

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**УДК 621.783/235.001.57**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА  
ПЕЧИ КАЛЬЦИНАЦИИ

Магистерская диссертация на соискание  
академической степени магистра теплоэнергетики  
по специальности 6N0717 – ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

ПАВЛОДАР 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Допущен к защите:

зав. кафедрой теплоэнергетики и металлургии,

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ А.С.Никифоров

(подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Магистерская диссертация  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА  
ПЕЧИ КАЛЬЦИНАЦИИ  
специальность 6N0717 – ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Магистрант \_\_\_\_\_ К.М. Каптур

(подпись)

Научный руководитель,

доктор технических наук \_\_\_\_\_ А.С.Никифоров

(подпись)

ПАВЛОДАР 2011

**ОТЗЫВ**  
Официального оппонента  
на магистерскую диссертацию  
«Математическое моделирование теплового режима печи кальцинации»  
Каптур Камиллы Муратовны

Магистерская диссертация Каптур К.М. выполнена по специальности 6N0717 – «Теплоэнергетика». Диссертация состоит из \_\_\_\_\_ страниц и включает 2 рисунка, 7 таблиц.

В диссертации производится расчет горения топлива и теплового баланса печи, а так же определены температуры газового потока и температуры материала по зонам печи.

Исследование высокотемпературных теплотехнологических процессов возможно методами математического моделирования, предусматривающими численное решение системы дифференциальных уравнений переноса вещества, количества движения и энергии. Математическая модель, как правило, не требует при решении инженерной задачи каких-либо эмпирических зависимостей, кроме уравнений, определяющих физические свойства веществ.

Тема данных научных исследований актуальна, так как построение математической модели позволяет определить эффективность тепловой работы вращающейся печи, которая зависит от того, насколько совершенно осуществляются в ней процессы выделения теплоты при сжигании топлива, движения газовой среды и материала, внешнего и внутреннего теплообмена.

Новизна диссертационной работы заключается в методике улучшения эффективности тепловой работы вращающейся печи за счет вариации длин участков печи кальцинации, что позволяет изменять температуру газового потока и температуру материала по зонам печи.

Научные результаты, полученные магистрантом достоверны, выводы в достаточной степени обоснованы. Достоверность научных положений подтверждена результатами вычислительных экспериментов.

Основные результаты, выводы и заключения диссертации опубликованы в достаточном объеме.

Магистерская диссертация Каптур К.М. является законченной квалификационной работой и отвечает требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям.

Магистерскую диссертацию «Математическое моделирование теплового режима печи кальцинации» рекомендую к защите.

Зав.каф. «Теплоэнергетика» ПГУ, к.т.н. \_\_\_\_\_ С.А. Глазырин

## РЕФЕРАТ

Диссертация магистра теплоэнергетики, 59 страниц, 3 рисунка, 7 таблиц, 17 источников.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЕЧИ КАЛЬЦИНАЦИИ

**Объектом исследования** являются вращающаяся печь кальцинации производительностью 44 т/ч. Эксплуатация данных печей кальцинации осуществляется на предприятии АО «Алюминий Казахстана» (г. Павлодар).

**Цель работы** – заключается в описание математической модели теплового режима печи кальцинации.

Исследование высокотемпературных теплотехнологических процессов возможно методами математического моделирования, предусматривающими численное решение системы дифференциальных уравнений переноса вещества, количества движения и энергии. Математическая модель, как правило, не требует при решении инженерной задачи каких-либо эмпирических зависимостей, кроме уравнений, определяющих физические свойства веществ.

В диссертации рассмотрена тепловая работа печи кальцинации; выполнен расчет горения топлива и теплового баланса печи, а так же определены температуры газового потока и температуры материала по зонам печи.

Тема данных научных исследований актуальна, так как построение математической модели позволяет определить эффективность тепловой работы вращающейся печи, которая зависит от того, насколько совершенно осуществляются в ней процессы выделения теплоты при сжигании топлива, движения газовой среды и материала, внешнего и внутреннего теплообмена.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Характеристика объекта исследования.....	7
1.1 Общая схема процесса получения глинозема по способу Байер спекание.....	9
1.2 Назначение устройство и принцип работы трубчатой вращающейся печи кальцинации 4,5x110.....	12
1.3 Конструктивная схема печи.....	14
1.4 Тепловая работа вращающихся печей.....	15
1.5 Математическое моделирование объекта.....	17
2 Тепловой расчет печи.....	21
2.1 Расчет горения топлива.....	21
2.2 Расчет печи кальцинации.....	22
2.2.1 Тепловой баланс печи.....	22
2.2.2 Определение температуры горения топлива.....	29
2.2.3 Определение основных параметров печи.....	31
2.2.4 Температуры газового потока на границах зон.....	35
2.2.5 Определение длины зон.....	48
Заключение.....	57
Список использованной литературы.....	58

## ВВЕДЕНИЕ

Павлодарский алюминиевый завод, вступивший в строй в 1964 году - первенец алюминиевой промышленности и флагман цветной металлургии Казахстана. На АО «Алюминий Казахстана», впервые в отечественной и мировой практике была реализована последовательная комбинированная схема производства глинозема Байер - спекание из низкокачественных (низкосортных) бокситов, имеющих невысокое содержание основного вещества -  $Al_2O_3$ . Данный способ обусловлен химическим составом бокситов поступающих на переработку.

Участок кальцинации - это подразделение гидрометаллургического цеха, в котором происходит завершающая стадия производства основного вида продукции завода – металлургического глинозема. Основным технологическим оборудованием участка кальцинации являются трубчатые вращающиеся печи, именно в них происходит высокотемпературный процесс кальцинации и прокалки гидрата алюминия.

Для протекания процесса кальцинации (обезвоживание) необходимо затратить определенную, достаточно большую энергию. Фактически это выражается в нагреве гидрата до высокой температуры и выдержке его при этой температуре определенное время во вращающейся печи. Сжигание топлива происходит в одном пространстве с материалом, при этом материал движется на встречу дымовым газом. Кроме непосредственного воздействия с факелом материал контактирует с раскаленными газами и поверхностями печи, нагреваясь от них.

Процесс превращения гидрата в глинозем состоит из четырех основных этапов, которые характеризуются определенными изменениями химического состава и физического состояния материала. Печное пространство, в свою очередь, делится на четыре зоны, каждая из которых соответствует определенному этапу превращения материала. Четких границ между зонами по ряду причин (сложное движение материала, относительная нестабильность теплового режима, параметров и состава топлива и гидрата) не существует, но это деление позволяет легче понять процесс кальцинации. Как показал тепловой расчет печи при уменьшении расхода топлива на печь длина зоны кальцинации печи увеличится, что может свидетельствовать о том, что процесс образования, так называемой, высокотемпературной формы гамма-модификации глинозёма, более устойчивой и менее гигроскопичной начинается именно в конце этой зоны приближающейся к высокотемпературной зоне, которая начинается с некоторого участка излучающего поток энергии факела, а затем переходит на участок непосредственного горения факела.

Известно, что интенсивность теплообмена, а, следовательно, и производительность промышленной печи, расход и полнота сгорания топлива и во многих случаях качество продукции зависят от комплекса взаимосвязанных факторов, таких как длина, форма и температура факела, его положение относительно технологического материала, скорость подачи топлива и воздуха, наличие рециркуляционных или застойных зон. В местах повышенного тепловыделения может, вследствие резкого возрастания температуры, снижаться стойкость футеровки или происходить образование экологически вредных компонентов типа оксидов азота. Таким образом, совершенствование тепловой работы промышленных печей является одной из важнейших современных инженерных задач.

**Актуальность исследования.** Исследование высокотемпературных теплотехнологических процессов возможно методами математического моделирования, предусматривающими численное решение системы дифференциальных уравнений переноса вещества, количества движения и энергии. Математическая модель, как правило, не требует при решении инженерной задачи каких-либо эмпирических зависимостей, кроме уравнений, определяющих физические свойства веществ.

Тема данных научных исследований актуальна, так как построение математической модели позволяет определить эффективность тепловой работы вращающейся печи, которая зависит от того, насколько совершенно осуществляются в ней процессы выделения теплоты при сжигании топлива, движения газовой среды и материала, внешнего и внутреннего теплообмена.

**Цель работы** – заключается в описание математической модели теплового режима печи кальцинации.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

- расчет математической модели температурного поля вращающейся печи кальцинации 4,5x110 м;

**Новизна научных исследований** заключается в следующем:

- создана математическая модель температурного поля вращающейся печи кальцинации 4,5x110 м;

- предложен расчет теплового режима вращающейся печи кальцинации;

**Значение научных результатов для теории и практики.** Методика улучшения эффективности тепловой работы вращающейся печи кальцинации за счет вариации длин участков печи кальцинации, что позволяет экономить расход топлива примерно на 0,1 кг/ч.

**Научные публикации.** Каптур К.М., Никифоров А.С. Математическое моделирование теплового режима печи кальцинации // Вестник ИнеУ. 2011. №1. с.102 – 104.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

История предприятия начинается с 4 ноября 1964 года, когда Павлодарский алюминиевый завод выдал первую партию товарной продукции – глинозем, полученный по последовательной технологической схеме (Байер – спекание) в результате переработки Тургайских бокситов.

По проекту предполагалось перерабатывать только бокситы Тургайского месторождения, содержащие легко вскрываемые алюмосодержащие минералы и не имеющие в больших количествах вредных для технологии примесей: карбонатов, сульфатов, хлоридов, органики и соединений двухвалентного железа.

По мере выработки основные запасы тургайских бокситов истощались.

Подшихтовка бокситов, добываемых Краснооктябрьским рудоуправлением, в рабочую смесь с тургайским бокситом производится с 1971 года, но в очень малых объемах. Первоначально это были бокситы Аятского месторождения, а с 1979 года в процесс стал подаваться боксит и Белинского месторождения.

При подшихтовке в байеровскую ветвь Краснооктябрьских бокситов Белинского месторождения происходит накопление хлоридов, что требует изменения всех концентраций байеровских растворов. Поэтому в заводских условиях, не останавливая действующее производство, были разработаны и внедрены новые технологические схемы вывода хлоридов, но все же, в тот период, подшихтовку белинского боксита пришлось ограничить.

Бокситы Красногорского месторождения по существовавшей до 1994 года проектной технологической схеме из-за крайне неблагоприятного примесного состава в байеровском переделе перерабатывать было нельзя, и их подшихтовывали в небольшом количестве в шламовую шихту спекания, минуя основную технологию, для выдерживания щелочного баланса.

Таким образом, к моменту перехода завода в управление инвесторам ситуация складывалась крайне тяжелой, проблемы казались неразрешимыми. К началу 1995 года запасов бокситов, пригодных к переработке по проектной технологии оставалось максимум на шесть-восемь лет работы завода.

При анализе создавшегося положения руководством фирмы было рассмотрено три возможных варианта сохранения и оздоровления жизнедеятельности предприятия, которые обеспечили бы дальнейшее развитие производства основной продукции – глинозема из казахстанского рудного сырья.

Вариант, предлагаемый институтом ВАМИ, решал проблемы за счет постепенного освоения разрозненных и малотоннажных запасов бокситовых месторождений с глубокой реконструкцией действующих производственных

объектов и строительством новых. Вариант был дорогостоящим (оценивался в \$ 600-800 млн.) и длительным в осуществлении по времени, со снижением мощности предприятия в переходный период.

Второй вариант предусматривал перевод завода на переработку качественного импортного сырья – это удорожало выпускаемую продукцию почти в 2 раза, что в условиях развала Союза ставило под угрозу сохранение рынков товарной продукции.

В сложившейся ситуации руководство завода предложило третий вариант – разработать технологию переработки некондиционного боксита Красногорского месторождения, запасы которого в недрах Казахстана – сотни миллионов тонн, достаточные для работы предприятия на долгие годы.

В результате анализа был выбран третий вариант как наиболее приемлемый с технической и экономической точек зрения, т.е. усовершенствовать действующую на заводе технологическую схему Байер-спекание. При этом необходимо было разработать, испытать и внедрить принципиально новую технологию без снижения объема выпуска и качества продукции и в сжатые сроки.

#### **Инженерно – техническая характеристика объекта**

Производство алюминия развивается исключительно быстрыми темпами. Быстрый рост производства объясняется, прежде всего, ценными его свойствами, разнообразием областей применения и большой распространенностью руд в природе. Малая плотность алюминия, высокая электропроводность, пластичность, устойчивость к коррозии, позволяет и использовать его в чистом виде и сплавах с другими металлами в самых различных отраслях промышленности. Важные области применения сплавов: машиностроение, автомобильная, химическая и металлургическая промышленности; водный и железнодорожный транспорт; жилищное строительство; товары народного потребления. Алюминий один из важнейших стратегических металлов, используется в авиации, судостроении, артиллерии, танкостроении, космической технике.

Павлодарский алюминиевый завод, вступивший в строй в 1964 году - первенец алюминиевой промышленности и флагман цветной металлургии Казахстана. На АО «АК», впервые в отечественной и мировой практике была реализована последовательная комбинированная схема производства глинозема Байер - спекание из низкокачественных (низкосортных) бокситов, имеющих невысокое содержание основного вещества -  $Al_2O_3$ . Данный способ обусловлен химическим составом бокситов, поступаемые на переработку. Все глиноземное производство разбито на три основных цеха.

Цех подготовки сырья. ЦПС осуществляет прием, дробление и усреднение боксита, известняка и угля, а также прием кальцинированной соды и выдачу перечисленных материалов в процесс.

Гидрометаллургический цех. ГМЦ представляет собой Байеровскую ветвь последовательной схемы получения глинозема, состоящей из следующих операций: размол боксита, выщелачивание бокситовой пульпы, сгущение и промывка красного шлама, контрольная фильтрация алюминатного раствора, фильтрация красного шлама, декомпозиция, обработка гидрата, выпарка, кальцинация товарного глинозема.

Цех спекания. ЦС перерабатывает красный шлам ветви Байера и включает в себя переделы подготовки шихты, спекание, дробление спека и гидрохимической переработки спека. Разложение и последующая обработка растворов цеха спекания производится в гидрометаллургическом цехе.

### **1.1 Общая схема процесса получения глинозема по способу Байер спекание**

Способ Байера наиболее распространен в мировой алюминиевой промышленности. Этим способом перерабатывают высококачественные бокситы с относительно невысоким содержанием растворимого в щелочном растворе кремнезема. Байеровский боксит должен иметь высокий кремневый модуль (не менее 6-7) и не содержать больших количеств серы и двуокиси углерода, которые осложняют переработку боксита по этому способу.

