного сырья во вращающихся печах. //Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП.- Челябинск, 1988.- С.36-46.

60. Лукина Э.Ю., Рогозин В.В., Лаврухин П.Ф. и др. Исследование влияния предварительной сушки непрокаленного кокса на поведение при обжиге композиций на его основе.//Конструкционные материалы на основе углерода, № 12,- М.: Металлургия.- 1977.- С. 15-18.

61. Устинов Ю.В., Дьяконов Л.И., Новикова Р.И. и др. Особенности освоения технологии изготовления прессованных изделий из углеродных масс. //Разработка и освоение новых видов продукции: Сб. науч. Трудов/НИИГрафит, ГОСНИИЭП.- Москва.- 1987.-С. 44-48.

62. Полисар Э.Л., Виноградова К.П. Методы подбора содержания связующего в прессмассах. //Конструкционные материалы на основе углерода: Сб. науч. Трудов НИИГрафит.- М.: Металлургия, 1977.- С.11-15.

63. Дьяконов Л.И., Устинов Ю.В., Новикова Р.И. и др. Вакуумирование массы и физико-механические показатели углеродных изделий. //Разработка и освоение новых видов продукции: Сб. науч. Трудов/НИИГрафит, ГОСНИИЭП.- М., 1987.-С.40-44.

64. Балыкин В.П., Зайцев В.А., Санников А.К. и др. Влияние способов тонкого измельчения наполнителей на свойства углеродных композиций. //Разработка и освоение новых видов продукции: Сб. науч. Трудов/НИИГрафит, ГОСНИИЭП.- Москва,- 1987.-С. 52-59.

65. Островский В.С., Синельников Л.З., Лукина Э.Ю. и др. Изучение усадки нефтяного пиролизного кокса при термообработке. //Композиционные материалы на основе углерода. Сборник научных трудов НИИГрафит.- Москва.- 1991.- С. 8 - 14.

66. Санников А.К., Фомина В.Н., Гольдштейн Л.М. и др. Влияние шихтовки коксов различной структуры на качество графитированного материала. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП.- Челябинск.- 1988.- С.115-123.

67. Молокова Т. Л., О дифференциации скоростей нагревания электродных заготовок в процессе обжига - В. кн.: Совершенствование технологии и

улучшение качества электродной продукции. Сб. науч. Трудов ГосНИИЭПа. Вып. 7. Челябинск, Южно-Уральское кн. Изд-во, 1975.-253 с.

68. Чалых Е.Ф. Технология углеграфитовых материалов. М.: -Металлургиздат.- 1963.-304 с.

69. Свердлин В.А., Ласукова Л.П., Литвинов Е.В. //Цветные металлы.- 1980.- №3.- С. 56-59.

70. Claver J.E., Coste V. Aluminium Peshiney, AIME// Light Metals. 1993. P 641-645.

71. Каргин В.А., Платэ Н.А., Журавлева В.Г.// Высокомолекулярные соединения. 1961. №4.

72. Лежнев Н.Н., Терентьев А.П., Новиков И.С.// Каучук и резина. 1961. №11.

73. Аграскин А.А., Чижевский Н.П. Коксование.- М:Металлургиздат, 1948. - 243 с.

74. Fisher W.K., Keller F., Perruchoud R.C., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME//Light Metals. 1993. P. 683 - 689.

75. Свердлин В.А., Приезжая Г.А., Янко Э.А. // Light Metals. VAMI. 1991. P. 673 - 678.

76. Свердлин В.А., Щукин В.А.// Цветные металлы. 1978. №12. С. 31-35.

77. Martirena H. ALUAR Alumino Argentino, AIME// Light Metals. 1983. P.749.

78. Fisher W.K., Keller F., Perruchoud R.C., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME// Light Metals. 1993. P. 683-689.

79. Огнеупоры. Технология и ремонт печей. Пер. с яп./ Под ред. Панарина А.П.-М.: Metallurgy, 1980. -216 с.

80. Colin P. Hughes. Comalco Reserch Centre, AIME// Light Metals. 1996. P. 521-527.

81. McClung M., Ross I.R., Chavanec G. Century Al of West Virginia, AIME// Light Metals. 2000. P. 573-479.

82. Воронков И.М. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М.: - Физмат.- 1961- 314 с.

83. Сухоруков И. Ф. Бюллетень «Цветная металлургия», 1963, № 22.

84. Сухоруков И. Ф., Костарева Т. В., Шляпин Г. Е и др. Цветные металлы, 1964, №3.

85. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей (справочник) / Под редакцией А.Б. Усачева // «Стальпроект», Научные труды, М.:, Черметинформация, 1999, 185 с.