Примерная технологическая схема производства глинозема по способу Байера показана на рисунке 1.1.

Боксит, поступающий со склада, дробят, после чего размалывают в среде концентрированного щелочного раствора. Этим раствором боксит затем выщелачивают, чтобы перевести оксид алюминия в раствор. Для более полного перевода оксида алюминия в раствор выщелачивание часто ведут в присутствии небольших количеств извести. Полученная в результате выщелачивания пульпа состоит из раствора алюмината натрия и нерастворимого остатка боксита - красного шлама. Шлам отделяют от алюминатного раствора отстаиванием (сгущением), после чего промывают водой и направляют в отвал, а промывные воды используют для разбавления пульпы.

### Рисунок 1.1 – Схема производства глинозема по способу Байер-спекания

Алюминатный раствор для более полного отделения от него частиц шлама фильтруют. Чистый алюминатный раствор поступает на разложение (декомпозицию), которое достигается длительным перемешиванием алюминатного раствора со значительным количеством затравочного гидроксида алюминия. Полученная в результате декомпозиции пульпа состоит из выпавшего в осадок гидроксида алюминия и маточного щелочного раствора.

Гидроксид алюминия отделяют от маточного раствора сгущением. Часть полученного гидроксида алюминия возвращают в виде затравки в следующие порции раствора, идущего на декомпозицию, остальной гидроксид после фильтрации и промывки прокаливают (кальцинируют) при высокой температуре. При прокаливании гидроксид алюминия обезвоживается и превращается в глинозем.

Маточный щелочной раствор упаривают, чтобы повысить его концентрацию, и используют для выщелачивания новых порций боксита.

Выпаривание маточного раствора может сопровождаться выделением в осадок некоторого количества соды. Выкристаллизовавшуюся соду отделяют от раствора, а чтобы снова перевести в каустическую щелочь, обрабатывают известью (каустифицируют).

Для наилучшего извлечения и до извлечения гидроксида алюминия применяют способ спекания.

Боксит, сода, известняк, конденсат с участка выпарки поступают на усреднение. Боксит и сода (возможно добавление угля) предварительно прошедшие узел размола отправляются на узел корректировки шихты, туда же направляются красный шлам, обратная сода, белый шлам. После корректировки шихты она направляется на спекание, где спекается при высоких температурах. После спек дробится, смешивается с грязным конденсатом и промышленной водой тем самым, проходя выщелачивание. Полученный в процессе выщелачивания шлам сгущается и промывается пром.водой отправляется на выщелачивание, а шлам в отвал. Алюминатный раствор после выщелачивания и сгущения и промывки шлама направляется на обескремнивание. После обескремнивания алюминатный раствор сгущается и фильтруется. Полученный в процессе белый шлам направляется на корректировку шихты, а алюминатный раствор на узлы вакуумного охлаждения и затравочной фильтрации.

## 1.2 Назначение устройство и принцип работы трубчатой вращающейся печи кальцинации 4.5x110

Вращающаяся печь 4.5x110 предназначена для прокалки гидрата окиси алюминия.

Печь устанавливается на пять опор с уклоном к горизонту 2°. Для фиксации наклонного положения в осевом направлении на одной из ее опор установлены контрольные ролики. Вращение печи осуществляется от привода расположенного у четвертой опоры, считая с горячего конца. Отходящие газы из холодного конца печи при  $t = 250^{\circ}\text{C}$  проходят три стадии очистки (пылевая камера, батарейные циклоны, электрофилтры) и выбрасываются в дымовую трубу. Глинозем после печи поступает в холодильник кипящего слоя, где охлаждается до  $t = 80-100^{\circ}\text{C}$ .

Вращающаяся печь 4.5x110 состоит из следующих основных узлов: вращающегося барабана, загрузочной головки, разгрузочной головки, опорных станций, привода.

Вращающийся барабан представляет собой сварную конструкцию. Барабан печи изготавливают из углеродистой стали марки Ст3 или М16С. Барабан сваривают из отдельных обечаек. Торцы их тщательно разделяют – обрабатывают на станке, так как от качества разделки зависит трудоемкость и точность сборки барабана. Для усиления жесткости и прочности барабана в местах посадки бандажей и зубчатого венца устанавливают дополнительные обечайки жесткости. Барабан должен быть достаточно жестким, чтобы сохранить в процессе работы форму правильного цилиндра. При малейшем искривлении оси цилиндра резко возрастает напряжение в сечении барабана и потребляемая мощность. Деформация барабана приводит к преждевременному разрушению футеровки. В горячей зоне барабан футеруется высокоглиноземистым кирпичом, а в холодной шамотным кирпичом.

На расстоянии шестнадцати метров от холодного конца печи в барабане установлены теплообменные устройства (пакеты, цепные завесы). Загрузочная головка сваривается из трех частей: нижней, средней и верхней. Сегменты уплотнения монтируются вокруг печи и прикрепляются к загрузочной головки чугунными полукольцами.

Разгрузочная головка состоит из двух частей: нижней и верхней. В остальном конструкция уплотнения аналогична конструкции загрузочной головки. При помощи бандажей барабан опирается на опорные ролики. Бандажи свободно "плавают" на бандажных пластинах, приваренных к

барабану печи. От осевого смещения бандажи предохраняют сектора, которые приваривают вплотную к бандажу по корпусу барабана. Печь имеет четыре опорных и одну опорно-упорную станции. Опорная станция состоит из двух роликов, которые насаживаются на оси, вращающиеся в подшипниках скольжения.

Корпус подшипника опорного ролика чугунный, литой, с отверстиями в нижней части, для спуска масла, и уровнемера для контроля уровня смазки в подшипниках. К корпусу подшипника крепится крышка, которая в верхней части имеет люк для осмотра цапфы и заливки масла. Корпус подшипника крепится на сварной раме.

Выверяется корпус с помощью регулировочных винтов и гаек. Внутри корпуса находится сферический, пустотелый, стальной вкладыш с водяной рубашкой для охлаждения масла на ней устанавливается бронзовый вкладыш, который при помощи двух пластин и болтов крепится к нему.

На торцах оси опорного ролика расположено смазочное устройство в виде ковшей, которые черпают масло из масляной ванны при вращении и выливают его в желобок с отверстиями, откуда масло равномерно стекает на ось ролика.

Упорные ролики расположены по обе стороны опорно-упорного бандажа. Крепятся ролики на вертикальных осях, вращение происходит в радиально-упорном и упорном подшипниках. Смазываются упорные ролики от принудительной смазочной станции. Назначение упорных роликов - контролировать положение печи.

Вращающиеся печь имеет два привода: главный и вспомогательный. Каждый, из которых состоит из электродвигателя, тормозной муфты, редуктора и соединительной муфты. Главный редуктор трехступенчатый, вспомогательный двухступенчатый.

Цилиндрические колеса главного редуктора имеют шевронное зацепление. Валы вращаются в подшипниках качения.

Вспомогательный редуктор служит для прокрутки печи при ремонтах. На выходном валу главного редуктора находится соединительная втулочно-пальцевая муфта, которая соединяет с главным редуктором вал-шестерню. Вал-шестерня входит в зацепление с зубчатым венцом. Зубчатый венец присоединяется к барабану печи при помощи тангенциальных пластин. Смазка венцовой и вала-шестерни происходит методом погружения в масляную ванну.

Гидроокись алюминия с влажностью 12-14 % поступает из цеха гидрохимии в бункер над печью, из бункера пластинчатые питатели подают ее на шнековые смесители, а затем по течке самотеком гидроокись поступает в загрузочную головку печи. Из загрузочной головки материал поступает в зону сушки, где расположена насадка, для более полного теплообмена. После зоны сушки

гидроокись проходит еще три технологические зоны: зона обезвоживания, зона прокалки и зона охлаждения. После чего она поступает в разгрузочную головку, а оттуда в холодильник кипящего слоя. Обработка материала происходит топочными газами по принципу противотока, что обеспечивает наиболее полную отдачу тепла.

### 1.3 Конструктивная схема печи

Вращающаяся печь располагается с наклоном  $2^\circ$  к горизонту и вращается со скоростью 1–2 об/мин. На рисунке 1.1 показана вращающаяся печь, которая состоит из корпуса с футеровкой, опоры с приводом, головки с уплотнительными устройствами, теплообменных устройств и питателей.

Корпус печи состоит из стальных сваренных между собой листов, изнутри футерован огнеупорным кирпичом. Футеровка предназначена для сокращения потерь тепла в окружающую среду и для защиты стального кожуха от воздействия высоких температур. Для лучшей теплоизоляции между кожухом и огнеупорной футеровкой применяют слой теплоизоляционного материала. Корпус печи в нескольких местах охвачен бандажами, которые опираются на опорные ролики.

Вращающаяся печь приспособлена для обжига сухого и влажного материала (шлама), который загружается в торец печи и при ее вращении перемещается вдоль нее к противоположному торцу.

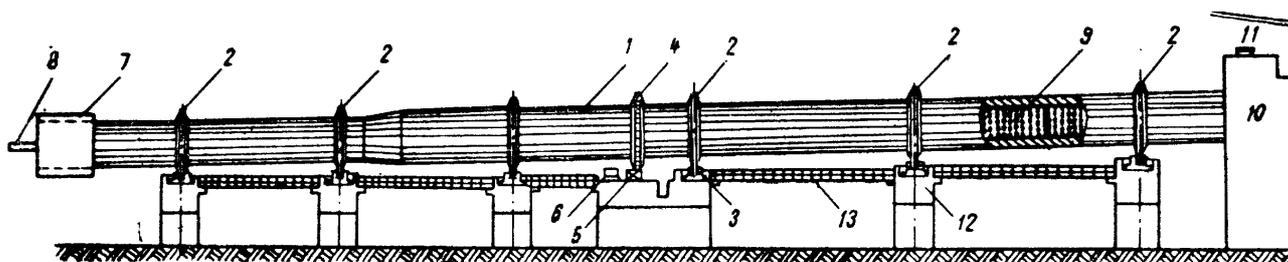


Рисунок 1.2 – Конструкция вращающейся печи

- 1 – барабан; 2 – бандажи; 3 – опорные ролики; 4 – зубчатый венец; 5 – редуктор;  
6 – электродвигатель; 7 – головка печи с холодильниками; 8 – подача топлива; 9 – цепная зона; 10 – пылесадительная камера; 11 – загрузочная воронка; 12 – фундаменты;  
13 – переходные площадки.

Топливо подается в головку, которая расположена в печи с противоположной загрузке стороны. Топливом может является мазут, горючий газ и угольная

пыль. Продукты сгорания перемещаются навстречу материалу, т.е. печь является противоточной.

Печь приводится во вращение при помощи венцовой шестерни, соединенной с редуктором и электромотором.

В зоне подогрева материалов (низкотемпературной части печи) устанавливают теплообменные устройства.

#### **1.4 Тепловая работа вращающихся печей**

Тепловая работа любой печи характеризуется рядом показателей, важнейшими из которых являются тепловой и температурный режимы, производительность печи, удельный расход топлива и коэффициент полезного действия. Тепловой режим характеризует изменение во времени тепловой нагрузки, т.е. количества теплоты, подаваемой в печь в каждый момент времени, а температурный режим представляет собой изменение температуры печи во времени или по длине печи.

В рабочем пространстве вращающейся печи протекают процессы выделения теплоты при сжигании топлива, движения газовой среды и материала, внешнего и внутреннего теплообмена. Эффективность тепловой работы печи зависит от того, насколько совершенно осуществляются в ней эти процессы. От организации тепловой работы вращающихся печей зависят не только производительность и экономичность процесса производства глинозема, но и срок службы печи и качество конечного продукта. Процесс спекания осуществляют при достаточно высоких температурах. По мере изменения температуры по длине рабочего пространства вращающихся печей происходят процессы с образованием различных неустойчивых соединений.

В пламенных печах одним из основных и наиболее эффективных способов улучшения их тепловой работы является интенсификация теплообменных процессов за счет совершенствования процессов горения. Рациональное сжигание топлива позволяет создать в рабочем пространстве вращающихся печей необходимые температурный и газовый режимы, предусмотренные технологией глиноземного производства.

При нагреве сыпучих материалов во вращающихся печах теплота поступает в зону технологического процесса за счет одновременного протекания всех трех видов теплообмена. На участках, где температура продуктов сгорания достигает 1200...1600°C, осуществляется радиационный режим работы печи. По мере продвижения продуктов сгорания топлива по длине печи они охлаждаются до нескольких сот градусов и режим тепловой работы печи постепенно становится конвективным. Конкретное распределение в печи зон с конвективным и

радиационным режимами работы зависит от вида и параметров технологического процессов. С точки зрения внешнего (по отношению к нагреваемому материалу) теплообмена вращающаяся печи может быть условно разделена на энергетически однородные участки - тепловые зоны, в пределах которых температуру, радиационные характеристики и коэффициент теплоотдачи от газов к материалу можно считать постоянными величинами. Кроме того, в рабочем пространстве происходит и так называемый внутренний теплообмен: поступившая в слой материала теплота распределяется в нем путем теплопроводности. При вращении барабана печи происходит энергичное перемешивание сыпучего материала, температура по высоте слоя практически выравнивается и его можно считать тонким в тепловом отношении телом, нагрев которого может сопровождаться эндо- и экзотермическими реакциями. Перенос теплоты в кладке печи происходит также вследствие теплопроводности. Изменение температуры внутренней поверхности футеровки во времени носит циклический характер. Время цикла равно времени полного оборота печи. Условно его делят на два периода. В первом периоде поверхность кладки находится в контакте с греющими газами и постепенно нагревается, получая от нее теплоту излучением и конвекцией. Ко второму периоду относят время ее контакта с нагреваемым материалом, в течение которого температура поверхности кладки снижается. Анализ данных расчета поля температур кладки, полученных при решении уравнения теплопроводности с использованием численных методов, показал, что колебания температуры во времени происходят на определенном расстоянии от поверхности футеровки, получившим название глубины проникновения тепловой волны. Колебания температуры, достигающие на внутренней поверхности барабана при входе и выходе ее из-под слоя шихты нескольких сотен градусов, распространяются на глубину 1...5 см., чем ближе к поверхности, тем выше термические напряжения, возникающие в кладке, и тем больше вероятность ее разрушения (трещины, сколы и т.д.).

Вращающиеся печи глиноземного производства работают в режиме противотока. Максимальную температуру и газы, и материал имеют со стороны топливной камеры, а минимальную - со стороны загрузочной камеры.

Температурный режим работы вращающихся печей не изменяется во времени, индивидуален для каждого вида технологического процесса и в значительной мере определяется химическим и фракционным составом перерабатываемых материалов. Обычно его устанавливают опытным путем и организуют таким образом, чтобы в печи строго соблюдался график нагрева шихты, соответствующий технологии данного процесса.

Рассмотрим температурный режим процесса спекания бокситов. Все рабочее пространство вращающейся печи можно условно разделить на четыре зоны, в которых происходят определенные изменения обрабатываемой шихты.

Первая зона, которую называют зоной сушки и обезвоживания, находится в верхней части печи со стороны загрузки шихты. Вначале из шихты испаряется внешняя влага, и температура материала при этом остается практически неизменной близкой к 100 °С. Затем температура высушенной шихты возрастает до 600 °С. Движущиеся навстречу ей газы охлаждаются от 1100 до 240 °С.

Во второй зоне, называемой зоной кальцинации, температура шихты продолжает расти и достигает 1000 °С. В этой зоне происходит полное разложение карбоната кальция, требующее затрат теплоты, поэтому температура газов снижается с 1300 до 1100 °С.

Третья зона - зона спекания - характеризуется максимальными значениями температур как шихты (1000...1200 °С), так и газов (1350...1450 °С), так как именно здесь происходит горение факела. В третьей зоне полностью разлагается  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и завершается процесс спекания.

Четвертая зона - зона охлаждения - располагается за срезом заглубленного в печь топливосжигающего устройства, т.е. за горящим факелом. Благодаря потоку идущего из холодильника воздуха, имеющего температуру 150...300°С, обеспечивается охлаждение спека до температуры 1000°С, что резко увеличивает его механическую прочность (по сравнению с размягченным состоянием), необходимую для перегрузки в расположенный в низу холодильник.

Нужно учитывать, что качество готового продукта, получаемого во вращающихся печах, определяется не только кинетикой, но и движением материала, т.е. временем его пребывания в печи. В зависимости от того, насколько мгновенные скорости отдельных частиц отличаются от средней скорости движения материала (при постоянном распределении температуры по длине печи), изменяется степень превращения каждой частицы и, следовательно, фазовый состав глинозема. Наличие в печи частиц с различными скоростями движения и неопределенность соотношения таких частиц из-за технологических возмущений, нарушающий установившийся режим, затрудняют надежный контроль и регулирование тепловой работы печей. В то же время одной из главных задач оперативного управления является поддержание всех параметров на заданном уровне, что возможно только при своевременной и непрерывной информации о качестве целевого продукта.

## 1.5 Математическое моделирование объекта

Алюминиевая промышленность - одна из наиболее развитых отраслей цветной металлургии, и на сегодняшний день производство алюминия наращивается довольно быстрыми темпами (внедряются новые технологические схемы производства, увеличиваются объемы выработки, строятся цеха и т.п.). Этот рост вызван тем, что алюминий является стратегическим металлом и применяется во многих отраслях машиностроения, энергетики, строительства и т.д.

Сырьем для производства алюминия является глинозем. Производство глинозема во всем мире основано на использовании бокситовых руд. В настоящее время в нашей стране в качестве алюминиевых руд используют бокситы и нефелиновые породы. В бывшем СССР впервые в мировой практике освоено производство глинозема из нефелиновых и алунитовых пород. Это вызвано тем, что на территории нашей страны находятся крупнейшие месторождения нефелина: Хибинский щелочной массив (Кольский полуостров), Кия-Шалтырское (Кемеровская область), Ужурское (Красноярский край), а запасы бокситов ограничены.

Спекание шихты осуществляется в переделе спекания во вращающихся печах 4,5x110 м. Передел спекания является составной частью всех промышленных аппаратурно-технологических схем переработки на глинозем высококремнистого сырья.

Технологическое оборудование передела спекания относится к агрегатам с большой материало- и энергоемкостью, что вызывает значительную инерционность по основным контурам управления, низкий уровень систем контроля температурного режима вращающейся печи и дискретный контроль основных показателей качества не позволяют создать современную систему управления вращающейся печью. По этим причинам автоматизация вращающейся печи сводится к стабилизации входных материальных потоков.

В таких условиях качество введения технологического процесса спекания шихты зависит не только от используемых систем управления, но и во многом от квалификации и профессионального опыта оператора-технолога (агломератчика печи), неправильные действия которого могут привести к нарушению технологического режима или к аварийному останову оборудования.

Методика проектирования систем автоматизации технологических процессов на глиноземных заводах в своем развитии прошла несколько этапов.

Положительным итогом первого этапа (60-е годы 20 века) явилось осознание того, что в условиях затрудненного технологического контроля перспективным является управление производственными процессами по

прогнозируемым с помощью математических моделей оценкам основных технологических параметров с применением управляющих ЭВМ.

Таким образом, существует научная проблема создания математических моделей процесса спекания глинозема, которые позволят проанализировать развитие технологического процесса и снизить количество нарушений режима работы оборудования.

Основным параметром, отражающим качество управления в пирометаллургических агрегатах, является температура, поэтому в данной работе просчитаны температурные характеристики вращающейся печи 4,5x110 м.

Огромный вклад в разработку математического описания температурного режима вращающихся печей внесли такие ученые как Б.И. Арлюк, В.А. Арутюнов, Е.И. Ходоров и др.

Модели, построенные зональным методом на базе классических уравнений лучистого теплообмена и предназначенные для оптимизации технологического режима работы печей глиноземной промышленности, использовал в своих работах Арлюк Б.И [4].

Арутюнов В.А. использует зональный резольвентный метод расчета теплообмена для исследования режимов обжига во вращающихся печах огнеупорной и металлургической промышленности [9].

Ходоров Е.И. использовал зональный тепловой расчет для проектирования и анализа основных связей между конструктивными и режимными факторами вращающихся печей цементной и глиноземной промышленности, в том числе и для печей 4,5x110 м [15].

В области моделирования и управления системами с распределенными параметрами перед исследователями стоит целый ряд задач, решение которых имеет важное теоретическое и прикладное значение и требует глубокой научной проработки. Одной из таких задач является проблема проектирования оптимальных режимов работы оборудования и систем управления.

Объектом исследования является вращающаяся печь кальцинации глинозема 4,5x110 м, а предметом исследования – тепловые процессы, происходящие в печи.

Целью исследования диссертационной работы является расчет математической модели теплового режима печи кальцинации.

Для того чтобы достичь поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- создана математическая модель температурного поля вращающейся печи спекания 4,5x110 м;
- предложен расчет теплового режима вращающейся печи кальцинации.

Математическая модель представляет собой последовательность алгебраических вычислений основанных на тепловом расчете вращающейся печи кальцинации с учетом условий теплообмена.

Графически алгоритм математического моделирования представлен в виде блок-схемы на рисунке 1.3.

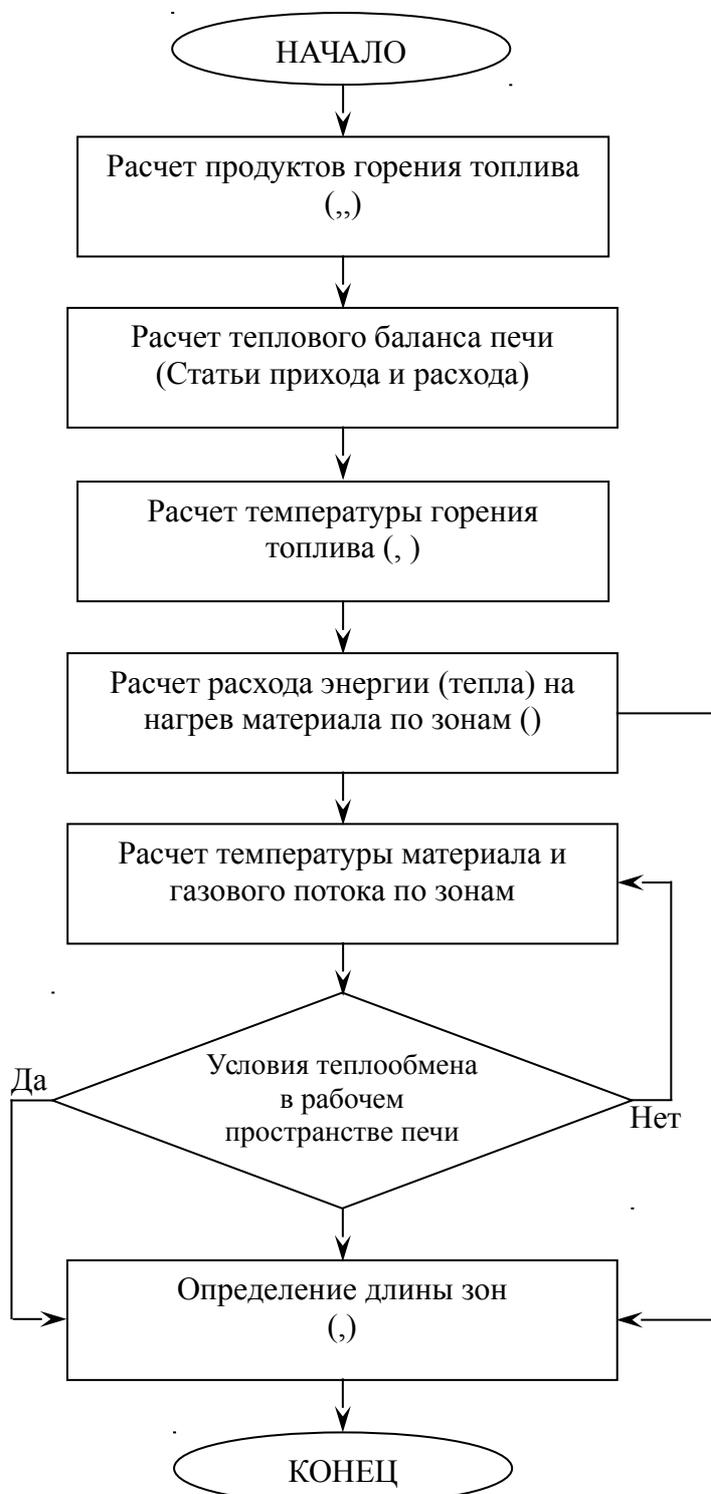


Рисунок 1.3 – Блок-схема алгоритма математического моделирования тепловой работы печи кальцинации.

## 2 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ПЕЧИ

### 2.1 Расчет горения топлива

Исходными данными для расчета горения топлива является малосернистый мазут М 40. Характеристика мазута приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристика мазута

Составляющие мазута	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Углерод	$C^p$	%	87,33
Водород	$H^p$	%	11,9
Кислород	$O^p$	%	0,2
Азот	$N^p$	%	0
Сера	$S^p$	%	0,39
Влажность	$W^p$	%	0,15
Зола	$A^p$	%	0,03

Определение теплотворной способности топлива  $Q_n^p$ , кДж/кг,

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p + 108,5(S^p - O^p) - 25W^p,$$

где  $C^p$  - содержание углерода в рабочей массе топлива, %;  
 $H^p$  - содержание водорода в рабочей массе топлива, %;  
 $S^p$  - содержание серы в рабочей массе топлива, %;  
 $O^p$  - содержание кислорода в рабочей массе топлива, %;  
 $W^p$  - содержание влаги в рабочей массе топлива, %.

$$Q_n^p = 338 \cdot 87,33 + 1025 \cdot 11,9 + 108,5(0,39 - 0,2) - 25 \cdot 0,15 = 41731,9 \text{ кДж / кг}.$$

Теоретически необходимый объем воздуха  $V_B^o$ , м<sup>3</sup>/кг, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, определяется по формуле

$$V_B^o = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p,$$

$$V_B^o = 0,0889(87,33 + 0,375 \cdot 0,39) + 0,265 \cdot 11,9 - 0,0333 \cdot 0,2 = 10,9235 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретический объем трехатомных газов  $V_{KO_2}$ , м<sup>3</sup>/кг,

$$V_{RO_2} = 0,0187(C^P + 0,375S^P),$$

$$V_{RO_2} = 0,0187(87,33 + 0,375 \cdot 0,39) = 1,6359 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретический объем азота  $V_{N_2}^o$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,

$$V_{N_2}^o = 0,79V_B^o + 0,008N^P,$$

где  $N^P$  - содержание азота в рабочей массе топлива, %.

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot 10,9235 + 0,008 \cdot 0 = 8,6296 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Необходимый теоретический объем водяных паров  $V_{H_2O}^o$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V_B^o,$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 \cdot 11,9 + 0,0124 \cdot 0,15 + 0,0161 \cdot 10,9235 = 1,4986 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объем продуктов сгорания  $V_{\Gamma}^o$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,

$$V_{\Gamma}^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o,$$

$$V_{\Gamma}^o = 1,6359 + 8,6296 + 1,4986 = 11,7641 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объем избыточного кислорода,  $V_{O_2}^{изб}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , поступающего с воздухом на сжигание топлива

$$V_{O_2}^{изб} = 0,21(\alpha - 1)V_B^o,$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

$$V_{O_2}^{изб} = 0,21(1,15 - 1) \cdot 10,9235 = 0,3441 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

## 2.2 Расчет печи кальцинации

### 2.2.1 Тепловой баланс печи

Приход тепла:

1 Теплота сгорания топлива  $Q_m$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ ,

$$Q_m = g_m \cdot Q_u^p,$$

где  $g_m$  - удельный расход топлива, кг/кг глинозема;

$Q_u^p$  - низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг топлива.

$$Q_m = 0,0955 \cdot 41731,9 = 3985,396 \text{ кДж/кг}.$$

2 Физическое тепло топлива  $Q_m^\phi$ , кДж/кг,

$$Q_m^\phi = g_m \cdot C_m \cdot t_m,$$

где  $t_m$  - температура топлива, °С;

$C_m$  - средняя теплоемкость топлива, кДж/кг°С.