86. В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей, М.:, Металлургия, 1990, 240 <387. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983.

88. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. В 2-х ч,- М.: - Высшая школа.-1982. -128 с.

89. Казанцев Е. И. Промышленные печи. 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Металлургия.-1975.-385 с.

90. Пустовалов В.В. Теплопроводность огнеупоров.- М.: Metallurgizdat, 1966.- 84с.
91. Обросов В.П., Молокова Т.Л., Лошкарева Л.Н. Обоснование выбора огнеупоров для обжиговых и графитировочных печей. Производство электродной продукции. Сб. науч. тр. М.-НИИГрафит-1984.- С.43-52.
92. Осташевская Н.С., Лоскутова Е.Н. и др. Изменение свойств антрацитов Горловского бассейна при термической обработке.- В сб. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции.- №7- Челябинск-1975- С. 146-152.
93. Атманский А.И., Кондрашенкова Н.Ф. и др. Сравнительная характеристика антрацитов различных месторождений и изменение их свойств при высокотемпературной обработке.- В сб. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции.- №7- Челябинск-1975- С.133-141.
94. Смирнова В.Ю., Кузин Б.Н., Кузнецов В.В. Исследование теплофизических свойств сыпучих углеродных материалов в процессе нагрева до 1800°C. Производство электродной продукции. Сб. науч. тр.- М.: -НИИГрафит- 1984- С. 107-113
95. Лутков А.И., Михайлов В.Н., Хижняк П.Е. Контактное термосопротивление углеродных засыпок. //Композиционные материалы на основе углерода. Сб. науч. Тр. НИИГрафита.- Москва.-1991- С. 39-41.
96. Лутков Э.Ю., дымов Б.К., Волга В.И. тепло- и электропроводность конструкционного графита в интервале 80-2500°К //Конструкционные материалы на основе графита: Сб. науч. тр. /НИИГрафит- М.: Metallurgiya, 1969.- №4.- С. 59-66.
97. Соседов В.П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник под редакцией Соседова В.П. М.: металлургия, 1975- 335с.
98. Шулепов С.В. Физика углеродных материалов. Челябинск: Metallurgiya, 1990.-336 с.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Тасимов Алибек Базылбекович**

**Исследование и совершенствование технологии производства  
обоженных анодов на АО «КЭЗ»**

**6M070900 - МЕТАЛЛУРГИЯ**

**Реферат  
диссертации на соискание академической степени магистра техники и  
технологии**

**Павлодар, 2014**

## Реферат

Диссертация магистра металлургии содержит 83 страниц, 61 рисунок, 98 литературных источника.

### **Исследование и совершенствование технологии производства обожженных анодов на АО «КЭЗ»**

Основные сведения о производстве обожженных анодов. Цеха по производству анодов входят в состав АО «КЭЗ» и выпускают продукцию – обожженные аноды, применяемые в ЦЭА для получения алюминия методом электролиза.

По характеру технологических операций автоматизированного технологического процесса, производство обожженных анодных блоков осуществляется в трех цехах: смесильно-прессовом, обжига, по производству электродов.

В состав цеха обжига входят следующие здания и сооружения:

печь обжига анодов;

газоочистная установка;

склад обожженных и «зеленых» анодов.

Продукцией цеха обжига являются крупногабаритные обожженные анодные блоки, поступающие для дальнейшего монтажа в цех по производству электродов.

Технологическая схема электродного производства состоит из ряда основных операций: прием и подготовка сырьевых материалов; приготовление электродной массы; формирование заготовок; обжиг; пропитка; повторный обжиг; графитация; механическая обработка заготовок.

Многолетний опыт работы электродных заводов показывает, что только при точном соблюдении параметров всех технологических операций производства возможно получение высококачественной углеграфитовой продукции с заданными свойствами.

Одной из основных технологических операций, определяющих качество углеграфитовых изделий с заданными физико-механическими свойствами, является обжиг - наиболее чувствительный к небольшим изменениям технологического режима процесс, нарушение параметров которого вызывает вспышки брака, как при обжиге, так и на стадии графитации.

Производство качественного алюминия методом электролиза напрямую связано с анодным производством. Значительную часть себестоимости выплавки алюминия занимает производство анодов. По существующим технологиям с использованием предварительно обожженных анодных блоков в электролизерах, расходуется 0,4-0,5т анода на тонну алюминия. Данное производство нуждается в качественных анодах, от которых зависит чистота и себестоимость выплавленного металла. Задачи по совершенствованию и оптимизации производства анодов остаются актуальными уже много лет.