Определяем среднюю теплоемкость топлива:

$$C_m = 1,74 + 0,0025t_m,$$

$$C_m = 1,74 + 0,0025 \cdot 100 = 1,99 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С},$$

$$Q_m^\phi = 0,0955 \cdot 1,99 \cdot 100 = 19,0045 \text{ кДж/кг}.$$

3 Теплосодержание сухого гидрата  $Q_{с.а.}$ , кДж/кг,

$$Q_{с.а.} = 1,53 \cdot C_{с.а.} \cdot t_{с.а.},$$

где 1,53 - расход сухой гидроокиси алюминия для получения 1 кг  $\gamma$  или  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кг/кг глинозема;

$C_{с.а.}$  - средняя теплоемкость гидраргиллита, кДж/кг°С;

$t_{с.а.}$  - температура сухой гидроокиси алюминия, °С.

$$Q_{с.а.} = 1,53 \cdot 1,23605 \cdot 40 = 75,6463 \text{ кДж/кг}.$$

4 Теплосодержание внешней влаги в гидроокиси алюминия  $Q_{вл.}$ , кДж/кг,

$$Q_{вл.} = \frac{1,53 \cdot \%H_2O}{100 - \%H_2O} \cdot C_{вл.} \cdot t_{вл.},$$

где 1,53 - расход сухой гидроокиси алюминия на 1 кг глинозема, кг/кг;

$\%H_2O$  - содержание внешней влаги в гидроокиси алюминия, %;

$C_{вл.}$  - теплоемкость воды, кДж/кг°С;

$t_{вл}$  - температура внешней влаги, °С. Принимается равной температуре гидроокиси алюминия.

$$Q_{вл} = \frac{1,53 \cdot 10}{100 - 10} \cdot 4,19 \cdot 40 = 28,492 \text{ кДж / кг} .$$

5 Теплосодержание воздуха, поступающего в печь на сжигание топлива  $Q_6^\phi$ , кДж / кг ,

$$Q_6^\phi = \frac{\alpha \cdot V_B^o \cdot g_m}{100} (C_{возд.п.} \cdot t_{возд.п.} \cdot \%V_1 + C_{возд.в.} \cdot t_{возд.в.} \cdot \%V_2) ,$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;

$V_B^o$  - количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания топлива, м<sup>3</sup>/кг;

$g_m$  - удельный расход топлива, кг/кг глинозема;

$\%V_1, \%V_2$  - содержание в общем объеме первичного и вторичного поступающего в печь воздуха, %;

$C_{возд.п.}$  - средняя теплоемкость первичного воздуха, кДж / м<sup>3</sup>°С;

$C_{возд.в.}$  - средняя теплоемкость вторичного воздуха, кДж / м<sup>3</sup>°С;

$t_{возд.п.}$  - температура первичного воздуха, °С;

$t_{возд.в.}$  - температура вторичного воздуха, °С.

$$Q_6^\phi = \frac{1,15 \cdot 10,9235 \cdot 0,0955}{100} (0 + 1,3362 \cdot 430 \cdot 100) = 689,2915 \text{ кДж / кг} .$$

6 Теплосодержание пыли из системы пылеулавливания  $Q_n$ , кДж / кг ,

$$Q_n = g_n \cdot C_n \cdot t_n ,$$

где  $g_n$  - количество пыли, поступающей в аппарат из системы пылеулавливания, кг/кг глинозема;

$C_n$  - средняя теплоемкость пыли при данной температур в зависимости от фазового состава, кДж/кг°С;

$t_n$  температура пыли, °С.

$$Q_n = 1,35 \cdot 1,6634 \cdot 200 = 449,118 \text{ кДж / кг} .$$

Расход тепла:

1 Физическое тепло глинозема, выходящего из печи  $Q_{эл}$ , кДж / кг ,

$$Q_{zt} = 1,0 \cdot C_{zt} \cdot t_{zt},$$

где  $C_{zt}$  - средняя теплоемкость глинозема при данной температуре,  $\text{кДж/кг}^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{zt}$  - температура глинозема,  $^\circ\text{C}$ .

$$Q_{zt} = 1,0 \cdot 1,0891 \cdot 700 = 762,37 \text{ кДж/кг}.$$

2 Физическое тепло отходящих газов  $Q_2^\phi$ ,  $\text{кДж/кг}$ ,

$$Q_2^\phi = g_m \cdot t_2 \left( V_{RO_2} \cdot C_{RO_2} + V_{H_2O}^o \cdot C_{H_2O} + V_{N_2}^o \cdot C_{N_2} + V_{O_2}^{usb} \cdot C_{O_2} \right),$$

где  $t_2$  - температура дымовых газов,  $^\circ\text{C}$ ;

$C_{RO_2}$  - средняя теплоемкость трехатомных газов,  $\text{кДж/м}^3\text{C}$ ;

$C_{H_2O}$  - средняя теплоемкость водяных паров,  $\text{кДж/м}^3\text{C}$ ;

$C_{N_2}$  - средняя теплоемкость азота,  $\text{кДж/м}^3\text{C}$ ;

$C_{O_2}$  - средняя теплоемкость кислорода,  $\text{кДж/м}^3\text{C}$ .

$$Q_2^\phi = 0,0955 \cdot 250(1,6359 \cdot 1,8344 + 1,525 \cdot 1,5277 + 8,6296 \cdot 1,3055 + 0,3441 \cdot 1,3476) = \\ = 407,3144 \text{ кДж/кг}.$$

3 Тепло затраченное на реакцию дегидратации и перекристаллизации гидроокиси алюминия  $Q_{o.n.}$ ,  $\text{кДж/кг}$ ,

$$Q_{o.n.} = \sum \Delta H_{cm1}^o + \sum \Delta H_{cm2}^o + \sum \Delta H_{cm3}^o,$$

где  $\sum \Delta H_{cm1}^o$  - тепловой эффект реакции образования бемита из гидраргиллита,  $\text{кДж/кг}$  глинозема;

$\sum \Delta H_{cm2}^o$  - тепловой эффект реакции образования  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  из бемита,  $\text{кДж/кг}$  глинозема;

$\sum \Delta H_{cm3}^o$  - тепловой эффект реакции перекристаллизации при переходе из  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{кДж/кг}$  глинозема.

По закону Гесса тепловой эффект, реакций может быть вычислен как разность между суммой теплот образования продуктов реакций и суммой теплот образования исходных веществ.

Схематично процесс дегидратации и перекристаллизации гидроокиси алюминия может быть представлен следующим образом:

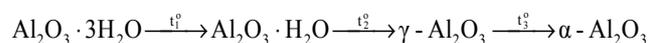
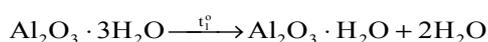


Таблица 2.2 – Стандартные теплоты образования

Формула соединения	Теплота образования из элементов, кДж/кг глинозема
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	25209,8333
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	19347,9412
$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$	16073,9902
$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	16394,402
$\text{H}_2\text{O}$	2806,4784

Тепловой эффект образования бемита из гидраргиллита



$$\sum \Delta H_{cm1}^\circ = \Delta H_z - (\Delta H_\delta + 2\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}),$$

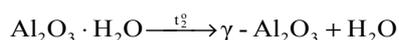
где  $\Delta H_z$  - стандартная теплота образования гидраргиллита, кДж/кг;

$\Delta H_\delta$  - стандартная теплота образования бемита, кДж/кг;

$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$  - стандартная теплота образования воды, кДж/кг.

$$\sum \Delta H_{cm1}^\circ = 25209,8333 - (19347,9412 + 2 \cdot 2806,4784) = 248,9353 \text{ кДж / кг} .$$

Тепловой эффект образования  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  из бемита

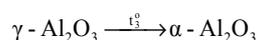


$$\sum \Delta H_{cm2}^\circ = \Delta H_\delta - (\Delta H_\gamma + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}),$$

где  $\Delta H_\gamma$  - стандартная теплота образования  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кДж/кг.

$$\sum \Delta H_{cm2}^\circ = 19347,9412 - (16073,9902 + 2806,4784) = 467,4726 \text{ кДж / кг} .$$

Тепловой эффект реакции перекристаллизации при переходе из  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$



$$\sum \Delta H_{cm3}^\circ = \Delta H_\gamma - \Delta H_\alpha,$$

где  $\Delta H_\alpha$  - стандартная теплота образования  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кДж/кг.

$$\sum \Delta H_{cm3}^{\circ} = 16073,9902 - 16394,402 = -320,4118 \text{ кДж/кг} .$$

При образовании 100 %  $\alpha$ - $Al_2O_3$  из  $\gamma$ - $Al_2O_3$  тепловой эффект реакции составляет  $-320,4118$  кДж/кг, тогда при образовании 10 %  $\alpha$ - $Al_2O_3$  тепловой эффект реакции равен  $-32,0412$  кДж/кг.

$$Q_{o.n.} = 248,9353 + 467,4726 - 32,0412 = 684,3667 \text{ кДж/кг} .$$

4 Затраты тепла на испарение влаги  $Q_{u.вл}$ , кДж/кг ,

$$Q_{u.вл} = \left( \frac{1,53 \cdot \%H_2O}{100 - \%H_2O} + 0,53 \right) \cdot 2258,41 ,$$

где 0,53 - содержание кристаллизованной влаги в гидроокиси алюминия, кг;  
2258,41 - скрытая теплота испарения воды, кДж/кг.

$$Q_{u.вл} = \left( \frac{1,53 \cdot 10}{100 - 10} + 0,53 \right) \cdot 2258,41 = 1580,887 \text{ кДж/кг} .$$

5 Затраты тепла на нагрев влаги до температуры отходящих газов  $Q_{в.пар}$ , кДж/кг ,

$$Q_{в.пар} = \left( \frac{1,53 \cdot \%H_2O}{100 - \%H_2O} + 0,53 \right) \cdot \frac{22,4}{18} \cdot C_{в.пар} \cdot t_{в.пар} ,$$

где 22,4 - объем занимаемый одной грамм-молекулой водяного пара;

18 - молекулярный вес воды;

$C_{в.пар}$  - средняя теплоемкость водяных паров при температуре отходящих газов, кДж/м<sup>3</sup>°С;

$t_{в.пар}$  - температура водяных паров, °С. Принимается равной температуре отходящих газов в холодном обресе печи.

$$Q_{в.пар} = \left( \frac{1,53 \cdot 10}{100 - 10} + 0,53 \right) \cdot \frac{22,4}{18} \cdot 1,5352 \cdot 250 = 334,3324 \text{ кДж/кг} .$$

6 Затраты тепла с воздухом подсоса со стороны холодной головки вращающейся печи  $Q_{в.н.}$ , кДж/кг ,

$$Q_{в.н.} = V_n (C_v \cdot t_v + C_{в.н} \cdot t_{в.н}) ,$$

где  $V_n$  - объем воздуха подсосываемого в печь,  $\text{м}^3/\text{кг}$ . Принимается равным 11,7 % от теоретически необходимый объем воздуха;

$C_v$  - средняя теплоемкость воздуха, при температуре дымовых газов,  $\text{кДж}/\text{м}^3\text{°C}$ ;

$C_{v,n}$  - средняя теплоемкость подсосываемого воздуха,  $\text{кДж}/\text{м}^3\text{°C}$ ;

$t_{v,n}$  - температура подсосываемого воздуха,  $\text{°C}$ .

$$Q_{v,n} = 1,278 \cdot (1,3139 \cdot 250 + 1,3017 \cdot 20) = 386,5196 \text{ кДж/кг} .$$

7 Затраты тепла с пылью в систему газоочистки  $Q_{n,uz}$ ,  $\text{кДж/кг}$ ,

$$Q_{n,uz} = g_{n,uz} \cdot C_{n,uz} \cdot t_{n,uz} ,$$

где  $g_{n,uz}$  - количество пыли в отходящих из печи газах,  $\text{кг}/\text{кг}$  глинозема;

$C_{n,uz}$  - средняя теплоемкость пыли при данной температуре в зависимости от фазового состава,  $\text{кДж}/\text{кг}\text{°C}$ ;

$t_{n,uz}$  - температура пыли,  $\text{°C}$ .

$$Q_{n,uz} = 1,3636 \cdot 1,7975 \cdot 250 = 612,7678 \text{ кДж/кг} .$$

8 Теплопотери в окружающую среду поверхностью оборудования  $Q_{o,c}$ ,  $\text{кДж/кг}$ ,

$$Q_{o,c} = 0,12 \cdot g_m \cdot Q_n^p ,$$

где 0,12 - потери в окружающую среду печью.

$$Q_{o,c} = 0,12 \cdot 0,0955 \cdot 41731,9 = 478,2476 \text{ кДж/кг} .$$

Таблица 2.3 – Тепловой баланс печи кальцинации

Приход тепла	кДж/кг	Расход тепла	кДж/кг
1 Теплота сгорания топлива	3985,396	1 Физическое тепло глинозема, выходящего из печи	762,37
2 Физическое тепло топлива	19,0045	2 Физическое тепло отходящих газов	407,3144
3 Теплосодержание сухого гидрата	75,6463	3 Тепло затраченное на реакцию дегидратации и перекристаллизации гидроокиси алюминия	684,3667
4 Теплосодержание внешней	28,492	4 Затраты тепла на испарение	1580,887

влаги в гидроокиси алюминия		влаги	
5 Теплосодержание воздуха, поступающего в печь на сжигание топлива	689,2915	5 Затраты тепла на нагрев влаги до температуры отходящих газов	334,3324
6 Теплосодержание пыли из системы пылеулавливания	449,118	6 Затраты тепла с воздухом подсоса со стороны холодной головки вращающейся печи	386,5196
		7 Затраты тепла с пылью в систему газоочистки	612,7678
		8 Теплопотери в окружающую среду поверхностью оборудования	478,2476
Итого	5246,9483	Итого	5246,8055

### 2.2.2 Определение температуры горения топлива

Теоретическую температуру горения  $t_{теор}$ , °C, рассчитывают по формуле:

$$t_{теор} = \frac{g_m Q_n^p + q_m^{\phi} + q_6 - q_{дисс} - (q_{x.n.} + q_{m.n.})}{V_2 \cdot C_2},$$

где  $q_6$  - физическое тепло нагретого воздуха, кДж/кг;

$q_m^{\phi}$  - физическое тепло топлива, кДж/кг;

$q_{дисс}$  - количество тепла, расходуемого на диссоциацию  $RO_2$  и  $H_2O$ , кДж/кг;

$q_{x.n.} + q_{m.n.}$  - потеря тепла от неполноты горения (в данном случае  $Q_{x.n.} + Q_{m.n.} = 0$ ), кДж/кг;

$V_2$  - объем продуктов сгорания,  $m^3/кг$ ;

$C_2$  - средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/ $m^3 \cdot ^\circ C$ .

Физическое тепло воздуха при получении 1 кг  $Al_2O_3$  определяется из формулы, кДж/кг,

$$q_6 = \alpha \cdot V_B^o \cdot g_m \cdot C_6 \cdot t_6,$$

$$q_6 = 1,15 \cdot 10,9235 \cdot 0,0955 \cdot 1,3017 \cdot 20 = 31,2323 \text{ кДж/кг}.$$

Объем газов от горения 0,0955 кг мазута,  $m^3$ :

$$V_{RO_2} = 0,0955 \cdot 1,6359 = 0,1562 \text{ м}^3$$

$$V_{H_2O} = 0,0955 \cdot 1,4986 = 0,1431 \text{ м}^3$$

$$V_{N_2} = 0,0955 \cdot 8,6296 = 0,8241 \text{ м}^3$$

$$V_{O_2} = 0,0955 \cdot 0,3441 = 0,0329 \text{ м}^3$$

$$\text{Итого} \quad 1,1563 \text{ м}^3$$

где 1,6359; 1,4986 и т. д. - количество продуктов сгорания, образующихся при горении 1 кг мазута.

Принимаем, что  $t_{теор}$  равно  $2200^\circ\text{C}$ .

Тогда количество тепла, расходуемого на диссоциацию  $\text{RO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$   $q_{дисс}$ ,  $\text{кДж/кг}$ , определяется по формуле:

$$q_{дисс} = 0,03 \cdot V_{\text{RO}_2} \cdot 12758,55 + 0,18 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 10810,2,$$

где 0,03 и 0,18 - степени диссоциации, определяющиеся по графику.

12758,55 и 10810,2 - теплоты диссоциации  $\text{RO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{кДж/м}^3$  (приведено к нормальным условиям);

$$q_{дисс} = 0,03 \cdot 0,1562 \cdot 12758,55 + 0,18 \cdot 0,1431 \cdot 10810,2 = 338,2357 \text{ кДж/кг}.$$

Тепло продуктов сгорания при  $2200^\circ\text{C}$

$$V_2 \cdot C_2 = 0,1562 \cdot 2,4837 + 0,1431 \cdot 1,9813 + 0,8241 \cdot 1,4981 + 0,0329 \cdot 1,5851 = 1,9582 \text{ кДж/кг}^\circ\text{C}$$

$$t_{теор} = \frac{3985,396 + 19,0045 + 689,2915 - 338,2357}{1,9582} = \frac{4355,4563}{1,9582} = 2224^\circ\text{C},$$

$$t_{теор}^{расч} = \frac{3985,396 + 19,0045 + 31,2323 - 338,2357}{1,9582} = 1888^\circ\text{C},$$

Принимаем  $t_{теор} = 2000^\circ\text{C}$ ; при этом  $t_{теор}^{расч} = 1910^\circ\text{C}$ .

Принимаем также  $t_{теор}^{расч} = (2000 + 1910)/2 = 1955^\circ\text{C}$ .

Действительная максимальная температура газов в печи несколько ниже  $t_{теор}$ ,  $^\circ\text{C}$ :

$$t_{max} = t_{теор} \cdot \eta,$$

где  $\eta$  - пирометрический коэффициент, учитывающий реальные условия горения.

Для вращающихся трубчатых печей  $\eta = 0,8 \div 0,9$ . Принимаем  $\eta = 0,9$ .

Тогда

$$t_{\max} = 1955 \cdot 0,9 = 1760 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

округленно принимаем 1800 °С.

### 2.2.3 Определение основных параметров печи

Внутренний диаметр барабанной печи  $D_{\text{вн}}$ , м, определяется из условия оптимальной скорости движения газового потока в печи по формуле:

$$D_{\text{вн}} = 1,13 \sqrt{\frac{V_m}{\omega_m}}.$$

Принимаем, по данным практики,  $\omega_m = 10 \text{ м/с}$ . Определяем действительное количество газов ( $V_m$ , м<sup>3</sup>/с) при производительности печи 44 т/ч и газовом потоке 2,0779 м<sup>3</sup>/кг.

Секундное количество отходящих газов, м<sup>3</sup>/с:

$$V_o = \frac{44000 \cdot (1,1563 + 0,9216)}{3600} = 25,4 \text{ м}^3/\text{с},$$

при средней температуре газов в печи  $t_{cp} = (250 + 1800) : 2 = 1025^{\circ}\text{C}$ ,

$$V_m = V_o (1 + \beta t_{cp}) = 25,4 \cdot 4,75 = 120,65 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$D_{\text{вн}} = 1,13 \sqrt{\frac{120,65}{10}} = 3,93 \text{ м}.$$

Округленно получаем  $D_{\text{вн}} = 4 \text{ м}$ , при этом наружный диаметр  $D_{\text{нар}} = 4,5 \text{ м}$ .

Длину печи определяют из условия теплообмена в основных зонах печи. Ниже приводится метод зонального теплового расчета печи кальцинации (таблицы 2.4 и 2.5).

Принимаем потери тепла в окружающую среду, кДж: холодильник 40,651; I зона 80,8238; II зона 214,255; III зона 61,694; IV зона 44,477; V зона 36,3468.

Таблица 2.4 – Распределение материалов по зонам, кг



H <sub>2</sub> O, м <sup>3</sup>	–	–	–	0,1431	0,1431	0,1431	0,1431	0,8051	0,8051	1,0647
N <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>	–	–	–	0,8241	0,8241	0,8241	0,8241	0,8241	0,8241	0,8241
O <sub>2</sub> , м <sup>3</sup>	–	–	–	0,0329	0,0329	0,0329	0,0329	0,0329	0,0329	0,0329
Итого	1,1563	1,1563	1,1563	1,1563	1,1563	1,1563	1,1563	1,8183	1,8183	2,0779
Пыль, кг	–	–	–	–	–	0,150	0,150	0,550	0,550	0,300

Зона I.

Общий расход энергии на нагрев материала к концу зоны I,  $q''_{м1}$ , кДж/кг,

$$q''_{м1} = (G''_m \cdot C_m + G''_\omega) t''_m + (G''_n \cdot C_n \cdot t'_2),$$

$$q''_{м1} = (2,072 \cdot 1,236 + 0,295 \cdot 0,821 + 0,210) \cdot 40 + 0,550 \cdot 1,089 \cdot t'_2 = 120,5275 + 0,599 t'_2.$$

Общий расход энергии на нагрев материала к началу зоны I,  $q'_{м1}$ , кДж/кг,

$$q'_{м1} = G_\omega \cdot Q_\omega + (G'_{м.л.з} \cdot C_{м.л.з} + G'_\omega) t'_m + \sum \frac{G_\omega}{\rho_\omega} C_{H_2O} \frac{t'_m + t''_m}{2},$$

$$q'_{м1} = 0,21 \cdot 2493,05 + (2,072 \cdot 1,676 + 0) \cdot 200 + \frac{0,21}{0,805} \cdot 1,513 \cdot \frac{200 + 40}{2} = 1265,4384 \text{ кДж/кг}.$$

Общее количество тепла,  $q_{м1}$ , кДж/кг, которое необходимо передать материалу:

$$q_{м1} = q'_{м1} - q''_{м1},$$

$$q_{м1} = 1265,4384 - (120,5275 + 0,599 t'_2) = 12144,9109 - 0,599 t'_2$$

в том числе  $|q_{м1}|$  - количество тепла, которое, затрачивается на превращение и нагрев неразложившихся исходных веществ и твердых продуктов реакции  $|q_{м1}| = 1074,1065 \text{ кДж/кг}$ .

Зона II

$$q''_{м2} = q'_{м1} + G''_n \cdot C_n \cdot t_n,$$

$$q''_{м2} = 1265,4384 + 0,15 \cdot 1,2067 \cdot t''_2 = 1265,4384 + 0,181 t''_2.$$

$$q'_{м2} = G_\omega \cdot Q_\omega + G_{H_2O} \cdot Q_{H_2O} + G_{м.л.з} \cdot C_{м.л.з} \cdot t'_m + \sum \frac{G_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} C_{H_2O} \frac{t'_m + t''_m}{2},$$

$$q'_{m2} = 523,5405 + 0,532 \cdot 3632,73 + 1,150 \cdot 1,2067 \cdot 900 + \frac{0,532}{0,805} \cdot 1,6048 \cdot \frac{900 + 200}{2} =$$

$$= 4287,9973 \text{ кДж/кг.}$$

$$q_{m2} = 4287,9973 - (1265,4384 + 0,181t''_2) = 3022,5589 - 0,181t''_2$$

$$|q_{m2}| = 2483,6644 \text{ кДж/кг}$$

Зона III

$$q''_{m3} = q'_{m2} + G''_{37} \cdot C_{37} \cdot t''_2,$$

$$q''_{m3} = 4287,9973 + 0 = 4287,9973 \text{ кДж/кг}$$

$$q'_{m3} = 523,5405 + 1932,6124 + 1 \cdot 1,3408 \cdot 1200 + 630,6788 = 4695,7917 \text{ кДж/кг}$$

$$q_{m3} = |q_{m3}| = q'_{m3} - q''_{m3},$$

$$q_{m3} = |q_{m3}| = 4695,7917 - 4287,9973 = 407,7944 \text{ кДж/кг}$$

Зона IV

$$q''_{m4} = q'_{m3} = 4695,7917 \text{ кДж/кг}$$

$$q'_{m4} = 523,5405 + 1932,6124 + 1 \cdot 1,324 \cdot 1050 - 9,218 + 744,6788 = 4467,8137 \text{ кДж/кг}$$

$$q_{m4} = |q_{m4}| = 4581,8137 - 4695,7917 = -113,978 \text{ кДж/кг}$$

Зона V

$$q''_{m5} = q'_{m4} = 4581,8137 \text{ кДж/кг}$$

$$q'_{m5} = 523,5405 + 1932,6124 + 1 \cdot 1,1187 \cdot 700 - 9,218 + 1190,6788 = 3869,7037 \text{ кДж/кг}$$

$$q_{m5} = |q_{m5}| = 4315,7037 - 4581,8137 = -266,11 \text{ кДж/кг}$$

Таблица 2.6 – Исходные данные для расчета температур газового потока по зонам

	I	II	III	IV	V
$ q_m $ , кДж/кг	1074,1065	2483,6644	407,7944	-113,978	-266,11
$q_{ном}$ , кДж/кг	80,8238	214,255	61,694	44,477	36,3468

При последовательном расчете температур газового потока на границах зон известны его начальная температура  $t'_z$  и энтальпия  $q'_z$ . Из расчета находим конечные энтальпию  $q''_z$  и температуру  $t''_z$ :

$$q''_z = q'_z + q_z,$$

где  $q_z$  - количество тепла, которое газовый поток получил или отдал в данной зоне,  $\text{кДж/кг}$ .

### 2.2.4 Температуры газового потока на границах зон

При сгорании топлива в условиях вращающейся печи не все выделяющееся тепло идет на нагрев продуктов сгорания, часть его передается излучением в зоны, примыкающие с обеих сторон к зоне горения, а также поступает в зону I вследствие рециркуляции продуктов сгорания. Поэтому действительная температура газового потока в зоне горения ниже  $t_{теор}$ . Остальные зоны печи также отдают тепло излучением соседним зонам, имеющим более низкую температуру.

При определении энтальпии и температуры газового потока в остальных зонах печи, кроме V и I, необходимо вводить поправку, учитывающую прямую отдачу тепла газовым потоком и степень равномерности его температуры. Такая поправка является функцией критерия  $Bo$ .

Для зоны II вращающейся печи величину  $q_z, \text{кДж/кг}$ , определяют по формуле:

$$q_z = (1 - x)q_m + (xq_m - |q_m| - q_{ном})\gamma - z,$$

где  $z$  - количество тепла, отданное в зону I,  $\text{кДж/кг}$ ;

$q_m = q_n$  - количество тепла, выделившееся в зоне в результате сгорания топлива,  $\text{кДж/кг}$ ;

$|q_m|$  - количество тепла, полученное или отданное материалом,  $\text{кДж/кг}$ ;

$q_{ном}$  - потери тепла в окружающую среду,  $\text{кДж/кг}$ ;

$$x = \frac{\sum_{II-IV} (q_m + q_{ном})}{q_n},$$

$$\gamma = 0,132 Bo^{3/2},$$

$$Bo = \frac{1000 \cdot B_{зл} \cdot q_n}{0,785 D_n^2 \cdot 20,78 \cdot 10^{-8} \cdot T_{теор}^4},$$

где  $B_{зл}$  - производительность печи,  $\text{т/ч}$ .

$T_{теор}$  - теоретическая температура горения, К;

$D_n$  - диаметр печи внутренний, м.

Для зоны III из формулы исключается величина  $z$ , а для остальных зон она принимает вид:

$$q_z = -(|q_m| + q_{ном}) \cdot 0,132 Bo^{3/2}.$$

Определяем значения критерия  $Bo$ ,  $\gamma$  и  $x$  для II–IV зон

$$Bo = \frac{1000 \cdot 44 \cdot 3985,396}{0,785 \cdot 4^2 \cdot 20,78 \cdot 10^{-8} \cdot 2497^4} = 1,7283$$

$$\gamma = 0,132 Bo^{3/2} = 0,132 \cdot 1,7283^{3/2} = 0,2999$$

$$x = \frac{(2483,6644 + 214,255) + (407,7944 + 61,694) + (-113,978 + 44,477)}{3985,396} = 0,777$$

Переходим к расчету газового потока отдельных зон.

Зона V. Начальную энтальпию газового потока  $q'_z$ , кДж/кг, определяем по формуле:

$$q'_z = q_{zл}^n - q_{zл}^x - q_6^{узб} - q_{ном}^x + q_m^\phi + q_6,$$

где  $q_{zл}^n$  и  $q_{zл}^x$  - энтальпия глинозема, выходящего из печи и холодильника, кДж/кг;

$q_6^{узб}$  - энтальпия воздуха, выбрасываемого из холодильника, кДж/кг;

$q_{ном}^x$  - потеря тепла в окружающую среду холодильником, кДж/кг;

$q_m^\phi$  - физическое тепло топлива, поступающего в печь, кДж/кг;

$q_6$  - энтальпия воздуха, поступающего на установку, кДж/кг.

$$q'_z = 1114,26 - 84,219 - 14,0352 - 40,651 + 19,0045 + 31,2323 = 1025,5916 \text{ кДж/кг}.$$

Начальная температура газового потока определяется методом подбора.