Актуальность исследования. Применение углеграфитовой продукции в черной и цветной металлургии определяет эффективность пирометаллургических процессов в целом.

Одним из важнейших переделов производства углеграфитовой продукции, определяющим качественные и экономические показатели, является обжиг в многокамерных печах открытого типа.

Цель работы: Повышение эффективности технологии обжига углеграфитовых изделий. Исследование и совершенствование технологии обжига в многокамерных печах обжига открытого типа.

Задачи исследования: Изучить влияние параметров процесса производства на свойства обжигаемых электродных изделий. Решение проблемы связанной со стабилизацией процесса обжига.

Объектом исследования является: Кольцевая многокамерная печь обжига анодов открытого типа Riedhammer в цехе обжига завода производства обожженных анодов на АО «КЭЗ»

Научная новизна исследования: Разработка математической модели процесса обжига в многокамерной печи обжига. Внедрение прогрессивных решений в области теплового баланса печи и оптимизации технологического процесса.

Практическая значимость исследования: Усовершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных обжигowych печах открытого типа. Предложено использование тепла отходящих газов для подогрева рабочего воздуха горелочного оборудования.

Апробация работы. Положения диссертационной работы доложены автором и обсуждены на научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» г. Екатеринбург, Россия.

Публикации: по основным результатам диссертационной работы опубликована статья в научном журнале «Магистрант» г. Краснодар, Россия.

## Резюме

*Магистрант – А.Б. Тасимов*

*Научный руководитель – И.К. Ибраев*

*Инновационный Евразийский Университет (г. Павлодар)*

### ***Исследование и совершенствование технологии производства обожженных анодов на АО «КЭЗ»***

В диссертационной работе рассмотрена существующая технология обжига анодов. В работе рассмотрены и исследованы: механизм и кинетика процесса обжига. Разработана математическая модель обжига. Рассмотрены перспективы анодного производства.

Полученные результаты подтверждают и научно обосновывают сложившуюся практику обжига анодов, обжигаемых в кольцевой печи открытого типа фирмы RIEDHAMMER на Казахстанском электролизном заводе.

## Summary

Undergraduate – A.B. Tassimov  
Supervisor – I.K. Ibraev  
Innovative University of Eurasia(Pavlodar)

### ***Research and improvement of the production technology of the burned anodes on JSC KAS***

In dissertation work the existing technology of roasting of anodes is considered. In work are considered and investigated: mechanism and kinetics of process of roasting. The mathematical model of roasting is developed. Prospects of anode production are considered.

The received results confirm and scientifically prove established practices of roasting of the anodes burned in the ring furnace of open type of RIEDHAMMER firm at the Kazakhstan electrolysis plant.

## **Түйіндеме**

Ммагистрант - А.М. Тасимов  
Ғылыми жетекші И.К. Ибраев  
Инновациялық Еуразия университеті (Павлодар қ.)

### **Зерттеу және күйген анодтарды өндіріс технологияны жетілдіру АҚ«КЭЗ»**

Қаралған анодтарды күйдірудің бар технологиясын диссертациялық жұмыста. Жұмысында қаралған және зерттелген: тетік және күйдірудің процесін кинетика. Күйдіру өңделген математикалық модель. Анодтық өндірістің болашақтары қарады. Алынған нәтижелерді растайды және фирма RIEDHAMMER Қазақстандық электролизді зауытындағы сақиналы пеште ашылған түріндегі күйдірілетін анодтарды күйдірудің тәжірибесін сложившуюсяларды ғылыми негіздейді.

**Справка**  
**о выполнении индивидуального учебного плана**

ФИО магистранта: Тасимов Алибек Базылбекович  
Факультет: очного обучения Инженерной Академии  
Специальность: 6М0709 – металлургия

№	Список проделанных работ по ИУП	Дата исполнения	Замечание
1	Педагогическая практика		-
2	Исследовательская практика		-
3	Научно-исследовательская работа		-
4	Публикация в научном журнале «Магистрант»		-
5	Научно–практическая конференция «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»	2013 год	-
6	Разработка и согласование плана диссертации с научным руководителем	сентябрь 2012 год	-
7	Сбор материала, анализ полученных данных	апрель–октябрь 2013 год	-
8	Выезд в зарубежные организации на научную стажировку	2013 год	-
9	Описание основной части диссертации	декабрь-февраль 2014 год	-
10	Статистическая обработка материалов исследований	март 2014 год	-
11	Представление работы на кафедре	май 2014 год	-
12	Защита магистерской диссертации	июнь 2014 год	-

Научный руководитель

Ибраев И.К

Заведующий кафедрой

Жакупова А.Н