Энтальпия газового потока при 400 и 500 °С, кДж/кг:

$$q_z = V_6 \cdot C_6 \cdot t'_z + V_2 \cdot C_2 \cdot t'_z,$$

$$q_z^{400} = (1,0432 \cdot 1,3324 + 0,0955 \cdot 2,74) \cdot 400 = 660,6519 \text{ кДж/кг},$$

$$q_z^{500} = (1,0432 \cdot 1,345 + 0,0955 \cdot 2,99) \cdot 500 = 884,3245 \text{ кДж/кг},$$

$$t_z'' = 400 + \frac{694,4216 - 660,6519}{884,3245 - 660,6519} \cdot 100 = 415 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Температура воспламенения газа  $1000^\circ \text{C}$ , определяем при этой температуре энтальпию газового потока  $q_z''$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ ,

$$q_z'' = (1,0432 \cdot 1,412 + 0,0955 \cdot 4,24) \cdot 1000 = 1877,9497 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

Разность энтальпий газового потока на границах зон  $q_{z5}$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ ,

$$q_{z5} = q_z'' - q_z' ,$$

$$q_{z5} = 1877,9497 - 1025,5916 = 852,3581 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

Газовый поток в зоне V получает тепло от охлаждающегося глинозема  $|q_{m5}|$  и из соседней зоны путем рециркуляции продуктов сгорания и прямой отдачи.

Количество тепла,  $z$ ,  $\text{кДж} / \text{кг}$ , получаемое из соседней зоны:

$$z = q_{z5} + |q_{m5}| + q_{nom}^V ,$$

$$z = 852,3581 - 266,11 + 36,3468 = 622,5949 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Зона IV

$$q_z'' = q_z' + (1 - x)q_n + (xq_n - |q_4| - q_{nom}^{IV})\gamma - z ,$$

$$\begin{aligned} q_z'' &= 1877,9497 + (1 - 0,777) \cdot 3985,396 + (0,777 \cdot 3985,396 + 113,978 - 44,477) \cdot 0,2999 - 622,5949 = \\ &= 3093,6276 \text{ кДж} / \text{кг} \end{aligned}$$

Зона III

$$q_z'' = q_z' - (|q_3| + q_{nom}^{III})\gamma ,$$

$$q_z'' = 3093,6276 - (407,7944 + 61,694) \cdot 0,2999 = 2952,828 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Зона II

$$q_z'' = q_z' - (|q_2| + q_{nom}^{II})\gamma ,$$

$$q_z'' = 2952,828 - (2483,6644 + 214,255) \cdot 0,2999 = 2143,722 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Зона I

$$q''_z = q'_z - |q_1| - q'_{ном},$$

$$q''_z = 2143,722 - 1074,1065 - 80,8238 = 988,7917 \text{ кДж/кг}$$

Определяем температуры газовых потоков.

Зона IV. Энтальпия газового потока:

при 1700 °C

$$q_z^{1700} = 1700 \cdot (0,1562 \cdot 2,4042 + 0,1431 \cdot 1,8841 + 0,0329 \cdot 1,5483 + 0,8241 \cdot 1,4625) = \\ = 3232,2713 \text{ кДж/кг}$$

при 1600 °C

$$q_z^{1600} = 1600 \cdot (0,1562 \cdot 2,3849 + 0,1431 \cdot 1,8619 + 0,0329 \cdot 1,54 + 0,8241 \cdot 1,4554) = \\ = 3022,4327 \text{ кДж/кг}$$

$$t_z = 1600 + \frac{3093,6276 - 3022,4327}{3232,2713 - 3022,4727} \cdot 100 = 1634 \text{ °C}.$$

Зона III. Энтальпия газового потока:

при 1500 °C

$$q_z^{1500} = 1500 \cdot (0,1562 \cdot 2,3636 + 0,1431 \cdot 1,8389 + 0,0329 \cdot 1,5312 + 0,8241 \cdot 1,447 + 0,15 \cdot 1,4916) = \\ = 3148,4041 \text{ кДж/кг}$$

при 1400 °C

$$q_z^{1400} = 1400 \cdot (0,1562 \cdot 2,3405 + 0,1431 \cdot 1,8151 + 0,0329 \cdot 1,522 + 0,8241 \cdot 1,4374 + 0,15 \cdot 1,433) = \\ = 2904,8727 \text{ кДж/кг}$$

$$t_z = 1400 + \frac{2952,828 - 2904,8727}{3148,4041 - 2904,8727} \cdot 100 = 1420 \text{ °C}.$$

Зона II. Энтальпия газового потока:

при 700 °C

$$q_z^{700} = 700 \cdot (0,1562 \cdot 2,1077 + 0,8051 \cdot 1,6338 + 0,0329 \cdot 1,437 + 0,8241 \cdot 1,3553 + 0,55 \cdot 1,1138) = \\ = 2394,9556 \text{ кДж/кг}$$

при 600 °C

$$q_z^{600} = 600 \cdot (0,1562 \cdot 2,0592 + 0,8051 \cdot 1,6072 + 0,0329 \cdot 1,4152 + 0,8241 \cdot 1,3419 + 0,55 \cdot 1,0498) = \\ = 2007,5332 \text{ кДж / кг}$$

$$t_z = 600 + \frac{2143,722 - 2007,5332}{2394,9556 - 2007,5332} \cdot 100 = 635 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Зона I. Энтальпия газового потока определяется при температуре 250 °С, т.к.  $t_z^{omx} = 250^\circ\text{C}$ ,

$$q_z^{250} = 250 \cdot (0,1562 \cdot 1,8444 + 1,0647 \cdot 1,5277 + 0,0329 \cdot 1,3476 + 0,8241 \cdot 1,3055 + 0,3 \cdot 1,7975) = \\ = 893,5215 \text{ кДж / кг}$$

Определяем средние температуры материала  $t_M^{cp}$ , °С, по зонам:

$$t_M^{cp} = \sqrt{t'_M \cdot t''_M} ,$$

где  $t'_M$  - температура материала в начале зоны, °С (таблицы 2.4).

$t''_M$  - температура материала в конце зоны, °С (таблицы 2.4).

Зона I.

$$t_M^{cp} = \sqrt{200 \cdot 40} = 89 \text{ }^\circ\text{C}$$

Зона II.

$$t_M^{cp} = \sqrt{900 \cdot 200} = 424 \text{ }^\circ\text{C}$$

Зона III.

$$t_M^{cp} = \sqrt{1200 \cdot 900} = 1039 \text{ }^\circ\text{C}$$

Зона IV.

$$t_M^{cp} = \sqrt{1050 \cdot 1200} = 1122 \text{ }^\circ\text{C}$$

Зона V.

$$t_M^{cp} = \sqrt{700 \cdot 1050} = 857 \text{ }^\circ\text{C}$$

Определяем средние температуры газового потока  $t_z^{cp}$ , °С, по зонам:

$$t_2^{cp} = \sqrt{t_2' \cdot t_2''},$$

где  $t_2'$  - температура материала в начале зоны, °С.

$t_2''$  - температура материала в конце зоны, °С.

Зона I.

$$t_2^{cp} = \sqrt{250 \cdot 635} = 398 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Зона II.

$$t_2^{cp} = \sqrt{635 \cdot 1420} = 950 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Зона III.

$$t_2^{cp} = \sqrt{1420 \cdot 1634} = 1523 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Зона IV.

$$t_2^{cp} = \sqrt{1634 \cdot 1000} = 1278 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Зона V.

$$t_2^{cp} = \sqrt{1000 \cdot 415} = 644 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяем состав газовой фазы по зонам.

Зона III:  $RO_2 = 13,51\%$ ,  $H_2O = 12,38\%$ ,  $N_2 = 71,27\%$  (при  $\alpha=1,15$ ),  $V = 1,1563 \text{ } \text{м}^3$ .

Зона II:  $V_2^{cp} = 1,1563 + 0,331 = 1,4873 \text{ } \text{м}^3$ ,  $V_2^{общ} = 1,8183 \text{ } \text{м}^3$

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_2^{cp}} \cdot 100 = \frac{0,1562}{1,4873} \cdot 100 = 10,5 \%,$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_2^{cp}} \cdot 100 = \frac{0,4741}{1,4873} \cdot 100 = 31,88 \%.$$

Зона I:  $V_2^{cp} = 1,8183 + 0,1298 = 1,9481 \text{ } \text{м}^3$ ,  $V_2^{общ} = 2,0779 \text{ } \text{м}^3$

$$RO_2 = \frac{0,1562}{1,9481} \cdot 100 = 8,02 \%,$$

$$H_2O = \frac{0,9349}{1,9481} \cdot 100 = 47,99 \%.$$

Определяем скорость движения материала в печи, коэффициент заполнения печи материалом, значения  $l_x$  и  $l_o$  по зонам.

Скорость движения материала в печи  $\omega_m$ , м/ч, определяем по формуле:

$$\omega_m = 5,78 D_n \beta n,$$

где  $\beta$  - угол наклона печи. При  $D_n = 4$  м принимаем, что  $\beta = 2,5^\circ$ ;

$n$  - число оборотов печи, об/мин. Принимается равным 0,8 об/мин.

$$\omega_m = 5,78 \cdot 4 \cdot 2,5 \cdot 0,8 = 46,24 \text{ м/ч}$$

Коэффициент заполнения печи материалом  $\varphi$  определяем из формулы:

$$\varphi = \frac{4A}{\pi D_n^2 \omega_m \gamma \tau},$$

где  $A$  - среднее количество материала, проходящего через зону, т/ч;

$\gamma$  - средняя объемная масса материала в зоне, т/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - время работы печи в сутки, ч.

Зона I

$$A = \frac{44 \cdot (2,367 + 2,082)}{2} = 97,878 \text{ т/ч},$$

$$\gamma = 1,5 \text{ т/м}^3,$$

$$\varphi = \frac{4 \cdot 97,878}{\pi \cdot 4^2 \cdot 46,24 \cdot 1,5} = 0,1123 = 11,23 \%$$

Площадь сегмента  $F_c$ , м<sup>2</sup>, (части печи, заполненной материалом):

$$F_c = \frac{\pi D^2}{4} \varphi,$$

$$F_c = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \cdot 0,1123 = 1,411 \text{ м}^2.$$

$$2\pi\varphi = 2 \cdot \pi \cdot 0,1123 = 0,7056 = \frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha$$

где  $\alpha$  - центральный угол сегмента, град.

Чтобы определить  $\alpha$ , задаемся  $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = 100^\circ$ .

При  $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha = 0,57$$

При  $\alpha = 100^\circ$

$$\frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha = 0,76$$

$$\alpha = 90^\circ + \frac{0,7056 - 0,57}{0,76 - 0,57} 10 = 97,14^\circ.$$

Ширина слоя шихты (хорда)  $l_x$ , м :

$$l_x = 2R \sin \frac{\alpha}{2},$$

где  $R$  - внутренний радиус печи, м;

$$l_x = 2 \cdot 2 \cdot \sin 48,57 = 3 \text{ м}$$

Контактная поверхность (длина дуги)  $l_o$ , м :

$$l_o = \frac{\pi D \alpha}{360},$$

$$l_o = \frac{\pi D \alpha}{360} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 97,14}{360} = 3,39 \text{ м}.$$

Эффективная длина лучей газового потока  $S_{эфф}$ , м ,

$$S_{эфф} = 0,9 \frac{4F_n}{S_{пер}},$$

где  $S_{пер}$  - периметр свободного сечения печи, м;

$F_n$  - площадь свободного сечения печи, м.

Определяем периметр свободного сечения печи:

$$S_{пер} = \frac{\pi D(360 - \alpha)}{360} + l_x,$$

$$S_{\text{пер}} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot (360 - 97,14)}{360} + 3 = 12,1755 \text{ м}.$$

Площадь свободного сечения печи определяется по формуле:

$$F_n = \frac{\pi D^2}{4} - F_c,$$

$$F_n = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} - 1,411 = 11,155 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{эфф}} = 0,9 \frac{4 \cdot 11,155}{12,1755} = 3,3 \text{ м}.$$

Длина дуги футеровки  $l_{\text{д.ф}}$ , м,

$$l_{\text{д.ф}} = \pi D - l_{\text{д}},$$

$$l_{\text{д.ф}} = \pi \cdot 4 - 3,39 = 9,18 \text{ м}.$$

Зона II

$$A = \frac{44 \cdot (2,082 + 1,15)}{2} = 71,104 \text{ м/ч}$$

$$\gamma = 1,3 \text{ м/м}^3$$

$$\varphi = \frac{4 \cdot 71,104}{\pi \cdot 16 \cdot 46,24 \cdot 1,3} = 0,0941 = 9,41 \%$$

$$F_c = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \cdot 0,0941 = 1,1825 \text{ м}^2$$

$$2\pi\varphi = 2 \cdot \pi \cdot 0,0941 = 0,59 = \frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha$$

$$\alpha = 90^\circ + \frac{0,59 - 0,57}{0,76 - 0,57} 10 = 91,1^\circ$$

$$l_x = 2 \cdot 2 \cdot \sin 45,55 = 2,86 \text{ м}$$

$$l_{\text{д}} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 91,1}{360} = 3,18 \text{ м}$$

$$F_n = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} - 1,1825 = 11,384 \text{ м}^2$$

$$S_{nep} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot (360 - 91,1)}{360} + 2,86 = 12,246 \text{ м}$$

$$S_{\phi} = 0,9 \frac{4 \cdot 11,384}{12,246} = 3,35$$

$$l_{\phi} = \pi \cdot 4 - 3,18 = 9,39 \text{ м.}$$

Зона III.

$$A = \frac{44 \cdot 2,15}{2} = 47,3 \text{ м/ч}$$

$$\gamma = 1,1 \text{ м/м}^3$$

$$\varphi = \frac{4 \cdot 47,3}{\pi \cdot 16 \cdot 46,24 \cdot 1,1} = 0,074 = 7,4 \%$$

$$F_c = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \cdot 0,074 = 0,93 \text{ м}^2$$

$$2\pi\varphi = 2 \cdot \pi \cdot 0,074 = 0,465 = \frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha$$

Чтобы определить  $\alpha$ , задаемся  $\alpha = 80^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ .

При  $\alpha = 80^\circ$

$$\frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha = 0,41$$

При  $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha = 0,57$$

$$\alpha = 80^\circ + \frac{0,465 - 0,41}{0,57 - 0,41} 10 = 83,44^\circ$$

$$l_x = 2 \cdot 2 \cdot \sin 41,72 = 2,66 \text{ м}$$

$$l_\phi = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 83,44}{360} = 2,91 \text{ м}$$

$$F_n = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} - 0,93 = 11,636 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{неп}} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot (360 - 83,44)}{360} + 2,66 = 12,314 \text{ м}$$

$$S_{\text{эфф}} = 0,9 \frac{4 \cdot 11,636}{12,314} = 3,4 \text{ м}$$

$$l_{\text{о.ф}} = \pi \cdot 4 - 2,91 = 9,66 \text{ м.}$$

Зона IV (в зоне V те же значения).

$$A = \frac{44 \cdot 2}{2} = 44 \text{ м/ч}$$

$$\gamma = 1 \text{ м/м}^3$$

$$\varphi = \frac{4 \cdot 44}{\pi \cdot 16 \cdot 46,24 \cdot 1} = 0,0757 = 7,57 \%$$

$$F_c = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \cdot 0,0757 = 0,951 \text{ м}^2$$

$$2\pi\varphi = 2 \cdot \pi \cdot 0,0757 = 0,476 = \frac{\pi\alpha}{180} - \sin \alpha$$

$$\alpha = 80^\circ + \frac{0,476 - 0,41}{0,57 - 0,41} 10 = 84,13^\circ$$

$$l_x = 2 \cdot 2 \cdot \sin 42,065 = 2,68 \text{ м}$$

$$l_o = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 84,13}{360} = 2,94 \text{ м}$$

$$F_n = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} - 0,951 = 11,615 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{неп}} = \frac{\pi \cdot 4 \cdot (360 - 84,13)}{360} + 2,68 = 12,31 \text{ м}$$

$$S_{\text{эфф}} = 0,9 \frac{4 \cdot 11,615}{12,31} = 3,4 \text{ м.}$$

$$l_{\text{д.ф.}} = \pi \cdot 4 - 2,94 = 9,63 \text{ м.}$$

Полученные значения  $\varphi$ ,  $l_x$ ,  $l_{\text{д.}}$ ,  $S_{\text{эфф}}$  и  $l_{\text{д.ф.}}$  сводим в таблицу 2.7 (туда же значение  $\varepsilon_z$ , которое рассчитывается ниже).

Таблица 2.7 – Сводные данные

Значения	Зона			
	I	II	III	IV и V
Коэффициент заполнения печи материалом $\varphi$ , %	11,23	9,41	7,4	7,57
Ширина слоя шихты (хорды) $l_x$ , м	3,0	2,86	2,66	2,68
Контактная поверхность (длина дуги) $l_{\text{д.}}$ , м	3,39	3,18	2,91	2,94
Эффективная длина лучей газового потока $S_{\text{эфф}}$ , м	3,3	3,35	3,4	3,4
Длина дуги футеровки $l_{\text{д.ф.}}$ , м	9,18	9,39	9,66	9,63
Степень черноты газов $\varepsilon_z$	0,659	0,536	0,279	0,25

Определяем степень черноты газов  $\varepsilon_z$ , по формуле:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{\text{RO}_2} + \zeta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

где  $\varepsilon_{\text{RO}_2}$  - степень черноты излучения диоксида углерода;

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  - условная степень черноты излучения водяных паров без поправки на их парциальное давление;

$\zeta$  - поправочный множитель для получения степени черноты водяных паров.

Значения  $\varepsilon_{\text{RO}_2}$ ,  $\zeta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  находятся по графикам в зависимости от температуры и значения  $P_{\text{RO}_2} S_{\text{эфф}}$  и  $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эфф}}$  [17, рисунок 19-21].

Зона I.

$$P_{\text{RO}_2} S_{\text{эфф}} = 0,0802 \cdot 3,3 = 0,2647 \text{ ат}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эфф}} = 0,4799 \cdot 3,3 = 1,5837 \text{ ат}$$

$$\varepsilon_z = 0,13 + 1,15 \cdot 0,46 = 0,659$$

Зона II.

$$P_{RO_2} S_{эфф} = 0,105 \cdot 3,35 = 0,3518 \text{ ат}$$

$$P_{H_2O} S_{эфф} = 0,3188 \cdot 3,35 = 1,068 \text{ ат}$$

$$\varepsilon_z = 0,142 + 1,125 \cdot 0,35 = 0,536$$

Зона III.

$$P_{RO_2} S_{эфф} = 0,1351 \cdot 3,4 = 0,4593 \text{ ат}$$

$$P_{H_2O} S_{эфф} = 0,1238 \cdot 3,4 = 0,4209 \text{ ат}$$

$$\varepsilon_z = 0,12 + 1,05 \cdot 0,15 = 0,279$$

### 2.2.5 Определение длины зон

Длину зон определяем из условия теплообмена.

Зона V.

Средняя скорость газового потока

$$\omega_z = \frac{V_z B_{zn} 000T_z}{3600 \cdot 0,785 D_n^2 (1 - \varphi) 273},$$

$$\omega_z = \frac{1,1563 \cdot 44000 \cdot 917}{3600 \cdot 0,785 \cdot 4^2 \cdot (1 - 0,0757) 273} = 5,43 \text{ м/с}$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_z D_n}{\nu_z},$$

где  $\nu_z$  - кинематическая вязкость газов при средней температуре.

$$Re = \frac{5,43 \cdot 4}{10,17 \cdot 10^{-5}} = 2,1357 \cdot 10^5$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,418 Re^{0,67},$$

$$Nu = 0,418 \cdot (2,1357 \cdot 10^5)^{0,67} = 1556$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $\alpha_{мен}^{\kappa}$ ,  $\kappaДж/(м^2 \cdot ^\circ C)$ ,

$$\alpha_{мен}^{\kappa} = \frac{Nu\lambda_g}{D_n},$$

где  $\lambda_g$  - коэффициент теплопроводности газа,  $\kappaДж/(м \cdot ч \cdot ^\circ C)$ .

$$\alpha_{мен}^{\kappa} = \frac{1556 \cdot 281,232 \cdot 10^{-3}}{4} = 109,3992 \kappaДж/(м^2 \cdot ^\circ C)$$

Время пребывания частиц материала на футеровке  $\tau_{м.ф}$ ,  $с$ ,

$$\tau_{м.ф} = \frac{60l_d}{\pi D_n n_n},$$

$$\tau_{м.ф} = \frac{60 \cdot 2,94}{\pi \cdot 4 \cdot 0,8} = 17,55 с.$$

Время пребывания частиц материала на открытой поверхности слоя  $\tau_{м.г}$ ,  $с$ ,

$$\tau_{м.г} = 1,63 \sqrt{\frac{l_x}{j}},$$

$$\tau_{м.г} = 1,63 \sqrt{\frac{2,68}{0,122}} = 7,64 с.$$

Изменение температуры материала при контакте с футеровкой  $\Delta t_d$ ,  $^\circ C$ ,

$$\Delta t_d = 0,833\theta_{мд} \sqrt{\frac{\tau_{м.ф}}{\tau_{м.ф} + \tau_{м.г}}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{м.ф}}{\lambda_m \cdot C_m \cdot \rho_m \cdot 3600}},$$

$$\Delta t_d = 0,833\theta_{мд} \sqrt{\frac{17,55}{17,55 + 7,64}} \cdot \sqrt{\frac{17,55}{20,95 \cdot 1,1911 \cdot 1000 \cdot 3600}} = 0,3073 \cdot 10^{-3} \theta_{мд}$$

Количество тепла  $\theta_{мд}$ ,  $\kappaДж/(м^2 \cdot ч)$ , отдаваемого материалом теплопроводностью:

$$\theta_{мд} = 0,003 \frac{\tau_{м.ф} + \tau_{м.г}}{\tau_{м.ф}} \cdot \alpha_{мен}^{\kappa} \sqrt{\frac{\lambda_m \cdot C_m \cdot \rho_m \cdot 3600}{\tau_{м.ф}}} \cdot [(t_m - \Delta t_d) - t_g],$$

$$\theta_{\text{м0}} = 0,003 \frac{17,55 + 7,64}{17,55} \cdot 109,3992 \sqrt{\frac{20,95 \cdot 1,1911 \cdot 1000 \cdot 3600}{17,55}} \cdot [(857 - 0,3073 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{м0}}) - 644] =$$

$$= 227009,9364 - 0,3275 \theta_{\text{м0}}$$

$$\theta_{\text{м0}} = \frac{227009,9364}{1,3275} = 171005,6 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Изменение температуры материала  $\Delta t_{\text{м.х}}, ^\circ\text{C}$ , при контакте с газовым потоком:

$$\Delta t_{\text{м.х}} = 0,625(\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} + \theta_{\text{м.х}}^{\text{к}}) \sqrt{\frac{\tau_{\text{м.г}}}{\tau_{\text{м.ф}} + \tau_{\text{м.г}}}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\text{м.г}}}{\lambda_{\text{м}} \cdot C_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot 3600}},$$

$$\Delta t_{\text{м.х}} = 0,625(\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} + \theta_{\text{м.х}}^{\text{к}}) \sqrt{\frac{7,64}{17,55 + 7,64}} \cdot \sqrt{\frac{7,64}{20,95 \cdot 1,1911 \cdot 1000 \cdot 3600}} = 0,1004 \cdot 10^{-3} (\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} + \theta_{\text{м.х}}^{\text{к}})$$

Количество тепла, отдаваемого материалом конвекцией  $\theta_{\text{м.х}}^{\text{к}}, \text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,

$$\theta_{\text{м.х}}^{\text{к}} = \alpha_{\text{мен}}^{\text{к}} \cdot [(t_{\text{м}} - \Delta t_{\text{м.х}}) - t_{\text{г}}],$$

$$\theta_{\text{м.х}}^{\text{к}} = 109,3992 \cdot [857 - 0,1004 \cdot 10^{-3} (\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} + \theta_{\text{м.х}}^{\text{к}}) - 644] = 23302,0296 - 10,9837 \cdot 10^{-3} (\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} + \theta_{\text{м.х}}^{\text{к}})$$

$$\theta_{\text{м.х}}^{\text{к}} = \frac{23302,0296 - 10,9837 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{м.х}}^{\text{л}}}{1,011} = 23048,4961 - 10,8642 \cdot 10^{-3} \theta_{\text{м.х}}^{\text{л}}$$

Количество тепла, отдаваемого материалом лучеиспусканием  $\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}}, \text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,

$$\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} = \frac{1}{\frac{l_{\text{x}}}{l_{\text{дф}}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}) [\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{м}}) + \varepsilon_{\text{г}}]} \cdot \left\{ \sigma \varepsilon_{\text{г}} \varepsilon_{\text{м}} \left[ \frac{l_{\text{x}}}{l_{\text{дф}}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}) + 1 \right] \left[ (T_{\text{м}} - \Delta T_{\text{м.х}})^4 - T_{\text{г}}^4 \right] + \right.$$

$$\left. + \left( \theta_{\text{м0}} - \frac{2q_{\text{ном}}^{\text{V}} 1000 B_{\text{эл}}}{\pi D_{\text{n}} L_{\text{V}}} \right) \varepsilon_{\text{м}} (1 - \varepsilon_{\text{г}}) \frac{l_{\text{x}}}{l_{\text{дф}}} \right\}$$

$$\theta_{\text{м.х}}^{\text{л}} = \frac{1}{\frac{3}{9,18} (1 - 0,25) [0,75 + 0,25(1 - 0,75) + 0,25]} \cdot \left\{ 20,78 \cdot 10^{-8} \cdot 0,25 \cdot 0,75 \cdot \left[ \frac{3}{9,18} (1 - 0,25) + 1 \right] \times \right.$$

$$\times \left[ \left( 1130 - 0,1004 \cdot 10^{-3} (23048,4961 + 0,9891 \theta_{m,x}^{\kappa}) \right)^4 - 917^4 \right] + \left( 171005,6 - \frac{2 \cdot 36,3468 \cdot 44000}{\pi \cdot 4 \cdot 10} \right) \times \\ \times 0,75 \cdot (1 - 0,25) \frac{3}{9,18} \left. \right\} = \frac{1}{0,26042} \left\{ 4,8512 \cdot 10^{-8} \left[ (1127,686 - 0,0993 \cdot 10^{-3} \theta_{m,x}^{\kappa})^4 - 917^4 \right] + 26756 \right\}$$

Решая уравнение методом подбора, получаем  $\theta_{m,x}^{\eta} = 246914,5 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,  
тогда  $\theta_{m,x}^{\kappa} = 20366 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Общее количество тепла  $\theta_{m,x}^V$ ,  $\text{кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , отдаваемое материалом в зоне V:

$$\theta_{m,x}^V = (\theta_{m,x}^{\eta} + \theta_{m,x}^{\kappa}) l_x + \theta_{m0} l_0,$$

$$\theta_{m,x}^V = (246914,5 + 20366) \cdot 3 + 171005,6 \cdot 2,94 = 1304597,954 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

Длина зоны  $L_V$ , м,

$$L_V = \frac{q_{m5} B_{21}}{\theta_{m,x}^V},$$

$$L_V = \frac{266,11 \cdot 44000}{1304597,954} = 8,98 \approx 9 \text{ м}$$

Длину зоны IV (зоны горения) не рассчитываем, так как обычно ее длина равна длине факела, по опытным данным принимаем  $L_{IV}$  равную 7,0 м [17].

Зона III.

$$\omega_2 = \frac{1,1563 \cdot 44000 \cdot 1796}{3600 \cdot 0,785 \cdot 16 \cdot (1 - 0,074) \cdot 273} = 8,0 \text{ м/с}$$

$$v_2 = \frac{1,1563 \cdot 10^{-5}}{\frac{0,1562}{17,1} + \frac{0,0329}{27,8} + \frac{0,1431}{47} + \frac{0,8241}{25,8}} = 25,523 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$$

$$\lambda_2 = \frac{(0,1562 \cdot 385,48 + 0,0329 \cdot 354,474 + 0,1431 \cdot 649,45 + 0,8241 \cdot 290,367) \cdot 10^{-3}}{1,1563} = \\ = 349,48 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$Re = \frac{8,0 \cdot 4}{25,523 \cdot 10^{-5}} = 1,254 \cdot 10^5$$

$$Nu = 0,418 \cdot (1,254 \cdot 10^5)^{0,67} = 1089$$

$$\alpha_{мен}^{\kappa} = \frac{1089 \cdot 349,48 \cdot 10^{-3}}{4} = 95,146 \text{ кДжс}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

$$\tau_{м.ф} = \frac{60 \cdot 2,91}{\pi \cdot 4 \cdot 0,8} = 17,38 \text{ с}$$

$$\tau_{м.г} = 1,63 \sqrt{\frac{2,66}{0,11}} = 8,02 \text{ с}$$

$$\Delta t_{\partial} = 0,833 \theta_{м\partial} \sqrt{\frac{17,38}{17,38 + 8,02}} \cdot \sqrt{\frac{17,38}{23,05 \cdot 1,257 \cdot 1050 \cdot 3600}} = 0,2745 \cdot 10^{-3} \theta_{м\partial}$$

Количество тепла  $\theta_{м\partial}$ , кДжс/(м<sup>2</sup> · ч), отдаваемого материалом теплопроводностью:

$$\theta_{м\partial} = 0,003 \frac{\tau_{м.ф} + \tau_{м.г}}{\tau_{м.ф}} \cdot \left( \frac{t_2}{100} \right)^2 \sqrt{\frac{\lambda_m \cdot C_m \cdot \rho_m \cdot 3600}{\tau_{м.ф}}} \cdot [t_2 - (t_m + \Delta t_{\partial})],$$

$$\begin{aligned} \theta_{м\partial} &= 0,00115 \frac{17,38 + 8,02}{17,38} \cdot \left( \frac{1523}{100} \right)^2 \sqrt{\frac{23,05 \cdot 1,257 \cdot 1050 \cdot 3600}{17,38}} \cdot [1523 - (1039 + 0,2745 \cdot 10^{-3} \theta_{м\partial})] = \\ &= 473642,943 - 268,626 \cdot 10^{-3} \theta_{м\partial} \end{aligned}$$

$$\theta_{м\partial} = \frac{473642,943}{1,268626} = 373351,124 \text{ кДжс}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$\Delta t_{м.х} = 0,625 (\theta_{м.х}^{\eta} + \theta_{м.х}^{\kappa}) \sqrt{\frac{8,02}{17,38 + 8,02}} \cdot \sqrt{\frac{8,02}{23,05 \cdot 1,257 \cdot 1050 \cdot 3600}} = 0,095 \cdot 10^{-3} (\theta_{м.х}^{\eta} + \theta_{м.х}^{\kappa})$$

Количество тепла, отдаваемого материалом конвекцией  $\theta_{м.х}^{\kappa}$ , кДжс/(м<sup>2</sup> · ч),

$$\theta_{м.х}^{\kappa} = \alpha_{мен}^{\kappa} \cdot [t_2 - (t_m + \Delta t_{м.х})],$$

$$\theta_{м.х}^{\kappa} = 95,146 \cdot [1523 - 1039 - 0,095 \cdot 10^{-3} (\theta_{м.х}^{\eta} + \theta_{м.х}^{\kappa})] = 46050,664 - 9,03887 \cdot 10^{-3} (\theta_{м.х}^{\eta} + \theta_{м.х}^{\kappa})$$

$$\theta_{м.х}^{\kappa} = \frac{46050,664 - 9,03887 \cdot 10^{-3} \theta_{м.х}^{\eta}}{1,00904} = 45638,1467 - 8,9579 \cdot 10^{-3} \theta_{м.х}^{\eta}$$

Количество тепла, отдаваемого материалом лучеиспусканием  $\theta_{м.х}^{\eta}$ , кДжс/(м<sup>2</sup> · ч),

$$\theta_{м.х}^{\eta} = \sigma \varepsilon_{\varepsilon} \varepsilon_m [T_2^4 - (T_m + \Delta T_{м.х})^4]$$

$$\begin{aligned}\theta_{m,x}^n &= 20,78 \cdot 10^{-8} \cdot 0,279 \cdot 0,75 \cdot \left[ 1796^4 - (1312 + 0,095 \cdot 10^{-3} (45638,1467 + 0,991\theta_{m\delta}^n))^4 \right] = \\ &= 4,348 \cdot 10^{-8} \left[ 1796^4 - (1316,3356 + 0,094 \cdot 10^{-3} \theta_{m\delta}^n)^4 \right]\end{aligned}$$

Решая уравнение методом подбора, получаем  $\theta_{m,x}^n = 309903 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , тогда  $\theta_{m,x}^k = 42862 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

$$\theta_{m,x}^{III} = (309903 + 42862) \cdot 2,66 + 373351,124 \cdot 2,91 = 2024806,671 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

$$L_{III} = \frac{407,7944 \cdot 44000}{2024806,671} = 8,8 \text{ м}$$

## Зона II.

Тепловые потоки  $q_{луч}$ ,  $q'_{луч}$  и  $q_{конв}$  определяются расчетом теплообмена в рабочем пространстве печи по формулам:

а) тепловой поток на открытую поверхность шихты  $q_{луч}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , (излучение от газов и кладки):

$$q_{луч} = C_{z.k.m} \left[ \left( \frac{T_z^{cp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m^{cp}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $C_{z.k.m}$  - приведенный коэффициент излучения от газов и кладки на шихту,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}^4)$ .

Определяем приведенный коэффициент излучения от газов и кладки на шихту:

$$C_{z.k.m} = 20,78 \varepsilon_m \frac{\omega + 1 - \varepsilon_z}{[\varepsilon_m + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_m)] \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z} + \omega},$$

где  $\omega$  - степень развития кладки.

Степень развития кладки определяется по следующей формуле:

$$\omega = \frac{D\pi - l_\delta}{l_x},$$

$$\omega = \frac{4\pi - 3,18}{2,86} = 3,282$$

$$C_{\kappa..м} = 20,78 \cdot 0,75 \frac{3,282 + 1 - 0,536}{[0,75 + 0,536 \cdot (1 - 0,75)] \frac{1 - 0,536}{0,536} + 3,282} = 14,0746 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{K}^4)$$

$$q_{\text{луч}} = 14,0746 \cdot \left[ \left( \frac{1223}{100} \right)^4 - \left( \frac{697}{100} \right)^4 \right] = 281660,17 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

б) тепловой поток на закрытую поверхность шихты  $q'_{\text{луч}}$ , кДж/(м<sup>2</sup>·ч), (излучение от кладки):

$$q'_{\text{луч}} = C_{\kappa..м} \left[ \left( \frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}^{\text{сп}}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $C_{\kappa..м}$  - приведенный коэффициент излучения от кладки на шихту, кДж/(м<sup>2</sup>·ч·K<sup>4</sup>).

$T_{\kappa}$  - абсолютная средняя температура кладки, K.

Определяем приведенный коэффициент излучения от кладки на шихту:

$$C_{\kappa..м} = \frac{20,78}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{м}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\kappa}} - 1},$$

где  $\varepsilon_{\kappa}$  - степень черноты кладки; принимаем  $\varepsilon_{\kappa} = 0,8$ .

$$C_{\kappa..м} = \frac{20,78}{\frac{1}{0,75} + \frac{1}{0,8} - 1} = 13,1242 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{K}^4)$$

Средняя температура кладки  $t_{\kappa}$ , °C,

$$t_{\kappa} = \frac{t_{\kappa}^{\text{сп}} + t_{\text{м}}^{\text{сп}}}{2},$$

$$t_{\kappa} = \frac{950 + 424}{2} = 687 \text{ °C}$$

$$q'_{\text{луч}} = 13,1242 \cdot \left[ \left( \frac{687 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{424 + 273}{100} \right)^4 \right] = 80495,466 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

в) тепловой поток передаваемый на шихту конвекцией  $q_{\text{конв}}$ , кДж/(м<sup>2</sup>·ч),

$$q_{\text{конв}} = 37,71 \omega_o (t_{\kappa} - t_{\text{м}}),$$

где  $\omega_o$  - условная скорость газов в печи, при нуле градусов Цельсия, м/с.

Определяем условную скорость газов в печи:

$$\omega_o = \frac{4V_z'' B_{zл}}{3600D^2\pi},$$

$$\omega_o = \frac{4 \cdot 1,8183 \cdot 44000}{3600 \cdot 4^2 \cdot \pi} = 1,7685 \text{ м/с}$$

$$q_{\text{конв}} = 37,71 \cdot 1,7685 \cdot (950 - 424) = 35079,011 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

Общий тепловой поток  $q_{\text{общ}}$ , кДж/(м<sup>2</sup> · ч),

$$q_{\text{общ}} = (q_{\text{луч}} + q'_{\text{луч}})l_x + q_{\text{конв}}l_d,$$

$$q_{\text{общ}} = (281660,17 + 80495,466) \cdot 2,86 + 35079,011 \cdot 3,18 = 1147316,374 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$L_{II} = \frac{2483,6644 \cdot 44000}{1147316,374} = 95,2 \text{ м}$$

Зона I.

Длину зоны сушки  $L_c$ , м, подсчитывают по формуле:

$$L_c = \frac{B_{zл} (\omega_{\text{исх}} - \omega_{\text{кон}})}{\Delta\omega \frac{\pi D^2}{4}}$$

где  $B_{zл}$  - производительность печи по гидроокиси алюминия с учетом оборотной пыли, т/ч;

$\omega_{\text{исх}}$  и  $\omega_{\text{кон}}$  - содержание влаги в исходном и конечном гидрате, доли ед. В данном случае  $\omega_{\text{исх}} = 0,21$ ,  $\omega_{\text{кон}} = 0$  (таблица 2.4).

$\Delta\omega$  - допустимое напряжение рабочего пространства сушильной зоны печи по удаляемой влаге, т/(м<sup>3</sup> · ч); принимаем  $\Delta\omega = 0,05 \text{ т}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ .

Тогда

$$L_c = \frac{44 \cdot (0,21 - 0)}{0,1 \cdot \frac{\pi \cdot 16}{4}} = 7,4 \text{ м}$$

Полная длина печи составит:

$$L_{\text{печи}} = \sum L_{\text{зон}} = 9 + 7 + 8,8 + 95,2 + 7,4 = 127,4 \text{ м}$$

Принимаем стандартную печь, изготавливаемую отечественной промышленностью размером  $4,5 \times 110$  м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мире накоплен значительный опыт конструирования и эксплуатации печей различного назначения. Большое разнообразие конструкций печей, применяемых в промышленности, обусловлен прежде всего чрезвычайно широким спектром технологических процессов, осуществляемых при производстве и дальнейшей тепловой обработке разнообразных материалов. Диапазон рабочих температур может изменяться в широких пределах. Вот почему при выборе конструкции и исходных данных, необходимых для расчета промышленной печи, следует, прежде всего, учитывать особенности технологического процесса, осуществляемого в данном агрегате.

Основное назначение металлургической печи состоит в том, чтобы создать в рабочем пространстве, изолированном от окружающей среды, наиболее благоприятные условия для реализации соответствующего технологического процесса. При этом необходимо учитывать закономерности, характеризующие процесс теплогенерации, механизм движения газов и теплообмен. Необходимо принимать во внимание взаимосвязь между условиями работы данной печи и условиями работы огнеупоров; возможность внутripечного пылеосаждения или создания надежных систем очистки отходящих газов от пыли и т.д. Надежно работающая печь с экономным и рациональным использованием ее тепловой мощности является той базой, на основе которой можно решить практически любые технологические вопросы.

При сгорании топлива в условиях вращающейся печи не все выделяющееся тепло идет на нагрев продуктов сгорания, часть его передается излучением в зоны, примыкающие с обеих сторон к зоне горения, а также поступает в зону I вследствие рециркуляции продуктов сгорания. Поэтому действительная температура газового потока в зоне горения ниже  $t_{теор}$ . Остальные зоны печи также отдают тепло излучением соседним зонам, имеющим более низкую температуру.

На примере данного теплового расчета следует, что вариация длин зон печи кальцинации позволит экономить удельный расход топлива. Например уменьшая длину зоны подогрева вращающейся печи примерно на 15 м, мы экономим около 0,1 кг/ч удельного расхода топлива, за счет снижения скорости движения дымовых газов и перераспределения теплообмена на границах зон.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривандин, В.А. Metallургическая теплотехника. Конструкция и работа печей / В.А. Кривандин, И.Н. Неведомская, В.В. Кобахидзе и др. М.: Metallургия, 1986. - 592 с. т-2.
2. Ходоров Е.И., Шморгуененко Н.С. Техника спекания шихт глиноземной промышленности. – М.: Metallургия, 1978. - 319 с.
3. Арутюнов, В.А. Metallургическая теплотехника / В.А. Арутюнов, В.И. Миткалинный, С.Б. Старк. М.: Metallургия, 1974. - 671 с. т-1.
4. Арлюк, Б.И. Математическая модель нестационарного процесса теплообмена во вращающейся печи спекания глиноземных шихт / Б.И. Арлюк // Сб. науч. тр. ВАМИ. Л.: ВАМИ, 1977, № 97. С. 96-104.
5. Кобахидзе, В.В. Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии / В.В. Кобахидзе. М.: Metallургия, 1994. - 315 с.
6. Блинов Е.А. Топливо и теория горения. Раздел – подготовка и сжигание топлива: Учебно-методический комплекс (Учебное пособие) // Е.А. Блинов. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. - 119 с.
7. Metallургические печи: Атлас. Учебное пособие для вузов // Миткалинный В.И., Кривандин В.А., Морозов В.А. и др. – М.: Metallургия, 1987. - 384 с.
8. Цымбал, В.П. Математическое моделирование metallургических процессов / В.П. Цымбал. М.: Metallургия, 1986. - 240 с.
9. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. -М.: Metallургия, 1990. 240 с.
10. Гуцин, С.Г. Вращающиеся печи глиноземных цехов / С.Г. Гуцин, В.Н. Корюков, В.Д. Сучков. Свердловск: УПИ, 1979. - 64 с.
11. Лайнер, А.И. Производство глинозема. / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер. М.: Metallургия, 1978. - 344 с.
12. Тепловой расчет теплового баланса вращающихся печей кальцинации (Инструкция). – Ленинград: ВАМИ, 1976. - 20 с.
13. Еремин, Н.И. Процессы и аппараты глиноземного производства / Н.И. Еремин, А.Н. Наумчик, В.Г. Казаков. М.: Metallургия, 1980. - 360 с.
14. Арлюк, Б.И. Расчет теплообмена во вращающейся печи / Б.И. Арлюк, Э.М. Ермолаева // Сб. науч. тр. ВАМИ. Л.: ВАМИ, 1969, № 65-66. - С. 97-104.
15. Ходоров, Е.И. Основные закономерности процесса спекания шихт во вращающихся печах / Е.И. Ходоров // Сб. науч. тр. ВАМИ. М.: Metallургия, 1970, №70. С. 64-71.

16. Арутюнов, В.А. Математическая модель теплообмена во вращающейся печи с учетом движения слоя / В.А. Арутюнов, В.Г. Абакумов, Д.Н. Суриков, В.В. Бухмиров // "Изв. Вузов. Цветная металлургия", 1997 №6. 65-70 с.

17. Самарянова Л.Б., Лайнер А.И. Технологические расчеты в производстве глинозема: Учебное пособие для техникумов. – М.: Металлургия, 1981. - 280 с.